

PROSIDING

SEMINAR PANORAMA ANTARIKSA 2021

70 Tahun Pendidikan Tinggi Astronomi di
Indonesia

30 OKTOBER 2021

Seminar Virtual Panorama Antariksa
Kelompok Keilmuan Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam,
Institut Teknologi Bandung, Indonesia dan
Himpunan Astronomi Indonesia, Indonesia

PROSIDING

SEMINAR PANORAMA ANTARIKSA 2021

70 Tahun Pendidikan Tinggi Astronomi
di Indonesia

30 OKTOBER 2021

Prosiding Seminar Panorama Antariksa 2021

Komite ilmiah:

- Dr. Endang Soegiartini (Institut Teknologi Bandung)
- Dr. Kiki Vierdayanti (Institut Teknologi Bandung)
- Dr. Yayan Sugianto (Institut Teknologi Bandung)
- Dr. rer. nat. M. Ikbāl Arifyanto (Institut Teknologi Bandung)
- Dr. Mahasena Putra (Institut Teknologi Bandung)
- Muhamad Zamzam N., M. Si. (Badan Riset dan Inovasi Nasional)
- Drs. Widya Sawitar (Planetarium Jakarta)
- Avivah Yamani, M. Si. (Langit Selatan)
- Dr. Aprilia (Institut Teknologi Bandung)
- Dr. rer. nat. Hesti R. T. Wulandari (Institut Teknologi Bandung)
- Premana W. Premadi, Ph. D. (Institut Teknologi Bandung)
- Dr. Chatief Kunjaya (Institut Teknologi Bandung)
- Dr. Moedji Raharto (Institut Teknologi Sumatera)
- Dr. Judhistira Aria Utama (Universitas Pendidikan Indonesia)
- Dr. Anton T. Jaelani (Institut Teknologi Bandung)
- Dr. Dhani Herdiwijaya (Institut Teknologi Bandung)

Penyunting:

- Dr. Ibnu Nurul Huda
- Dr. Anton T. Jaelani
- Dr. Budi Dermawan

© 2022 Kelompok Keilmuan Astronomi, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, dan
Himpunan Astronomi Indonesia

Cetakan pertama: Mei 2022

ISBN 978-1-387-93811-7 (Imprint: Lulu.com)

Penerbit AstroPustaka



Kata Pengantar

Bismillahirrahmanirrahiim

Puji syukur kepada Allah SWT berkat rahmat dan hidayah-Nya sehingga Seminar Panorama Antariksa pada tanggal 30 Oktober 2021 yang merupakan bagian dari Peringatan 70 Tahun Pendidikan Tinggi Astronomi di Indonesia dengan tema “PANORAMA: Pendidikan AstroNomi dan kolaboRasi di Masa depAn” dapat terlaksana dan prosiding ini dapat diterbitkan dengan baik. Peringatan puncak 70 Tahun Pendidikan Tinggi Astronomi di Indonesia sendiri berlangsung sehari sebelumnya, yaitu pada 29 Oktober 2021, dengan diselenggarakannya Seminar Pendidikan Astronomi yang mengulas aneka topik tentang pendidikan, popularisasi dan pemasyarakatan astronomi dari berbagai pihak yang diharapkan menjadi sumber ide-ide kolaborasi yang dapat dikembangkan dalam waktu dekat maupun di masa depan.

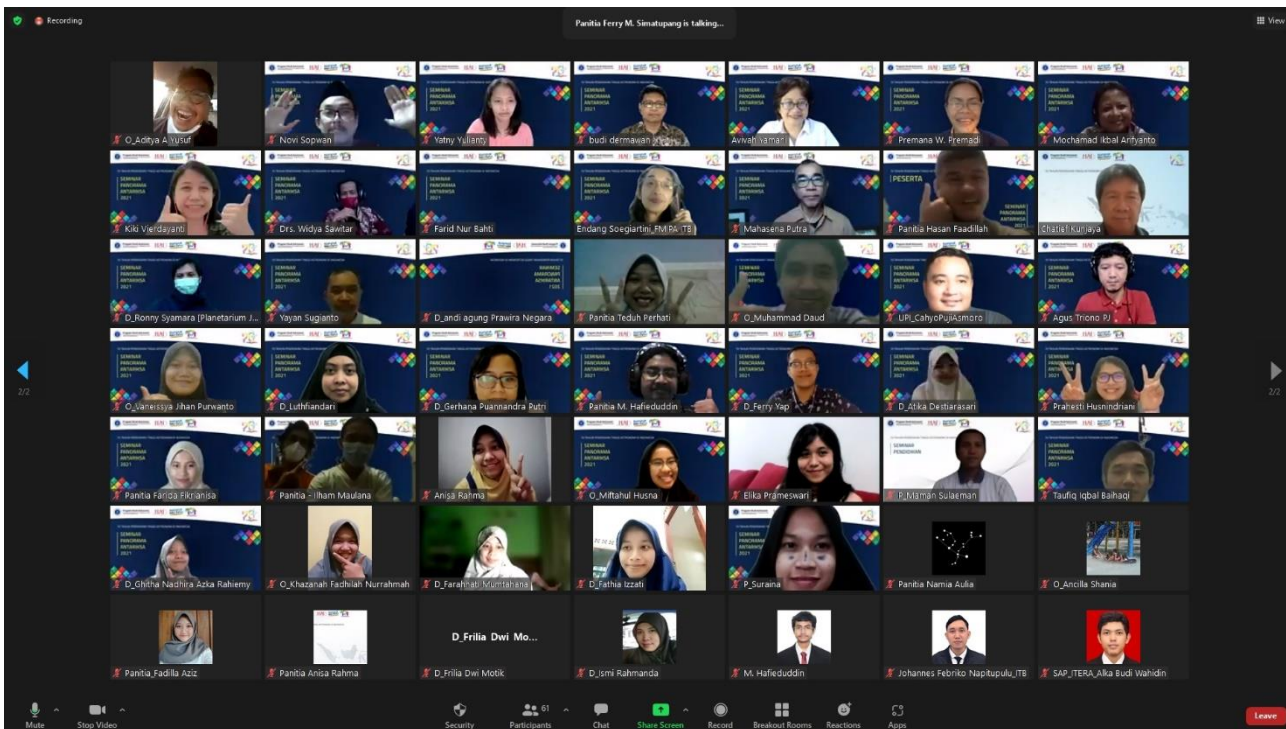
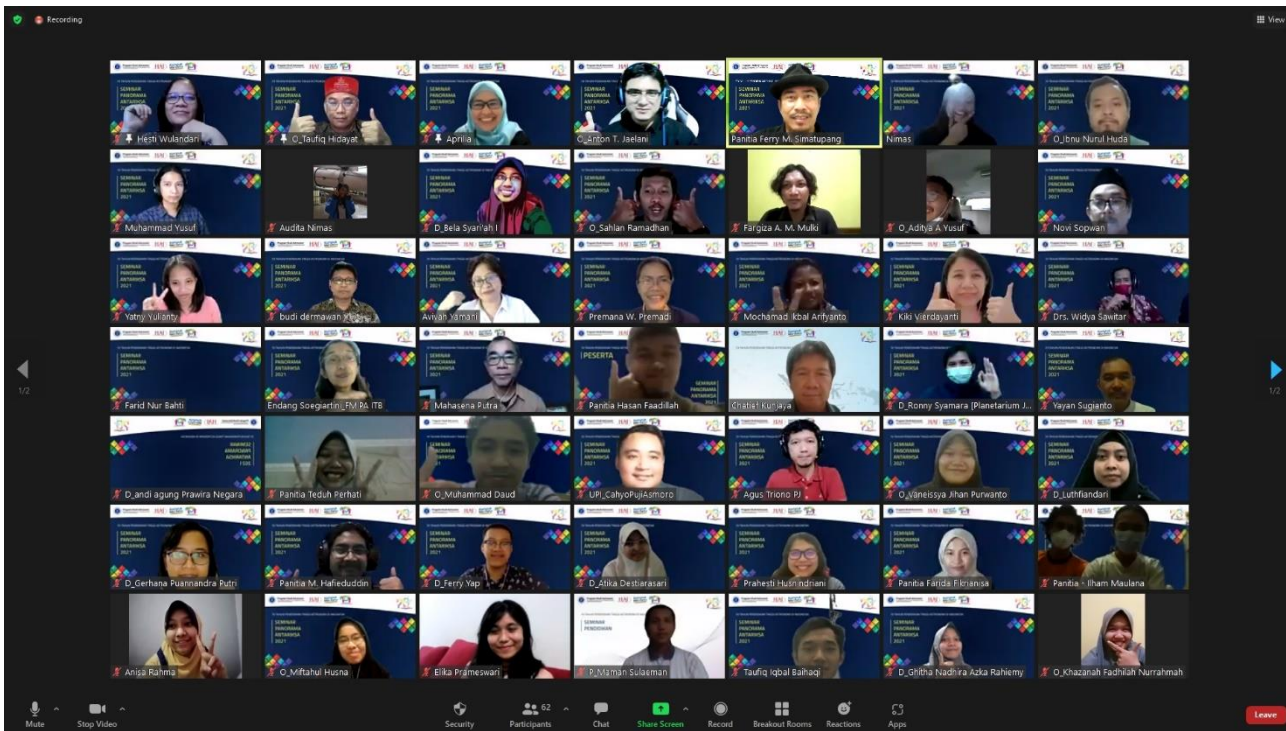
Saat ini Astronomi Indonesia dipandang sudah semakin berkembang dan tersebar di banyak tempat di nusantara yang membuka kesempatan untuk menjalin kerja sama baik dalam pendidikan maupun penelitian. Topik penelitian astronomi yang dilakukan oleh peneliti yang berasal dari berbagai instansi pun begitu beragam yang kemudian didokumentasikan dalam prosiding ini. Topik-topik tersebut meliputi Matahari, Fisika Bintang, Tata Surya, & Eksoplanet; Astrofisika Teoretik, Galaksi, & Kosmologi; Instrumentasi & Fasilitas Astronomi; Pendidikan Astronomi (Tinggi, Dasar, Publik) dalam Era Teknologi 4.0; Keilmuan Multidisiplin terkait Astronomi (Arkeoastronomi, Etnoastronomi, Astrotourism, dll); dan Popularisasi, Komunikasi, & Public Outreach Astronomi. Seminar ini dapat terlaksana dengan baik dan lancar atas bantuan dari banyak pihak. Oleh karena itu kami ucapkan terima kasih kepada kepada pimpinan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam (FMIPA) Institut Teknologi Bandung (ITB), Ketua Kelompok Keahlian Astronomi, Ketua-ketua Program Studi Astronomi, Ketua Himpunan Astronomi Indonesia (HAI) serta pemakalah, dan panitia yang telah berupaya mensukseskan Seminar Panorama Antariksa.

Kami menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam penyusunan prosiding seminar ini sehingga saran dan kritik yang membangun sangat diperlukan. Semoga prosiding ini dapat memberikan ilmu dan menjadi sumber inspirasi bagi semua pihak khususnya di bidang astronomi.

Ketua Panitia Peringatan 70 Pendidikan Tinggi Astronomi di Indonesia

Dr. Anton T. Jaelani

Dokumentasi



Daftar Isi

Kata Pengantar.....	i
Dokumentasi.....	ii
Daftar Isi.....	iii

TEMA 1: Matahari, Fisika Bintang, Tata Surya, & Eksoplanet

Manuver Eksentrisitas dalam Strategi <i>Station Keeping</i> Timur-Barat Satelit GEO (Studi Kasus: Indostar II/SES-7).....	2
<i>E. Fitri, R. Eko Poetro, dan E. Soegiartini</i>	
Analisis Korelasi Antara <i>Sunspot Number</i> pada Siklus Matahari ke-24 dengan Indeks Dst Berdasarkan Data Pengamatan BPAA Pasuruan	6
<i>A. F. N. Cahyaningtyas dan S. Filawati</i>	
Telaah Lintasan Harian Matahari dengan <i>Gnomon</i> Tegak di Kabupaten Ngawi	10
<i>D. R. Saffira dan E. Soegiartini</i>	
Studi Variabilitas Kecepatan Angin dan Distribusi Kelimpahan Molekul di Titan Berdasarkan Pengamatan ALMA	14
<i>L. Badingah dan T. Hidayat</i>	
Rekonstruksi Trajektori Wahana Antariksa menuju Asteroid Benu.....	18
<i>M. Affan, R. E. Poetro, dan E. Soegiartini</i>	
Analysis of Sunspot Groups Evolution Based on The Fractal Dimension of AR12192 and AR12209	22
<i>S. E. Aziza and D. Herdiwijaya</i>	
Pengamatan Rotasi Jupiter di Observatorium Astronomi Sunan Ampel Surabaya	26
<i>M. A. Humam, N. Sopwan, dan A. A. Yusuf</i>	
Pengamatan Bintang Ganda dengan <i>Bosscha Robotic Telescope</i>	30
<i>M. Yusuf dan Y. Yulianty</i>	
Skenario Evolusi Bintang Ganda Nova	33
<i>A. R. Kusuma Putra, M. Putra, Aprilia, M. I. Hakim, dan Y. Sugianto</i>	
100 Tahun Pengamatan Bintang Ganda di Observatorium Bosscha: Benarkah Objek yang Diamati itu Secara Fisis Ganda?	37
<i>I. Imaduddin, C. Vidante, B. D. S. Budi, S. Fatkhusalma, dan M. Irfan</i>	

Low Resolution Spectroscopic Observation of the 2021 Outburst of the Recurrent Nova RS Ophiuchi	41
<i>I. Hafizah, A. A. Yusuf, A. Oktaviandra, R. Muztaba, and H. L. Malasan</i>	
Optical Integral Field Spectroscopy Study of Supernova Remnants.....	44
<i>J. Suherli and S. Safi-Harb</i>	
Batasan Massa dan Radius Bintang Neutron pada Sistem SAX J1748.9-2021 Berdasarkan Metode <i>Touchdown Point</i>	48
<i>M. Daud dan K. Vierdayanti</i>	
Studi Pengaruh Metalisitas pada Evolusi Bintang Bermassa Rendah Menggunakan MESA-r12778	52
<i>S.A. Sakinah dan Aprilia</i>	
V/R Variations in H α Emission Line Spectra of B-emission Star EW Lac Based on Its Spectral Physical Parameters	56
<i>A. S. Bernadi and Aprilia</i>	
Maser Observations to Probe Massive Star Formation in G354.61+0.47	60
<i>M. Hafieduddin, T. Hirota, T. Hidayat and K. Sugiyama</i>	
<i>Project BEACON: Program Pengamatan Okultasi di Observatorium Bosscha</i>	64
<i>A. T. P. Jatmiko</i>	
Pengamatan Survei Variabilitas Pada Gugus Bintang Terbuka di Observatorium Bosscha	66
<i>D. Mandey</i>	

TEMA 2: Astrofisika Teoretik, Galaksi, & Kosmologi

Rekonstruksi Nonparametrik <i>Dynamical Dark Energy</i> Menggunakan Data <i>Cosmic Chronometer</i> dan Supernova Tipe Ia	69
<i>V. J. Purwanto dan H. Wulandari</i>	
Efek Anisotropi Teori <i>Generalized Uncertainty Principle</i> pada Persamaan Keadaan Bintang Neutron	73
<i>A. B. Wahidin, I. Husin, dan A. Sulaksono</i>	

TEMA 3: Instrumentasi & Fasilitas Astronomi

Pemanfaatan Kamera DSLR Canon 1200D untuk Pengamatan Fotometri Bintang Variabel.....	78
<i>A. Wibowo dan M. Putra</i>	
Status Terkini <i>Bosscha Robotic Telescope</i>	82
<i>M. Yusuf, A. Setiawan, M. Sulaeman, C. J. B. Anin, dan Y. Yulianty</i>	
Program Konversi Antena Telekomunikasi Indosat Menjadi Teleskop Radio VLBI	84
<i>T. Hidayat, I. Nurul Huda, S. Ramadhan, P. W. Premadi, B. Dermawan, L. Puspitarini, A. T. Jaelani, K. Vierdayanti, M. Irfan, M. Yusuf, M. Hafieduddin, H. R. T. Wulandari, dan C. Kunjaya</i>	

Low-Cost Astrophotography Mount using DIY Barn-Door Tracker and 3D-Printed Astro-Tracker at Observatorium Astronomi ITERA Lampung	88
<i>A. A. Yusuf, A. Oktaviandra, I. Hafizah, D. Andriyan, and H. L. Malasan</i>	
Tinjauan Karakteristik dan Target Sains Teleskop Radio <i>Single-Dish</i> 18-26 Meter Serta Pemanfaatannya Untuk Observatorium Nasional Timau.....	92
<i>M. Husna dan F. Mumtahana</i>	
Profil Cuaca Situs Stasiun Bumi Jatiluhur untuk Persiapan Teleskop Radio VLBI Indonesia	96
<i>S. Ramadhan, T. Hidayat, I. Nurul Huda, P. W. Premadi, B. Dermawan, L. Puspitarini, A. T. Jaelani, K. Vierdayanti, M. Irfan, M. Yusuf, M. Hafieduddin, H. R. T. Wulandari, Z. L. Dupe, dan C. Kunjaya</i>	
Motorisasi Sistem Buka - Tutup Atap Gedung Surya Di Observatorium Bosscha	100
<i>A. Setiawan, dan D. Mandey</i>	
Analisis Teleskop <i>DIY</i> - PPKM sebagai media Praktikum di Laboratorium Bumi dan Antariksa	102
<i>C. P. Asmoro, H. Susanti, dan J. A. Utama</i>	
Sistem Panel Listrik Untuk Buka Tutup Atap Gedung Surya di Observatorium Bosscha.....	104
<i>M. Sulaeman</i>	
Pengembangan Sistem Pemantauan Kondisi <i>Seeing</i> Langit Malam di Observatorium Bosscha	106
<i>S. Ramadhan, M. Yusuf, dan C. J. B. Anin</i>	
Peran Sky Quality Meter LU-DL dalam Mengkaji Kecerahan Langit Malam di Kota Pontianak dan Kabupaten Mempawah	108
<i>Suraina</i>	

TEMA 4: Pendidikan Astronomi (Tinggi, Dasar, Publik) dalam Era Teknologi 4.0

Network for Astronomy School Education for Indonesian Teachers (2016-2021).....	111
<i>N. Pratiwi, H. L. Malasan, R. Muhtaba, R. W. Romadhonia, M. I. Ikhsan, D. M. Noor, E. R. Kencana, N. Resfita, A. Fitriawati, A. N. I. Putri, V. L. Ipmawan, E. Fitri, M. Dewi, C. Kunjaya, Aprilia, and E. Soegiartini</i>	
Menjembatani kemajuan pengetahuan sains dan pendidikan sains	114
<i>P. W. Premadi</i>	
Mendorong Penguasaan Astronomi di Jenjang Pendidikan Menengah melalui Olimpiade	118
<i>L. Puspitarini, Aprilia, H. L. Malasan, M. I. Hakim, M. I. Arifyanto, dan E. I. Akbar</i>	
Penggunaan Media Simulasi Visual untuk Mengurangi Miskonsepsi Siswa pada Materi Astronomi dalam Mata Pelajaran Geografi SMA	121
<i>M.P. Lestari dan H. Wulandari</i>	

TEMA 5: Keilmuan Multidisiplin terkait Astronomi

Cahaya Fajar Sidik di Indonesia, Suatu Tinjauan terhadap Riset Para Peneliti Ilmu Falak Berlatarbelakang Nahdlatul Ulama.....	124
<i>KH S. Nawawi, D. Fahrurrazi, KH A. M. Zahid, KH M. Hasan, HM Basthoni, I. Fahmi, E. P. Arumaningtyas, N. Rohmah, I. Qustholaani, R. Nugraha, S. Ahadi, KH A. Y. Fattah, KH Shofiyulloh, D. Effendi, Khafid, H. Setyanto, A. Junaidi, KH I. Ismail, M. Arkanuddin, S. Anam, dan M. M. Sudibyo</i>	
Konsistensi Kalender Hijriah Nahdlatul Ulama Periode 1438–1442 H (2016–2021 M) Berdasarkan Data Rukyat Hilal yang Dihimpun Lembaga Falakiyah Nahdlatul Ulama.....	129
<i>KH S. Wafa, M. M. Sudibyo, H. Setyanto, KH M. Hasan, KH Yahya, F. Muzakkin, KH Nursodik, U. Syahrana, A. Y. Nafi, Himaturrizza, J. Prasetyo, M. Arkanuddin, I. Fahmi, Mujayun, I. Hilmi, Hosen, H. Elhas, R. M. Lologau, A. Z. Zuhdi, KH K. Asmuni, A. P. Salma, A. Junaidi dan W. Ali</i>	
Tanda Tanda Alam Sebagai Pedoman Melaut Nelayan Bugis di Pulau Kramian.....	135
<i>Mudjijono</i>	
Peran Kosmologi Islam dalam Sains Modern	139
<i>K. F. Nurrahmah dan M. I. Arifyanto</i>	
Studi Arkeoastronomi Candi Sukuh dan Cetho, Jawa Tengah.....	143
<i>T. H. Pramono dan Aprilia</i>	
Jejak Suryacandra (<i>Lunisolar</i>) pada Dasawarsa Pertama Kalender Hijriah, Berdasarkan Peristiwa Langit dan Kondisi Cuaca dalam Beberapa Peristiwa Sejarah.....	147
<i>M. M. Sudibyo</i>	
ROWOT SASAK (Interpretasi Kultural Perbintangan Masyarakat Lombok).....	151
<i>M. Awaludin</i>	
Potensi Wilayah untuk Pengembangan Astrowisata di Kabupaten Bangka, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung	155
<i>F. Zainuddin dan C. Kunjaya</i>	

TEMA 6: Popularisasi, Komunikasi, & Public Outreach Astronomi

Kegiatan Observasi Langit Malam Komunitas Astronom Amatir se-Indonesia dalam Rangka Edukasi Astronomi kepada Masyarakat: Tinjauan Sebelum dan Saat Pandemi	158
<i>N. Kafilah, A. Faradila, M.Z.S. Mutaqin, dan T.N. Aminudin</i>	
Menjangkau Publik selama Pandemi: Pelajaran dan Potensi Baru Penjangkauan Publik Astronomi.....	162
<i>Y. Yulianty, P. W. Premadi, M. Yusuf, Luthfiandari, dan T. H. Pramono</i>	
Astronomi dalam Bungkus Media Sosial Sebagai Pemantik Budaya Bernalar	165
<i>Sulistiyowati, H. R. Erwanda, Luthfiandari, H. Albanna, dan D. S. Oktaviani</i>	
Aplikasi Sonifikasi sebagai Alternatif Aksesibilitas Citra Astronomi bagi Tuna Netra	169
<i>A. Deandra, M. Putra, M. I. Mandasari, C. Kunjaya, D. Herdiwijaya, dan Aprilia</i>	



TEMA 1:
**Matahari, Fisika Bintang, Tata Surya, &
Eksoplanet**

Manuver Eksentrisitas dalam Strategi *Station Keeping* Timur-Barat Satelit GEO (Studi Kasus: Indostar II/SES-7)

E. Fitri^{1*}, R. Eko Poetro¹, dan E. Soegiartini¹

¹Program Studi Astronomi Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: fitrielisa204@gmail.com

ABSTRAK

Posisi satelit *Geosynchronous Equatorial Orbit* (GEO) dapat bergeser dari posisi awalnya akibat gangguan gaya luar, yaitu tekanan radiasi Matahari dan potensial gravitasi ketidakbulatan Bumi. Kedua gangguan ini mengakibatkan satelit keluar dari batas kotak maya yang diperbolehkan. Untuk mengoreksi orbit satelit akibat gangguan gaya luar dan memastikan bahwa satelit tetap berada dalam kotak maya, diperlukan manuver koreksi orbit atau manuver *station keeping*. Manuver *station keeping* yang dikerjakan pada penelitian ini adalah manuver eksentrisitas. Satelit yang dijadikan studi kasus adalah Indostar II/SES-7 yang berada pada 108,25° BT dan metode yang digunakan adalah simulasi menggunakan perangkat lunak utama *General Mission Analysis Tool* (GMAT) dengan jangka waktu simulasi selama satu tahun. Simulasi dilakukan dengan 3 skenario, skenario 1 (nilai lingkaran kontrol sama dengan radius evolusi eksentrisitas), skenario 2 (nilai lingkaran kontrol 50% dari evolusi eksentrisitas), dan skenario 3 (nilai lingkaran kontrol 30% dari evolusi eksentrisitas). Variasi nilai lingkaran kontrol diperlukan jika stasiun satelit ingin mengontrol evolusi eksentrisitas secara ketat kedalam radius tertentu dan terkait dengan keperluan kolokasi. Urutan kebutuhan ΔV dari yang paling kecil adalah skenario 1, skenario 2, dan skenario 3. Semakin kecil lingkaran kontrol, semakin besar kebutuhan bahan bakar. Namun, jika ketiga skenario tersebut dibandingkan, maka skenario yang paling optimal merupakan skenario 2.

Kata Kunci: Indostar II/SES-7 - Lingkaran Kontrol - Manuver Eksentrisitas

1 PENDAHULUAN

Gangguan alam dapat menggeser posisi satelit GEO dari posisi nominalnya. Gangguan tersebut antara lain disebabkan oleh potensial gravitasi ketidakbulatan Bumi, gravitasi *lunisolar*, dan tekanan radiasi Matahari. Menurut peraturan *International Telecommunication Union* (ITU), satelit diperbolehkan bergeser sebesar kotak mayanya. Kotak maya merupakan sebuah kotak imajiner berukuran $\pm 0,1^\circ$ dalam arah timur-barat dan utara-selatan yang membatasi pergeseran satelit (Li, 2014). Peraturan ini bertujuan untuk menghindari tabrakan antarsatelit dan memastikan bahwa antena di Bumi tetap mengarah ke satelit, agar komunikasi antara satelit dan stasiun penerima dapat selalu berjalan dengan baik. *Station keeping* harus dilakukan dengan efisien agar bahan bakar satelit cukup untuk melakukan aktivitas selama masa operasinya, yaitu sekitar 15 tahun (Romero dkk, 2007).

Pada penelitian ini, diteliti pengaruh tekanan radiasi Matahari terhadap eksentrisitas satelit dan potensial gravitasi ketidakbulatan Bumi. Pengaruh dari gravitasi *lunisolar* belum diperhitungkan. Selanjutnya dilakukan simulasi manuver eksentrisitas untuk mengontrol eksentrisitas yang berubah akibat tekanan radiasi Matahari agar berada dalam lingkaran kontrol tertentu. Satelit yang dijadikan studi kasus adalah Indostar II/SES-7. Manuver eksentrisitas dilakukan bersamaan dengan

manuver bujur yang mengontrol bujur agar tidak keluar kotak maya. Untuk menentukan manuver yang efisien, dilakukan manuver dengan memvariasikan nilai lingkaran kontrol yang kemudian disebut sebagai skenario 1, skenario 2, dan skenario 3. Dari ketiga skenario tersebut, diharapkan besar dari lingkaran kontrol mempengaruhi penggunaan bahan bakar satelit, sehingga bisa ditentukan skenario yang efisien atau hemat bahan bakar. Bagian selanjutnya, dijelaskan mengenai landasan teori, langkah kerja yang dilakukan, hasil yang didapat dan analisis.

2 LANDASAN TEORI

Satelit GEO merupakan satelit yang orbitnya berada pada GEO (*Geosynchronous Equatorial Orbit*). Orbit satelit GEO ideal berhimpit dengan ekuator Bumi dan periode orbitnya dalam mengelilingi Bumi sama dengan periode rotasi Bumi. Satelit GEO dimanfaatkan sebagai *relay* komunikasi.

Gangguan pada GEO berasal dari gaya luar. Gangguan ini mengubah elemen-elemen orbit satelit sehingga menggeser posisi orbit satelit dari posisi GEO ideal. Berikut merupakan gangguan luar pada satelit GEO (Kleanthis, 2007), yaitu (1) gangguan akibat variasi dari gravitasi Bumi yang menyebabkan pergeseran bujur (2) Gangguan akibat benda ketiga yang berukuran besar, yaitu Bulan dan Matahari (*lunisolar*) yang menyebabkan perubahan inklinasi (3) Gangguan akibat tekanan radiasi Matahari yang menyebabkan perubahan eksentrisitas

yang selanjutnya berdampak terhadap osilasi bujur harian. Untuk satelit Indostar II yang berada pada bujur 108,25° BT mengalami pergeseran bujur ke arah barat.

Manuver *station keeping* merupakan serangkaian proses untuk mengoreksi orbit satelit geostasioner dengan menggunakan sistem propulsi satelit. Manuver dilakukan dengan cara memberikan tambahan atau pengurangan kecepatan sebesar ΔV . Semakin kecil kotak maya satelit, semakin sulit untuk melakukan *station keeping* (Beroual dkk., 2015). *Station keeping* dilakukan pada dua arah, yaitu timur-barat (*station keeping* timur-barat) dan utara-selatan (*station keeping* utara-selatan), sesuai dengan arah pergeseran orbit satelit.

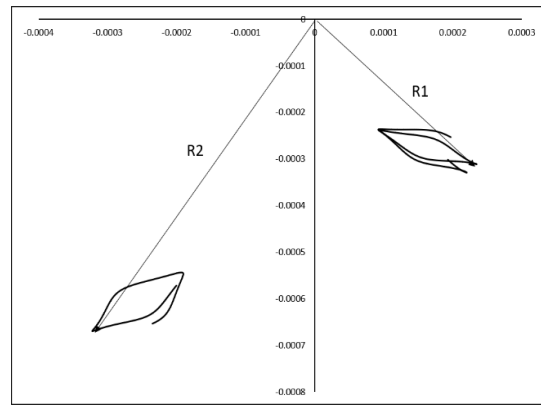
Setiap manuver mempunyai strategi masing-masing. *Station keeping* timur-barat bertujuan untuk mengoreksi bujur (manuver koreksi bujur) dan dilakukan dengan teknik *drift symmetry*. Manuver eksentrisitas bertujuan untuk mengoreksi eksentrisitas. Terdapat dua strategi untuk melakukan manuver eksentrisitas, yaitu *sun-pointing perigee* dan *solar-lagged target*. *Sun-pointing perigee* dilakukan dengan mengarahkan perigee satelit ke arah Matahari. Sedangkan *solar-lagged target* dilakukan dengan membiarkan vektor eksentrisitas untuk mendahului Matahari sebesar sudut tertentu, setelah itu dilakukan manuver. Kelebihannya, *solar-lagged target* dapat digunakan jika radius evolusi eksentrisitas lebih besar dari radius lingkaran kontrol.

Selain itu, terdapat jenis manuver berdasarkan waktu kontrol, yaitu *single maneuver*, *double maneuver*, dan *triple maneuver*. *Single maneuver* dapat dilakukan jika radius kontrol hampir sama dengan radius evolusi alami eksentrisitas. Sedangkan *double maneuver* dan *triple maneuver* dilakukan jika radius kontrol lebih kecil dibandingkan radius evolusi alami eksentrisitas.

3 LANGKAH KERJA

Data dalam penelitian ini berbentuk *Two Line Element* (TLE). TLE merupakan dua baris data yang berisi informasi mengenai satelit, seperti epoch dan elemen orbit satelit. TLE dapat diunduh pada halaman <https://www.space-track.org>.

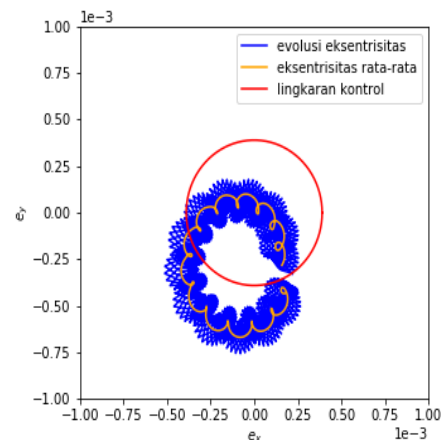
Perangkat lunak utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah *General Mission Analysis Tool* (GMAT) versi R2018a. GMAT merupakan perangkat lunak analisis dan desain orbit yang diluncurkan oleh NASA dan beberapa lembaga antariksa lainnya. Input dan keluaran pada GMAT dapat berupa elemen orbit, epoch, lintang, dan bujur



Gambar 1. Vektor eksentrisitas R1 dan R2

satelit. Sebelum melakukan simulasi, GMAT divalidasi terlebih dahulu dengan cara membandingkan data keluaran GMAT dengan data yang didapat oleh salah seorang operator satelit SES-7. Hasilnya, galat relatif kedua data kurang dari 1%. Langkah kerja singkat dari penelitian ini, yaitu melakukan konversi data TLE menjadi elemen-elemen orbit, mempropagasikan orbit selama satu tahun mengetahui karakteristik gerak satelit secara alami atau tanpa manuver *station keeping*, menentukan skenario manuver eksentrisitas dan melakukan simulasi manuver eksentrisitas. Berikut merupakan langkah kerja singkat dari penelitian ini.

1. *Menentukan pengaruh Tekanan Radiasi Matahari terhadap Evolusi Eksentrisitas.* Eksentrisitas dengan tekanan radiasi Matahari membentuk elips atau mendekati lingkaran dengan radius 0,00039. Pola ini terbentuk mengikuti orbit Bumi mengelilingi Matahari dalam waktu satu tahun. Sedangkan evolusi eksentrisitas tanpa tekanan radiasi Matahar tidak mengalami gangguan jangka panjang oleh tekanan radiasi, sehingga cenderung menumpuk pada satu nilai dan tidak membentuk pola elips.

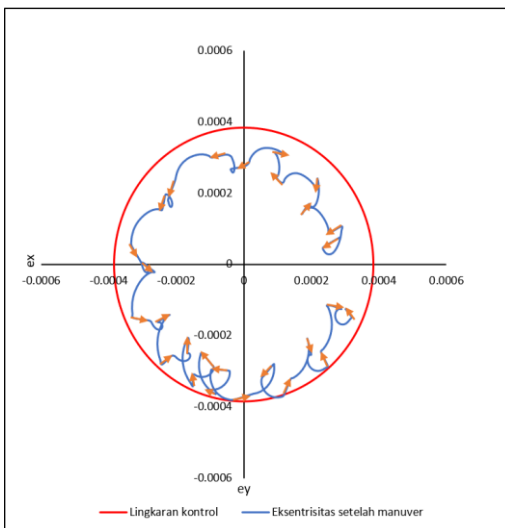


Gambar 2. Eksentrisitas keluar lingkaran

2. *Menganalisis evolusi bujur dan eksentrisitas secara alami.* Untuk mengetahui evolusi, dilakukan propagasi selama satu tahun. Arah pergeseran bujur satelit adalah ke arah barat. Dalam satu tahun, satelit yang awalnya berada pada bujur 108, 25° BT mengalami pergeseran ke sekitar bujur 40° BT. Sedangkan untuk evolusi eksentrisitas, awalnya eksentrisitas berada di dalam lingkaran kontrol, namun setelah beberapa bulan, eksentrisitas sudah keluar dari lingkaran kontrol seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2. Oleh karena itu, diperlukan manuver eksentrisitas untuk mengembalikan eksentrisitas ke dalam lingkaran kontrol.
3. *Menentukan pengaruh Eksentrisitas terhadap Osilasi Bujur Harian.* Untuk mengetahui pengaruh eksentrisitas terhadap osilasi bujur harian, ditinjau dua vektor eksentrisitas yang memiliki besar dan arah yang berbeda seperti Gambar 1 dan didapatkan bahwa semakin besar eksentrisitas, semakin besar juga osilasi bujur harian.
4. *Penentuan Skenario.* Romero dkk., 2007 melakukan simulasi manuver timur-barat dengan memvariasikan radius lingkaran kontrol. Oleh karena itu pada penelitian ini ditetapkan tiga skenario yaitu berdasarkan radius lingkaran kontrol yaitu 0,000393 (skenario 1), 0,000195 (skenario 2), dan 0,000117 (skenario 3).

4 HASIL DAN ANALISIS

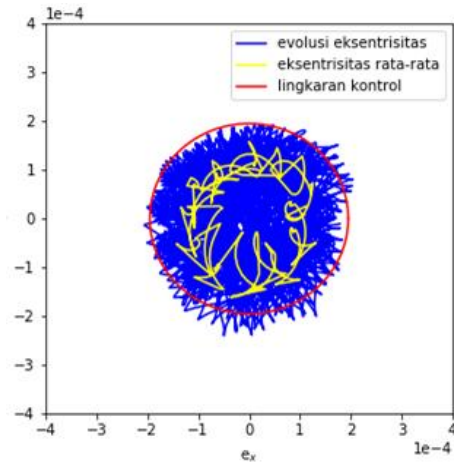
Hasil simulasi dari masing-masing skenario ditampilkan pada bagian ini.



Gambar 3. Evolusi eksentrisitas skenario 1

1. *Skenario 1.* Manuver dilakukan dengan *single maneuver* dan strategi *sun pointing perigee*.

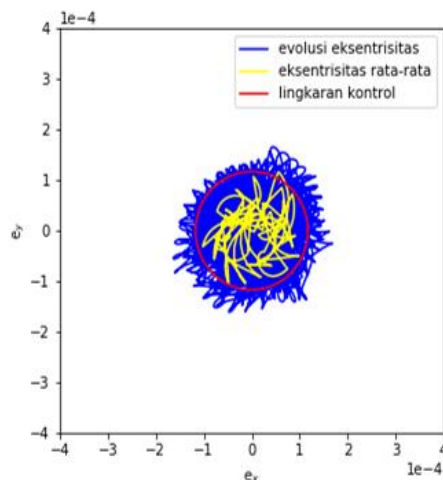
Eksentrisitas berhasil dikontrol dalam lingkaran kontrol seperti yang disajikan pada Gambar 3.



Gambar 4. Evolusi eksentrisitas skenario 2.

Pada dasarnya, besarnya eksentrisitas cenderung tidak berubah, karena ΔV manuver hanya bergantung kepada ΔV_d (tambahan kecepatan manuver bujur). Nilai ΔV_d terlalu kecil untuk mengubah radius eksentrisitas. Namun, dipilih waktu manuver yang sesuai agar pergerakan evolusi eksentrisitas tetap mengikuti lingkaran kontrol setelah manuver dilakukan. ΔV total untuk skenario 1 adalah 2,0169 m/s. Sedangkan osilasi bujur harian adalah 0,0609°/hari.

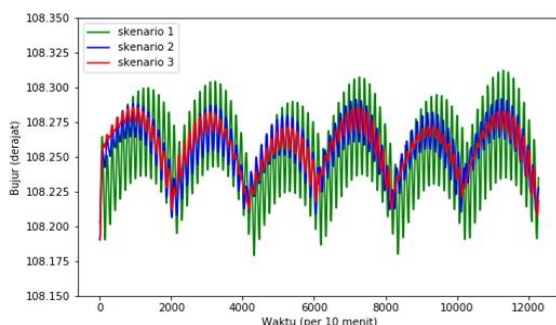
2. *Skenario 2.* Skenario 2 dilakukan dengan *double maneuver* dan *solar-lagged target*. Nilai radius eksentrisitas yang kecil membuat osilasi bujur harian juga kecil, sehingga pergerakan satelit dalam kotak maya dalam arah bujur juga semakin kecil. Eksentrisitas sudah berada di dalam lingkaran kontrol seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. Total ΔV selama satu tahun adalah 3,016297 m/s dan terdapat kecenderungan waktu



Gambar 5. Evolusi eksentrisitas skenario 3.

untuk melakukan manuver, yaitu pukul 12:00 - 13:30 dan pukul 19:00 - 21:00 waktu lokal satelit. Manuver yang dilakukan pada rentang waktu ini dapat menjaga arah pergerakan vektor eksentrisitas tetap berada di dalam lingkaran kontrol. Osilasi bujur harian skenario 2 adalah $0,033^\circ/\text{hari}$.

3. *Skenario 3.* Skenario 3 dilakukan dengan *double maneuver* dan *solar-lagged target*. Hasil evolusi eksentrisitas dapat dilihat pada Gambar 5. Selama satu tahun, total ΔV yang dibutuhkan untuk 26 kali manuver adalah 3,8796 m/s. Waktu untuk melakukan manuver berkisar pada pukul 12:00 - 14:30 dan 18:00 - 21:00 waktu lokal satelit. Sedangkan osilasi bujur harian adalah $0,03^\circ/\text{hari}$.
4. *Perbandingan bujur ketiga skenario.* Merujuk kepada Gambar 6, dapat dilihat bahwa osilasi bujur harian semakin kecil dengan mengecilnya radius lingkaran kontrol.



Gambar 6. Perbandingan bujur ketiga skenario dalam waktu 3 bulan.

5 DISKUSI DAN KESIMPULAN

Skenario 1 dapat digunakan jika satelit tidak berkolokasi dengan satelit yang lain, karena bujur masih dapat dikontrol dalam kotak maya berukuran $\pm 0,1^\circ$ dengan nilai lingkaran kontrol 0,00039 tersebut. Sedangkan skenario 2 dan skenario 3,

memiliki ΔV lebih besar dari skenario 1, namun radius eksentrisitas dapat dikontrol secara ketat ke dalam suatu radius tertentu.

Skenario ini digunakan jika ada kolokasi dengan satelit lain. Osilasi bujur harian skenario 2 dan 3 hanya berbeda sekitar $0,03^\circ/\text{hari}$, padahal perbedaan radius lingkaran kontrol kedua skenario tersebut cukup besar. Hal ini disebabkan oleh osilasi eksentrisitas harian skenario 3 melebihi diameter lingkaran kontrolnya pada waktu tertentu, sehingga sulit untuk mengontrol eksentrisitas agar tetap berada di dalam lingkaran kontrol. Meninjau skenario 2 dan skenario 3 serta osilasi eksentrisitas harian dan osilasi bujur harian satelit, lebih menguntungkan untuk melakukan skenario 2 dibandingkan dengan skenario 3 dilihat dari kebutuhan ΔV dan kesulitan pengontrolan. Radius lingkaran kontrol yang optimum tentu saja berada di antara skenario 2 dan 3 dan perlu untuk diteliti lebih lanjut.

Ucapan Terima Kasih

Kami menyampaikan terima kasih kepada Qun Riadhy Arisyatmaja, S.T selaku operator satelit SES-7 atas saran dan diskusi selama pengerjaan Tesis.

6 PUSTAKA

- Beroual, L., Benatia, D., dan Hedjazi, H. 2015. High Thrust Station Keeping Maneuvers for Geostationary Satellites. 8. hlm. 401–414.
- Neokleous, Kleanthis. 2007. Modeling and control of a satellite's geostationary orbit. Tesis Master. Luleå University of Technology.
- Romero, P., Gambi, J. M., Patiño, E. (2007). Stationkeeping manoeuvres for geostationary satellites using feedback control techniques. Aerospace Science and Technology, 11(2–3), 229–237. <https://doi.org/10.1016/j.ast.2006.08.003>.
- Li, H. 2014. Geostationary Satellites Collocation. Springer: New York

Analisis Korelasi Antara *Sunspot Number* pada Siklus Matahari ke-24 dengan Indeks Dst Berdasarkan Data Pengamatan BPAA Pasuruan

A. F. N. Cahyaningtyas^{1*} dan S. Filawati²

¹Program Magister Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

²BPAA Pasuruan, Pasuruan, Indonesia

*E-mail: firdausyaam@gmail.com

ABSTRAK

Sunspot merupakan parameter untuk menggambarkan Siklus Matahari. Mempelajari Siklus Matahari diperlukan untuk melakukan prediksi terhadap aktivitas Matahari yang memiliki dampak terhadap Bumi secara langsung, yaitu *flare* dan *Coronal Mass Ejection* (CME), yang mana kedua gangguan tersebut merupakan parameter cuaca antariksa. Indeks Dst adalah indeks aktivitas magnetik atau gangguan geomagnet yang diukur di zona lintang rendah (dekat ekuator), yang digunakan untuk mengkarakterisasi besarnya gangguan geomagnet. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis korelasi antara sunspot number dengan indeks Dst untuk siklus Matahari ke-24. Guna mendapatkan korelasi antara kedua variabel tersebut, dilakukan analisis korelasi dan regresi. Analisis korelasi menyatakan bahwa R-sunspot dan indeks Dst berbanding terbalik, yaitu indeks Dst semakin menurun Ketika nilai R-sunspot meningkat. Serta hasil analisis regresi R-sunspot dengan indeks Dst menunjukkan bahwa R-sunspot bukanlah penyebab utama terjadinya gangguan geomagnet.

Kata Kunci: *Sunspot – Indeks Dst – Cuaca Antariksa*

1 PENDAHULUAN

Sunspot merupakan daerah dengan konsentrasi medan magnet yang kuat di fotosfer Matahari yang memiliki polaritas ganda (bipolar). *Sunspot* tampak gelap dalam citra visual karena temperaturnya yang rendah akibat konveksi bertekanan di daerah plasma termagnetisasi yang mengarah ke fluks energi lebih rendah menuju *sunspot* (Eren et al., 2017). *Sunspot* merupakan fenomena transien dengan masa hidup yang bervariasi dari beberapa hari hingga beberapa pekan atau bahkan beberapa bulan. Kemunculan *sunspot* berkaitan erat dengan keberadaan daerah aktif di fotosfer Matahari, dan evolusinya tidak lain merupakan evolusi energi dari daerah aktif itu sendiri. Oleh karena itu, mengetahui banyaknya *sunspot* yang muncul dalam periode waktu tertentu merupakan bagian dari pemantauan aktivitas Matahari. *Sunspot* tidak hanya muncul secara individual, tetapi juga secara komunal, yaitu beberapa sunspot muncul berdekatan membentuk sebuah grup *sunspot*. *Sunspot number* atau bilangan sunspot adalah jumlah *sunspot* yang diamati, dikuantisasi menggunakan persamaan R-Sunspot yang berkaitan dengan jumlah *sunspot* individu dan grup *sunspot*, serta dipengaruhi oleh faktor akurasi pengamat.

Evolusi *sunspot* dapat diketahui dengan mengamati adanya perubahan bentuk, struktur, serta ukurannya dari waktu ke waktu yang dapat dijelaskan dalam konteks evolusi daerah aktif. Karena evolusi *sunspot* menggambarkan keadaan aktivitas Matahari, oleh karena itu *Sunspot* merupakan parameter untuk menggambarkan Siklus

Matahari, yang merupakan dinamika perilaku Matahari akibat proses pembalikan kutub medan magnet, yang terjadi secara periodik setiap 11 tahun. Penelitian terhadap *sunspot* dalam periode waktu yang cukup lama dapat digunakan untuk mengamati variasi dinamika aktivitas Matahari.

Karena aktivitas Matahari mempengaruhi kondisi ruang angkasa antara Bumi dengan Matahari atau disebut juga sebagai cuaca antariksa, studi terhadap siklus Matahari diperlukan untuk melakukan prediksi aktivitas Matahari yang memiliki dampak terhadap Bumi secara langsung, yaitu *flare* dan *Coronal Mass Ejection* (CME). Kedua peristiwa tersebut merupakan faktor yang memiliki pengaruh krusial pada cuaca antariksa.

CME adalah proses pelontaran plasma dan medan magnetik dalam jumlah besar yang berasal dari korona Matahari. Melalui proses ini, miliaran ton material korona Matahari serta medan magnet yang lebih kuat dari medan magnet antarplanet atau *Interplanetary Magnetic Field* (IMF), dilontarkan menuju ruang antarplanet dengan kecepatan maksimal hingga mencapai 3000 km/s (“Coronal Mass Ejections”, n.d). Berdasarkan keterangan Space Weather Prediction Center NOAA (n.d.), sebagian besar CME terbentuk di daerah aktif (*active region*) pada permukaan Matahari, di sekitar *sunspot* yang mana daerah tersebut memiliki medan magnet kuat. Kemunculan CME sering dijumpai selama fase maksimum siklus Matahari, karena pada saat itu jumlah kejadian *sunspot* mencapai puncaknya.

CME yang mampu mencapai Bumi, kemungkinan besar menyebabkan badai geomagnet yang sangat intens, terutama apabila diikuti dengan

IMF yang orientasinya searah. Menurut Space Weather Prediction Center NOAA (n.d.), badai geomagnet adalah gangguan magnetosfer Bumi yang terjadi karena adanya pertukaran energi efisien dari angin Matahari menuju lingkungan ruang angkasa dekat Bumi. Badai ini dapat menghasilkan arus listrik kuat di magnetosfer, pemanasan ionosfer dan daerah atmosfer atas atau termosfer, serta arus cincin yang bergerak dari timur ke barat di sekitar Bumi yang menghasilkan gangguan magnetik di permukaan Bumi. Badai geomagnetik memiliki dampak terhadap Bumi dan ruang angkasa sekitarnya, antara lain menyebabkan drag satelit pada orbit *low-Earth*, mengganggu sistem navigasi seperti GNSS, dan menghasilkan *Geomagnetic Induced Currents* (GICs) pada *power grid* dan saluran pipa. Besar gangguan magnetik diukur menggunakan satuan indeks Dst (*disturbance storm index*).

Indeks Dst adalah indeks aktivitas magnetik atau gangguan geomagnet yang diukur di zona lintang rendah atau dekat ekuator. Indeks Dst merupakan indeks rata-rata komponen H medan magnet yang diamati dari empat stasiun pengamatan di zona lintang rendah, antara lain Hermanus, Kakioka, Honolulu, dan San Juan (Berthelier, 1991). Secara historis, indeks Dst digunakan untuk mengkarakterisasi ukuran badai geomagnetik.

Karena sunspot yang berukuran besar dan kompleks adalah penghasil *flare* kuat, yang mana merupakan pemicu terjadinya CME, serta fakta bahwa CME adalah salah satu penyebab terjadinya badai geomagnet, maka dapat disimpulkan bahwa pengamatan sunspot secara berkala dapat digunakan sebagai alat untuk memprakirakan kejadian badai geomagnet (Kilcik et al., 2017). Berdasarkan latar belakang masalah yang telah dijabarkan, dirumuskan tujuan dalam penelitian ini, yaitu menganalisis korelasi antara sunspot number dengan indeks Dst untuk siklus Matahari ke-24.

2 DATA DAN METODE

2.1 Data Sunspot dan Indeks Dst

Dalam penelitian ini, data sunspot yang digunakan berasal dari pengamatan Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer (BPAA) Pasuruan selama siklus Matahari ke-24 mulai Desember 2008 hingga Desember 2019. BPAA Pasuruan adalah balai pengamatan antariksa dan atmosfer yang bekerja di bawah instansi Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) yang melakukan pengamatan sunspot sejak tahun 1986. Sedangkan data indeks Dst selama kurun waktu tersebut diperoleh dari OMNIWeb NASA yang diakses melalui laman:

<https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>.

2.2 Metode

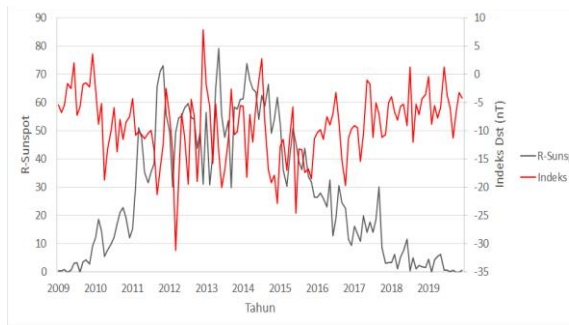
Untuk melakukan analisis lebih lanjut mengenai korelasi antara *sunspot* dengan indeks Dst, langkah pertama yang dilakukan adalah menghitung bilangan *sunspot* rata-rata bulanan. Data bilangan *sunspot* harian yang diperoleh, dihitung menggunakan persamaan R-Sunspot:

$$R = 0,62(10g + f) \quad (1)$$

Persamaan (1) disebut sebagai persamaan Wolf Number. Konstanta 0,62 berkaitan dengan akurasi pengamatan sunspot pada lokasi pengamatan tersebut, sehingga nilainya bisa berbeda untuk setiap lokasi pengamatan. g adalah jumlah grup *sunspot*, dan f adalah jumlah seluruh *sunspot* individu yang teramati. Selanjutnya, menghitung indeks Dst rata-rata bulanan. Setelah data rerata bulanan diperoleh, dibuatlah plot korelasi dan regresi untuk mendapatkan nilai parameter yang kemudian dianalisis untuk mendapatkan hasil korelasi hubungan antara kedua variabel tersebut. Variabel R-Sunspot dan indeks Dst memiliki sifat yang berbanding terbalik; nilai R-Sunspot yang semakin positif berarti bahwa jumlah bilangan *sunspot* semakin banyak, sedangkan nilai indeks Dst yang semakin negatif berarti bahwa skala gangguan geomagnet semakin besar.

3 HASIL DAN ANALISIS

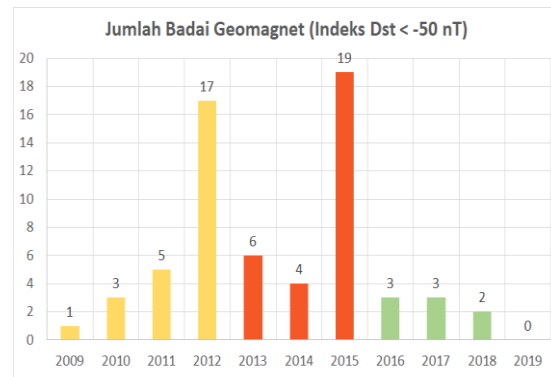
Gambar 1 menunjukkan R-sunspot (garis hitam) rata-rata bulan selama siklus matahari ke-24 dan indeks Dst. R-sunspot mencapai kenaikan yang signifikan pada tahun 2011 dengan pola yang terus naik hingga tahun 2015. Pola R-sunspot menunjukkan penurunan hingga mengalami nilai minimum pada 2018 dan 2019. Indeks Dst (merah) menunjukkan nilai ± 5 nT pada 2009 dan 2010 dan mengalami penurunan dari 2011 hingga 2017, sedangkan pada 2018 hingga 2019 indeks Dst mengalami peningkatan. Penurunan indeks Dst menandakan semakin besar badai geomagnet yang terjadi. Berdasarkan penjelasan tersebut, dapat disimpulkan bahwa pola indeks Dst berbanding terbalik dengan pola R-sunspot, yaitu saat R-sunspot naik banyak terjadi badai geomagnet dan sebaliknya. Gambar 2 menunjukkan jumlah badai geomagnet dengan indeks Dst < -50 nT selama siklus matahari ke-24 dari pengamatan bintik matahari BPAA Pasuruan. Gambar 2 memperjelas pola indeks Dst terhadap kondisi R-sunspot, yaitu jumlah badai geomagnet dengan indeks Dst < -50 nT paling



Gambar 1. Data R-sunspot siklus matahari ke-24 dan indeks Dst

banyak terjadi satu tahun setelah puncak R-sunspot, yaitu pada tahun 2015. Hasil yang sama juga ditunjukkan oleh penelitian (Klicik, et al., 2017) yang menyatakan bahwa nilai maksimum indeks geomagnet (indeks Dst dan indeks Ap) terjadi satu tahun setelah nilai maksimum *sunspot* yang berukuran besar.

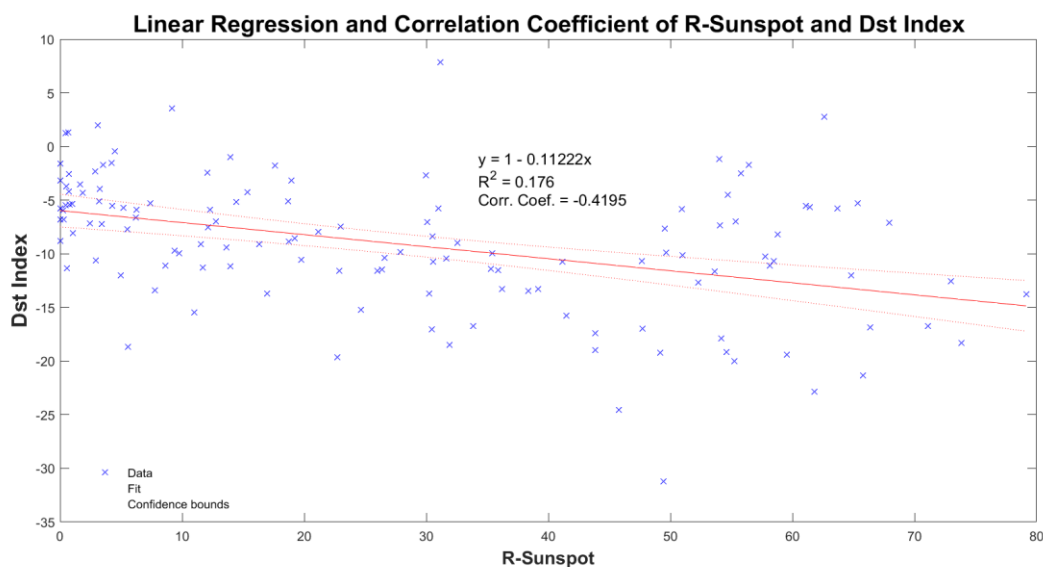
Perbedaan nilai maksimum R-sunspot dan indeks Dst secara fisis dapat dijelaskan yaitu, saat fase turun siklus matahari, lubang korona terbentuk dengan ukuran lebih besar dibanding dengan saat fase maksimum matahari (Xu et al., 2009). Lubang korona menyebabkan *High Spread Stream* (HSS) yang dapat menekan dan mempercepat angin matahari sehingga menimbulkan *Coronal Interaction Region* (CIR) di wilayah antarplanet. HSS dan CIR dapat menyebabkan badai geomagnet kuat ($-200 \text{ nT} < \text{indeks Dst} < -100 \text{ nT}$) (Filawati, 2016), (Xu et al., 2009). Hal ini juga merupakan faktor yang berperan dalam peningkatan jumlah kejadian badai geomagnet seperti yang ditunjukkan



Gambar 2. Badai Geomagnet dengan Indeks Dst < -50 nT.

oleh Gambar 2. Namun, pengaruh lubang korona terhadap badai geomagnet perlu penelitian lebih lanjut.

Gambar 3 menunjukkan hubungan antara R-sunspot dan indeks Dst. Dalam penelitian ini, R-sunspot diasumsikan sebagai penyebab terjadinya gangguan geomagnet yang diindikasikan oleh indeks Dst. Sehingga R-sunspot merupakan variabel *independent* (sumbu-x) dan indeks Dst adalah variabel *dependent* (sumbu-y). Hasil regresi linear menunjukkan nilai $y = 1 - 0,11222x$ dan koefisien korelasi adalah $-0,4195$. Nilai gradien dan koefisien korelasi negatif yang berarti bahwa hubungan R-sunspot dan indeks Dst berbanding terbalik, yaitu jika R-sunspot tinggi maka indeks Dst rendah, semakin rendah indeks Dst artinya badai geomagnet semakin besar. Penelitian (Klicik, et al., 2017) menggunakan data R-sunspot bulanan dari NGDC (National Geophysical Data Center) tahun Januari 1996 hingga Maret 2014 menghasilkan



Gambar 3. Korelasi R-sunspot dan Indeks Dst

koefisien korelasi negatif dengan nilai yang hampir sama yaitu $-0,43 \pm 0,11$.

Koefisien determinasi (R^2) merupakan nilai yang menginterpretasikan pengaruh R-sunspot terhadap indeks Dst. Semakin mendekati nilai satu maka pengaruhnya semakin kuat. Gambar 3 menunjukkan nilai koefisien determinasi adalah 0,176 yang artinya R-sunspot mempengaruhi indeks Dst sebesar 17,6 % sehingga R-sunspot bukan penyebab utama terjadinya gangguan geomagnet. Indeks Dst akan mengalami penurunan atau badai jika dipicu oleh CME dengan kecepatan yang tinggi ~ 1600 km/s (Srivastava et al., 2002), filamen (Cliver, et al., 2009), dan sebelum lubang korona (Gopalswamy, 2008). CME bisa dipicu oleh *flare* (Srivastava et al., 2002). Sedangkan *flare* berkorelasi secara signifikan dengan bintik matahari.

4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa pola indeks Dst selama siklus Matahari ke-24 berbanding terbalik dengan pola R-sunspot, yaitu indeks Dst menurun di puncak siklus (sekitar 2012-2015). Badai geomagnet berkekuatan sedang hingga besar banyak terjadi pada saat R-sunspot mencapai nilai yang tinggi, yaitu pada pertengahan siklus. Hasil analisis regresi R-sunspot dengan indeks Dst menghasilkan koefisien determinasi 0,176 yang menunjukkan bahwa R-sunspot bukanlah penyebab utama terjadinya gangguan geomagnet. Serta analisis korelasi menghasilkan koefisien korelasi $-0,4195$ yang menyatakan bahwa R-sunspot dan indeks Dst memiliki hubungan berbanding terbalik, yaitu ketika nilai R-sunspot meningkat nilai indeks Dst semakin menurun yang artinya terjadi gangguan geomagnet yang semakin besar.

5 PUSTAKA

Berthelier, Annick, Menvielle Michel, 1991. Dst Index, <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/>

<dstdir/dst2/onDstindex.html>; diakses 28 Desember 2021.

- Cliver E. W., Balasubramaniam K. S., Nitta N. V., and Li X. (2009). *Great Geomagnetic Storm of 9 November 1991: Association With a Disappearing Solar Filament*, *J. Geophysical Research*, 114, A00A20. DOI: 10.1029/2008JA013232.
- Eren, S., Kilcik, A., et al. (2017). Flare-Production Potential Associated with Different Sunspot Groups. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 465, 65-75.
- Filawati, Siska. (2016). Korelasi Antara Bilangan Sunspot dengan Banyaknya Kejadian Badai Geomagnet. *Majalah Sains dan Teknologi Dirgantara*, 11, 31-42.
- Gopalswamy N. (2008). Solar Connections of Geoeffective Magnetic Structures, *Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics*, 70, 2078-2100.
- Klicik, A., Yigit, E., Yurchyshyn, V., Ozguc, A., Rozelot, J.P. (2017). Solar and Geomagnetic Activity Relation for the Last two Solar Cycles. *Sun and Geosphere*, 12, 31-39.
- Lakhina, G. S., Alex, S., Mukherjee, S. & Vichare, G. (2006). On magnetic storms and substorms. Goa, ILWS WORKSHOP 2006.
- Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration. (N.D.). *Coronal Mass Ejections*, <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/coronal-mass-ejections>; diakses 5 November 2021.
- Space Weather Prediction Center National Oceanic and Atmospheric Administration. (N.D.). *Geomagnetic Storms*, <https://www.swpc.noaa.gov/phenomena/geomagnetic-storms>; diakses 28 Desember 2021.
- Srivastava Nandita and Venkatakrishnan P. (2002). Relationship Between CME Speed and Geomagnetic Storm Intensity. *Geophysical Research Letters*, 2(9), 1287.
- Xu D., Chen T., Zhang X.X., and Liu Z. (2009). Statistical Relationship Between Solar Wind Conditions and Geomagnetic Storms in 1998-2008. *Planetary and Space Science*, 57, 1500-1513.

Telaah Lintasan Harian Matahari dengan Gnomon Tegak di Kabupaten Ngawi

D. R. Saffira^{1*} dan E. Soegiartini¹

¹Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: dheasaffira98@gmail.com

ABSTRAK

Gnomon merupakan instrumen kuno astronomi untuk menentukan tinggi Matahari. *Gnomon* membentuk bayangan ketika terkena sinar Matahari. Bayangan *gnomon* sepanjang hari memproyeksikan lintasan harian yang ditempuh Matahari di langit dan lintasan tersebut berbeda untuk setiap hari. Penelitian ini menelaah lintasan harian Matahari dalam kurun waktu 29 Juli 2020 hingga 25 Juli 2021 di Kabupaten Ngawi pada koordinat $7^{\circ}24'07''$ LS, $111^{\circ}27'48''$ BT, dan ketinggian 166 mdpl. Digunakan 8 alat peraga yang tersusun dari papan datar berbahan eternit, *gnomon* berbahan plastik yang berdiri tegak menunjuk zenith, dan selambar kertas pengamatan yang dipasang semi-permanen di atas papan datar. Pengamatan bayangan *gnomon* dilakukan dalam rentang pukul 08.00 WIB – 15.00 WIB. Titik-titik ujung bayangan *gnomon* ditandai setiap 30 menit pada kertas pengamatan. Kertas pengamatan yang berisi rekaman titik-titik tersebut diambil setelah beberapa hari pengamatan, kemudian dipindai. Perangkat lunak pengolah citra astronomi yang digunakan adalah IRIS untuk menentukan posisi titik-titik ujung bayangan *gnomon* yang terekam di kertas pengamatan dalam satuan piksel. Data posisi tersebut kemudian diolah dengan Microsoft Excel dan Python untuk menghasilkan kurva posisi ujung bayangan *gnomon*, kami peroleh kurva untuk 77 pengamatan dalam rentang waktu di atas.

Kata Kunci: *Gnomon* – IRIS – Matahari

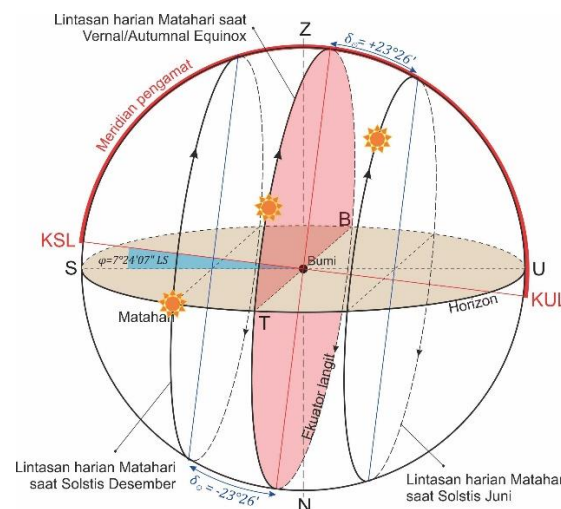
1 PENDAHULUAN

Gnomon adalah sebuah instrumen astronomi berupa tonggak vertikal yang bayangannya digunakan sebagai penanda waktu berdasarkan ketinggian Matahari di langit. Istilah *gnomon* berasal dari kata dalam Bahasa Yunani *γνομων*, yang berarti ‘penunjuk’.

Sejauh ini, studi tentang *gnomon* yang dimuat dalam buku rujukan, banyak dilakukan di negara lintang tinggi seperti Seattle (Evans, 1998) dan Prancis (Savoie, 2009). Wilayah Negara Indonesia berada di sekitar ekuator, merentang dari 6° LU – 11° LS. Tidak banyak literatur/publikasi mengenai pengamatan *gnomon* yang dilakukan di sekitar ekuator. Kami ingin mengetahui dan mempelajari lintasan harian Matahari yang diproyeksikan oleh bayangan *gnomon* di wilayah Indonesia. Secara khusus, penelitian dilakukan di Kabupaten Ngawi yang terletak di Provinsi Jawa Timur, tepatnya pada koordinat $7^{\circ}24'07''$ LS, $111^{\circ}27'48''$ BT, 166 mdpl.

2 LANDASAN TEORI

Bayangan dari *gnomon* di atas tanah, memiliki panjang ‘tak hingga’ saat Matahari terbit. Semakin tinggi Matahari di langit, bayangan tersebut semakin pendek. Ketika Matahari mencapai posisi tertinggi di langit (transit), bayangan yang terbentuk adalah bayangan terpendek. Selanjutnya, ketinggian Matahari menurun, bayangan kembali memanjang dan menjadi ‘tak hingga’ saat Matahari terbenam (Savoie, 2009). Fenomena ini terjadi setiap hari, sebagai efek dari gerak semu harian Matahari.



Gambar 1. Ilustrasi bola langit untuk pengamat di Kabupaten Ngawi. U, T, S, dan B berturut-turut adalah notasi untuk empat titik kardinal utara, timur, selatan, dan barat. Z dan N berturut-turut merupakan notasi untuk *zenith* dan *nadir*. KSL dan KUL berturut-turut merupakan notasi untuk kutub-kutub langit: Kutub Selatan Langit dan Kutub Utara Langit. Bidang ekuator langit tegak lurus dengan garis penghubung kutub-kutub, digambarkan dengan lingkaran berwarna merah muda. Lintasan harian Matahari digambarkan dengan lingkaran-lingkaran kecil yang sejajar dengan ekuator langit.

Jika diperhatikan dalam jangka waktu yang lebih panjang, lintasan ujung bayangan *gnomon* dalam satu hari terlihat seperti garis lurus saat peristiwa ekuinoks, dan seperti garis lengkung saat peristiwa solstices (Savoie, 2009). Lintasan ujung bayangan

gnomon melengkung ke arah selatan saat *winter solstice*, sebaliknya melengkung ke arah utara saat *summer solstice*. Fenomena ini merupakan efek dari gerak semu tahunan Matahari.

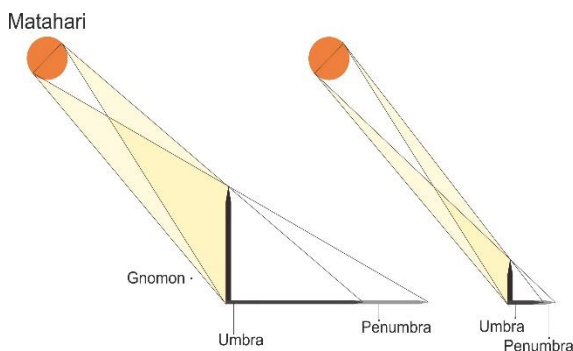
2.1 Lintasan Harian Matahari

Posisi Matahari di langit akan lebih mudah dibayangkan jika digambarkan pada bola langit (Gambar 1). Seberapa jauh Matahari dari ekuator langit dinyatakan dengan deklinasi Matahari ($\delta_{\odot}$) yang nilainya bervariasi dalam rentang $-23^{\circ}26' \leq \delta_{\odot} \leq +23^{\circ}26'$. Jika $\delta_{\odot}$ bernilai negatif, lintasan harian Matahari berada di selatan ekuator langit. Sebaliknya jika positif, lintasan harian Matahari berada di utara ekuator langit. Lintasan harian Matahari berimpit dengan ekuator langit jika $\delta_{\odot} = 0^{\circ}$. Terdapat tiga peristiwa istimewa berdasarkan posisi Matahari:

1. *Solstice* Juni, terjadi pada tanggal 20 atau 21 Juni. Matahari mencapai titik balik utara, deklinasi bernilai maksimum.
2. *Solstice* Desember, terjadi pada tanggal 21 atau 22 Desember. Matahari mencapai titik balik selatan, deklinasi bernilai minimum.
3. Deklinasi nol terjadi dua kali dalam satu tahun, yaitu pada tanggal 20 atau 21 Maret yang kami sebut dengan peristiwa ekuinoks Maret, dan 22 atau 23 September yang kami sebut dengan ekuinoks September.

2.2 Prinsip Cahaya dan Bayangan

Terdapat dua jenis sumber cahaya, yaitu *point source* dan *extended source* (K.C., 2011). Matahari yang merupakan sumber cahaya *extended source*, menghasilkan dua macam bayangan, yaitu umbra dan penumbra (Gambar 2). Umbra merupakan bayangan utama yang tajam, sedangkan penumbra adalah bayangan tambahan yang buram.



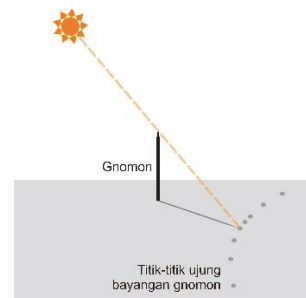
Gambar 2. Semakin tinggi *gnomon* yang digunakan, penumbra yang dihasilkan semakin besar. Penumbra dapat diminimalkan dengan menggunakan *gnomon* yang pendek.

3 PENGAMATAN GERAK SEMU HARIAN MATAHARI

3.1 Prinsip Dasar Pengamatan

Pengamatan dilakukan dengan mengamati bayangan *gnomon* dari alat peraga selama satu hari, dimulai dari pukul 08.00 WIB hingga 15.00 WIB. Setiap 30 menit, posisi ujung bayangan *gnomon* diberi tanda titik (Gambar 3).

Titik-titik ujung bayangan *gnomon* adalah data yang diambil. Dengan demikian, jika tidak terjadi mendung atau hujan, terdapat 15 data yang diambil dalam satu hari.

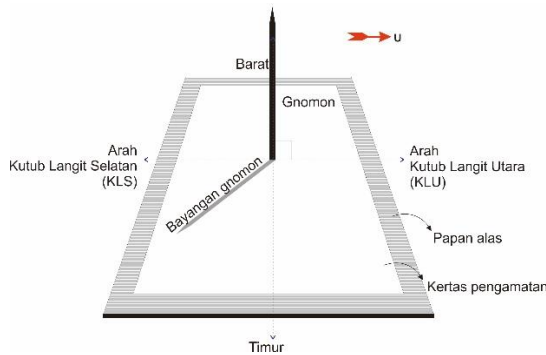


Gambar 3. Pengamatan bayangan *gnomon* dalam satu hari. Ujung dari bayangan *gnomon* ditandai dengan titik.

3.2 Detail Pengamatan

Pengamatan dilakukan dari tanggal 29 Juli 2020 hingga 25 Juli 2021. Pengamatan tidak selalu dilakukan setiap hari berturut-turut karena bergantung pada cuaca yang mendukung. Sebagian besar pengamatan pada penelitian ini dilakukan pada setengah periode tahunan Matahari, yaitu Juli 2020 – Desember 2020 (antara dua *solstices*). Karena Matahari hanya kembali melalui lintasan yang sama setelah mencapai titik balik selatan, pengamatan dihentikan. Selain itu, mendung dan hujan terjadi hampir setiap hari pada akhir Desember 2020 hingga Maret 2021. Pengamatan sempat dilakukan pada tanggal 20 Maret 2021, yaitu saat peristiwa ekuinoks. Namun selanjutnya, pengamatan tidak dilakukan lagi hingga 12 Juli 2021 (termasuk pada peristiwa *solstice* Juni 2021). Barulah pada tanggal 13 Juli 2021 kembali dilakukan pengamatan hingga tanggal 25 Juli 2021. Akhirnya dari 362 hari dalam rentang waktu di atas, hanya dilakukan 77 kali pengamatan.

Pengamatan dilakukan di atas meja setinggi $(375,5 \pm 0,05)$ cm di atas tanah, di tempat terbuka yang mendapat pancaran sinar Matahari. Desain alat peraga yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan oleh Gambar 4. Jumlah alat peraga yang digunakan



Gambar 4. Alat peraga terdiri dari tiga bagian. Pertama, sebuah *gnomon* tegak setinggi $(9,1 \pm 0,05)$ cm. Kedua, ‘papan alas’ sebagai tempat jatuhnya bayangan *gnomon*. Ketiga, ‘kertas pengamatan’ yang dipasang secara semi-permanen. Kertas ini digunakan untuk merekam data pengamatan.

adalah 8 set. Penandaan ujung bayangan *gnomon* pada kedelapan alat dilakukan oleh seorang pengamat, dengan kata lain, penandaan pada kedelapan alat tidak dilakukan serentak pada waktu yang bersamaan. Terdapat jeda/selisih detik setiap menandai satu alat ke alat berikutnya. Supaya jeda tersebut tidak terlalu besar, kegiatan menandai kedelapan alat ini dilakukan dalam 1 menit. Pemberian tanda titik pada ujung bayangan *gnomon* dilakukan dengan spidol permanen dengan diameter ketebalan *tip* 1,0 mm.

Bahan yang digunakan untuk membuat alat peraga adalah bahan yang tahan terhadap perubahan cuaca. Kami menggunakan papan eternit sebagai papan alas dan tabung bolpoin plastik sebagai *gnomon*. Kertas pengamatan dilaminasi dengan plastik untuk melindungi data yang terekam.

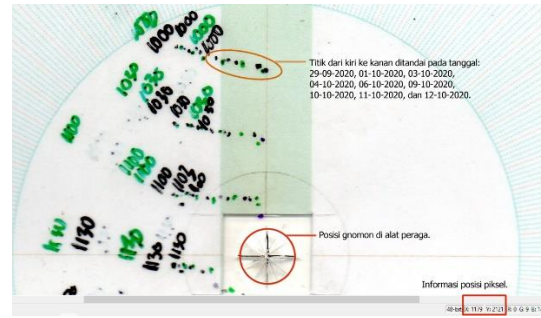
4 OLAH DATA PENGAMATAN

4.1 Tahap Awal Olah Data

Kertas pengamatan dipindai dengan pemindai (*scanner*). Pemindai yang digunakan adalah EPSON L360, dengan ukuran *bed scanner* A4 (21,0 cm × 29,7 cm) dan resolusi *output* 2481 px × 3509 px; 300 dpi. Kemudian, hasil pindai (.jpg) dibuka menggunakan perangkat lunak pengolahan citra astronomi, IRIS yang dikembangkan oleh Christian BUIL. Versi yang digunakan adalah versi 5.58 (pembaharuan terakhir 6 Februari 2010)

4.2 Olah Data Menggunakan IRIS

Tampilan kertas pengamatan yang dibuka dengan IRIS ditunjukkan oleh Gambar 5. Terdapat deretan titik-titik ujung bayangan *gnomon* untuk pengamatan tanggal 29 September 2020 – 12 Oktober 2020 (dalam elips berwarna oranye) dan



Gambar 5. Tampilan IRIS saat membuka *file* hasil pindai Kertas Pengamatan dari salah satu alat peraga. Deretan titik yang berada di dalam elips oranye adalah titik-titik ujung bayangan *gnomon* yang ditandai pada pukul 10.00 WIB. Titik tengah dari lingkaran merah merepresentasikan posisi *gnomon*. Kotak merah di bagian bawah adalah tempat untuk membaca posisi piksel.

tulisan ‘1000’, ‘1030’, ‘1100’, ‘1130’ di dekatnya yang merupakan keterangan pada jam berapa ujung-ujung bayangan tersebut ditandai (‘1000’ berarti pukul 10.00 WIB, ‘1030’ berarti pukul 10.30 WIB, dan seterusnya).

IRIS dapat memberi informasi posisi piksel untuk setiap titik yang ditunjuk oleh kursor pada gambar yang dibuka. Dalam penelitian ini, IRIS berperan untuk memberi informasi posisi piksel titik-titik ujung bayangan *gnomon* pada kertas pengamatan. Posisi (0, 0) pembacaan posisi IRIS terletak di pojok kiri paling bawah dari kertas pengamatan.

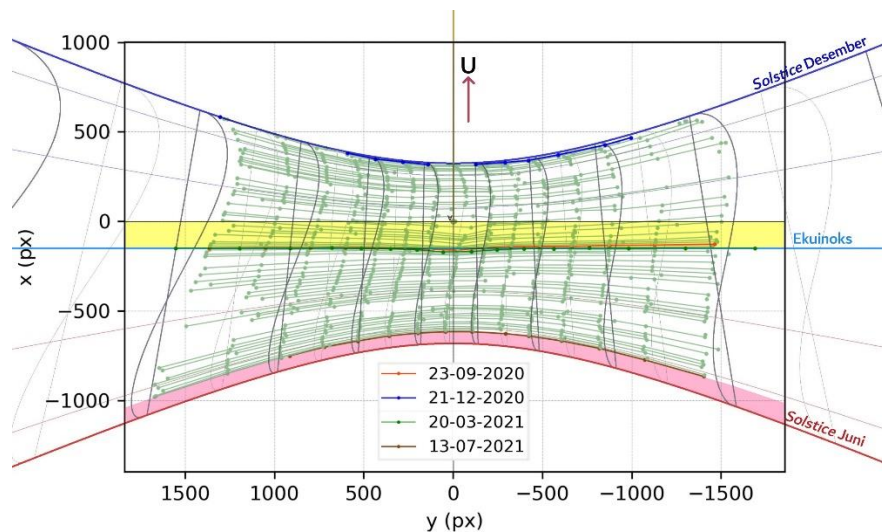
Namun, yang diperlukan dalam penelitian ini adalah posisi titik-titik ujung bayangan *gnomon* relatif terhadap posisi *gnomon*. Langkah pertama yang harus dilakukan adalah membaca posisi titik tengah kertas pengamatan. Dengan mengarahkan kursor sebanyak 12 kali pada titik tengah, posisi dibaca dan dicatat, kemudian dirata-rata sehingga diperoleh posisi titik tengah kertas pengamatan yang dinotasikan dengan (x_c, y_c) . Pembacaan berulang tersebut dilakukan untuk kepentingan akurasi pembacaan posisi.

Langkah selanjutnya adalah membaca posisi titik-titik ujung bayangan *gnomon*, masing-masing sebanyak 8 kali. Sama seperti sebelumnya, posisi dirata-rata sehingga diperoleh posisi masing-masing titik ujung bayangan *gnomon* yang dinotasikan dengan (x_i, y_i) . Terakhir, diperoleh posisi relatif $((x_c - x_i), (y_c - y_i))$.

5 HASIL DAN KESIMPULAN

5.1 Hasil

Posisi x , yaitu $(x_c - x_i)$ yang telah diperoleh dari proses olah data, diplot terhadap posisi y , yaitu



Gambar 6. Hasil *plot x* terhadap *y* untuk rerata kedelapan alat. Setiap kurva pada grafik merupakan representasi data yang diambil setiap kali pengamatan. Terdapat 4 kurva yang diberi warna mencolok: oranye untuk pengamatan yang dilakukan pada tanggal 23 September 2020 (peristiwa ekuinoks September), hijau untuk 20 Maret 2021 (ekuinoks Maret), merah untuk 21 Desember 2020 (*solstice* Desember), dan coklat untuk 13 Juli 2021. Kemudian, kurva dibandingkan dengan hasil simulasi aplikasi *Shadows Pro*. Daerah kosong berwarna merah menunjukkan bahwa pengamatan tidak dilakukan pada rentang waktu tersebut.

$(y_c - y_i)$ sehingga diperoleh Kurva Ujung Bayangan *Gnomon* untuk setiap alat. Kurva yang ditunjukkan oleh Gambar 6 adalah kurva rerata dari delapan alat. Diperoleh 77 kurva dari 77 hari pengamatan. Pola lintasan harian Matahari yang terproyeksi oleh bayangan *gnomon* ini sesuai dengan yang digambarkan oleh Evans (1998), Savoie (2009), dan aplikasi pembuat jam Matahari, *Shadows Pro*.

Bayangan *gnomon* terpendek yang terjadi saat Matahari transit direpresentasikan oleh puncak dari setiap kurva. Daerah kuning pada Gambar 6 menunjukkan seberapa jauh kurva ekuinoks dari posisi *gnomon* (0,0). Puncak kurva bayangan yang melewati posisi (0,0) diperoleh pada hari ketika Matahari transit tepat di atas *gnomon* (di zenith). Kurva tersebut dapat memberikan informasi seberapa jauh posisi lintang pengamat dari ekuator.

Kurva bayangan *gnomon* juga dapat digunakan untuk menentukan arah utara sejati (Evans, 1998). Jika digambar lingkaran berpusat di posisi (0,0) sedemikian sehingga memotong kurva bayangan *gnomon* pada dua titik, lalu dari setiap titik potong tersebut ditarik garis hingga bertemu di posisi (0,0)

dan membentuk suatu sektor lingkaran, maka garis yang membagi sektor tersebut sama besar adalah garis yang menunjukkan arah utara sejati.

5.2 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa kurva ujung bayangan *gnomon* memberikan informasi seberapa jauh lokasi pengamatan dari ekuator, serta arah utara sejati pada tempat dilakukan pengamatan.

6 PUSTAKA

- Blateyron, F. 2020, *Sundial & Astrolabes: Reference Manual of Shadows Pro* < <https://www.shadowspro.com/en/user-manual.html>>
- Evans, James. 1998, *The History and Practice of Ancient Astronomy*, Oxford University Press, New York.
- K.C., Prabin. 2011. *Theory of Shadow*. *Himalayan Physics*, 1, 101-105.
- Savoie, D. 2009. *Sundials, Design, Construction, and Use*. (Bob Mizon, Terjemahan). United Kingdom: Springer-Praxis Publishing.
- Smart, W. M. & Green, R. M. 1977, *Textbook on Spherical Astronomy*, 6th Edition, Cambridge University Press, United Kingdom.

Studi Variabilitas Kecepatan Angin dan Distribusi Kelimpahan Molekul di Titan Berdasarkan Pengamatan ALMA

L. Badingah^{1*} dan T. Hidayat^{1*}

¹Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: luluatul.badingah@students.itb.ac.id dan taufiq@as.itb.ac.id

ABSTRAK

Keberadaan sirkulasi umum satu sel kutub-ke-kutub dan siklus hidrokarbon menunjukkan bahwa atmosfer Titan sangat dinamis. Pengamatan angin merupakan salah satu sumber informasi utama untuk mempelajari dinamika atmosfer Titan. Pengukuran pergeseran Doppler dari garis emisi molekul adalah salah satu metode yang digunakan untuk menentukan kecepatan angin di Titan. HNC, HCN, HC₃N dan CH₃CN adalah contoh molekul yang dapat digunakan karena cukup melimpah di wilayah ketinggian yang berbeda-beda. Pengukuran kecepatan angin berdasarkan pengamatan menggunakan teleskop radio telah dilakukan pada tahun 2003, 2004, 2016 dan 2017, yang secara umum menunjukkan adanya variabilitas kecepatan angin di Titan. Dalam pekerjaan ini, penulis melakukan studi variabilitas kecepatan angin serta distribusi kelimpahan molekul HNC, HCN, HC₃N dan CH₃CN di Titan. Untuk menentukan nilai kecepatan angin, pekerjaan ini memanfaatkan data pengamatan *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA) pada tahun 2012, 2013, 2016 dan 2017, pengolahan data menggunakan CASA, dan *fitting* menggunakan *Simple Linear Regression* (SLR). Hasil perhitungan untuk setiap molekul yang ditinjau menunjukkan bahwa nilai kecepatan angin di atmosfer Titan mengalami peningkatan dari tahun 2012 hingga 2016, dan penurunan terjadi pada tahun 2017. Hal ini mendukung berbagai pengamatan sebelumnya. Pekerjaan ini juga berhasil membuktikan ketidakstabilan jet termosferik yang dideteksi dengan kecepatan mencapai 340 km s⁻¹ pada tahun 2016.

Kata Kunci: angin – pergeseran Doppler – ALMA

1 PENDAHULUAN

Sejak tahun 1980, berbagai metode telah digunakan untuk mengukur kecepatan angin di atmosfer Titan (Lampiran A). Metode terbaik yang digunakan saat ini adalah pengukuran pergeseran Doppler dari garis emisi molekul karena dapat dilakukan dengan mengamati Titan menggunakan teleskop radio landas Bumi. Teleskop radio *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA) sebagai teleskop radio terancang saat ini mendukung pengukuran kecepatan angin menggunakan metode tersebut dengan sangat teliti.

Berdasarkan Tabel A.1 (Lampiran), pengukuran kecepatan angin di atmosfer Titan dengan mengukur pergeseran Doppler dari garis emisi molekul pada panjang gelombang milimeter untuk pertama kalinya dilakukan oleh Moreno et al. (2005) dengan menggunakan teleskop radio *Institut de Radioastronomie Milimetrique* (IRAM) dan memanfaatkan emisi molekul HC₃N dan CH₃CN. Penelitian ini merupakan pengukuran kecepatan angin secara langsung di wilayah mesosfer Titan (angin mesosferik) pada ketinggian lebih dari 250 km untuk pertama kalinya serta mengonfirmasi keberadaan angin superrotasi di atmosfer Titan.

Selanjutnya, Lellouch et al. (2019) melaporkan hasil pengukuran kecepatan angin menggunakan metode pergeseran Doppler dari enam garis emisi molekul: HCN, DCN, HNC, HC₃N, CH₃CN,

CH₃CCH; berdasarkan pengamatan dengan menggunakan teleskop radio ALMA pada tahun 2016. Selain memperoleh nilai kecepatan angin pada wilayah stratosfer hingga mesosfer (ketinggian 50 hingga 500 km) seperti pengamatan oleh Moreno et al. (2005), dengan menggunakan profil garis molekul HNC, untuk pertama kalinya nilai kecepatan angin di wilayah termosfer Titan (ketinggian lebih dari 500 km) berhasil diperoleh, yang mengindikasikan keberadaan jet termosferik di Titan yang belum pernah terukur melalui berbagai pengamatan sebelumnya.

Selain memperoleh nilai kecepatan angin di atmosfer Titan, Lellouch et al. (2019) juga berhasil memperhitungkan *Wind contribution function* (WCF) untuk mengestimasi rentang ketinggian yang diindera oleh setiap molekul yang digunakan dalam pengukuran kecepatan angin. Berdasarkan WCF (Lampiran A, Gambar A.1 Panel kiri), tiga wilayah yang mampu diindera oleh keenam molekul tersebut adalah:

1. stratosfer bagian atas hingga mesosfer bagian bawah, yang diindera menggunakan CH₃CCH, DCN, dan CH₃CN dengan puncak emisi secara berturut-turut berada di ketinggian 315 km, 340 km, dan 345 km;
2. mesosfer, yang diindera menggunakan HC₃N dan HCN dengan puncak emisi berada di ketinggian 710 km dan 745 km;

3. termosfer bagian atas, yang diindera menggunakan HNC dengan puncak emisi berada di ketinggian 990 km.

Pengukuran kecepatan angin terbaru dilakukan oleh Cordiner et al. (2020) dengan memanfaatkan pengamatan molekul HNC, HC₃N, dan CH₃CN pada Agustus 2016 dan Mei 2017. Berdasarkan penelitian tersebut, terjadi penurunan kecepatan angin selama periode sekitar 9 bulan. Cordiner et al. (2020) menyimpulkan bahwa semakin tinggi atmosfer Titan maka semakin tidak stabil nilai kecepatan angin yang terukur.

Dari keenam molekul yang digunakan oleh Lellouch dkk. (2019), hanya empat molekul, yaitu HNC, HCN, HC₃N, dan CH₃CN, yang akan dipelajari dan digunakan dalam penelitian ini (Lampiran A, Gambar A.1 Panel kanan). Penjelasan mengenai peta distribusi kelimpahan molekul HNC, HCN, HC₃N, dan CH₃CN, berdasarkan pengamatan menggunakan teleskop radio ALMA yang telah diamati sejauh ini dapat dilihat pada Lampiran bagian B.

Penelitian ini dilakukan untuk mempelajari distribusi kelimpahan molekul HNC, HCN, HC₃N, dan CH₃CN, di atmosfer Titan pada tahun 2012 hingga 2017 serta menentukan kecepatan angin di atmosfer Titan pada tahun 2012 hingga 2017 dengan menggunakan metode pergeseran Doppler dari garis emisi molekul HNC, HCN, HC₃N, dan CH₃CN. Penelitian ini diharapkan mampu melengkapi dan memberikan informasi baru yang berkaitan dengan dinamika atmosfer Titan, khususnya mengenai pengukuran kecepatan angin.

2 DATA, METODE PENGOLAHAN DAN ANALISIS DATA

2.1 Data

Data pengamatan yang digunakan dalam penelitian ini harus mencakup molekul HNC ($J = 4 - 3$) pada frekuensi 362,630 GHz, HCN ($J = 4 - 3$) pada frekuensi 354,505 GHz, HC₃N ($J = 39 - 38$) pada frekuensi 354,697 GHz, dan CH₃CN ($J = 19 - 18$) pada frekuensi 349,447 GHz. Data pengamatan yang mencakup frekuensi yang diinginkan tersedia untuk tahun 2012, 2013, 2016, dan 2017, dan ditunjukkan pada Tabel C.1 (Lampiran bagian C.1).

2.2 Pengolahan Data

Terdapat dua tahap utama pengolahan data dalam penelitian ini. Pertama, data pengamatan ALMA pada tahun 2012, 2013, 2016, dan 2017 yang telah diunduh dari ALMA Science Archive diolah menggunakan Common Astronomy Software

Application (CASA) untuk menghasilkan citra *continuum* Titan, serta citra molekul HNC, HCN, HC₃N, dan CH₃CN di Titan. Kedua, mengambil data nilai kecepatan angin dari citra molekul HNC, HCN, HC₃N, dan CH₃CN yang telah dihasilkan untuk selanjutnya di-*fitting* menggunakan *Simple Linear Regression* (SLR) agar diperoleh nilai kecepatan angin rata-rata dari setiap molekul.

Tahap pertama dalam pengolahan data terdiri dari tiga langkah berikut:

1. Kalibrasi data.
2. Ekstrak spektrum.
3. Pencitraan.

Setelah diperoleh citra, pengolahan data tahap kedua dilakukan dengan mengikuti langkah- langkah di bawah ini:

1. Menentukan informasi skala.
2. Menentukan batas sumber emisi.
3. Menentukan daerah pada citra yang akan diambil spektralnya.
4. Mengambil profil spektral dan melakukan *fitting* Gaussian.
5. Mencatat data nilai kecepatan angin secara manual pada Microsoft Excel.

Setelah memperoleh data nilai kecepatan, beberapa ketentuan diterapkan untuk melakukan *fitting*, yaitu:

1. Menghilangkan nilai kecepatan yang berasal dari kontribusi *background*.
2. Menerapkan batas atas dari nilai kecepatan yang mungkin menurut Lellouch et al. (2019).
3. Mengambil nilai rata-rata untuk setiap satu nilai pada sumbu X.
4. Meninjau nilai kecepatan yang semakin besar pada jarak yang semakin jauh dari pusat Titan.
5. Mengambil nilai mutlak dari data.
6. Melakukan *fitting* dengan menggunakan model *Simple Linear Regression* (SLR) menggunakan Microsoft Excel.

Penjelasan detail mengenai pengolahan data dapat dilihat pada Lampiran bagian C.2.

2.3 Analisis Data

Penelitian ini memanfaatkan model *Simple Linear Regression* (SLR) untuk melakukan *fitting* data nilai kecepatan angin dari setiap molekul yang ditinjau. Penjelasan detail mengenai metode analisis data dapat dilihat pada Lampiran bagian C.3.

3 HASIL DAN ANALISIS

3.1 Distribusi Kelimpahan Molekul di Titan

Dari 4 *project* pengamatan yang digunakan dalam proyek ini (Lampiran C.1) serta perbedaan pada proses pengolahan data tahap pertama

(*regridding* atau tanpa *regridding*) (Lampiran C.2), dihasilkan 6 citra *continuum* (Lampiran D) dan 19 citra molekul di Titan dengan detail yang tertera pada Tabel E.1 (Lampiran E). Citra molekul tersebut menggambarkan distribusi molekul HNC, HCN, HC₃N, dan CH₃CN di Titan dan dapat dilihat pada Lampiran bagian E.

3.2 Hasil Pengukuran Nilai Kecepatan Angin

Prinsip pengukuran kecepatan angin berlaku untuk semua citra yang dihasilkan dalam penelitian ini dan disesuaikan dengan parameter masing-masing yang tertera pada Tabel F.1-F.6 yang dapat dilihat pada Lampiran bagian F dan akan dicontohkan melalui *project* 2011.0.00727.S.

Berdasarkan informasi dari *Planetary Data System* (PDS) (Gambar D.1, Lampiran), ukuran diameter sudut piringan Titan pada saat pengamatan berlangsung adalah 0,775", sedangkan 1" pada setiap citra diwakili oleh 11 piksel, maka diameter Titan pada saat pengamatan bersesuaian dengan ukuran 9 piksel pada citra. Dengan membagi diameter Titan teoretis yaitu 5150 km (Lellouch et al., 2019) dengan jumlah piksel, maka diperoleh informasi skala bahwa setiap satu piksel pada citra mewakili ukuran 572,22 km di Titan. Informasi yang berkaitan dengan citra dari keempat molekul tersebut disajikan pada Tabel F.1 (Lampiran).

Selanjutnya, untuk menentukan batas sumber emisi dari setiap molekul, diterapkan peta kontur dengan *Unit contour levels* (UCL) yang bergantung pada *noise background* (σ) yang berbeda untuk setiap molekul. Kemudian menerapkan nilai 3σ untuk garis terluar dan dianggap sebagai batas sumber emisi dari setiap molekul di Titan. Pada Tabel F.1 Lampiran), nilai UCL untuk citra HNC adalah 0,0145 Jy/beam. Setelah menerapkan peta kontur dari UCL tersebut, maka diameter Titan dan atmosfer pada arah horizontal dan vertikal berukuran 15 piksel dan 14 piksel. Dengan menganggap piksel 128 sebagai titik ke-0 (pusat piringan Titan), maka citra HNC di Titan dapat dibagi menjadi 2 daerah, sebelah timur (kiri) dan barat (kanan) dari pusat piringan Titan. Puncak emisi HNC berada pada ketinggian 990 km (Lellouch et al., 2019) yang berada di piksel ke-6 (ke arah kiri dan kanan) dari pusat piringan Titan.

Dalam arah vertikal pada citra keempat molekul tersebut, daerah yang diambil spektralnya berukuran 10 piksel dan dibagi menjadi 2 daerah (berukuran 5 piksel, sesuai dengan ukuran sintesis beam setiap citra) yang merentang dari piksel 121-130 untuk HNC dan CH₃CN, serta 124-133 untuk HCN dan HC₃N. Sedangkan pada arah horizontal berukuran

15 piksel dan dibagi menjadi 3 daerah (berukuran 5 piksel). Oleh karena itu, diperoleh 6 titik data untuk masing-masing molekul yang digunakan untuk memperoleh data nilai kecepatan angin. Nilai kecepatan yang ditabulasikan dapat diakses melalui laman <https://bit.ly/tabulasi-nilai-kecepatan-angin-di-Titan>.

Nilai kecepatan diplot dengan sumbu Y menunjukkan nilai kecepatan angin ekuatorial dalam arah pandang dari setiap molekul dan sumbu X menunjukkan jarak dari pusat piringan Titan dan dinyatakan dalam satuan "jari-jari efektif Titan". Satuan tersebut didefinisikan sebagai jarak radial pada ketinggian rata-rata WCF. Sebagai contoh nilai 1.0 dalam sumbu X untuk molekul HNC menyatakan jarak radial 3565 km yaitu radius Titan yang bernilai 2575 km dijumlahkan dengan ketinggian dari puncak emisi HNC yang bernilai 990 km. Hal ini berlaku juga untuk HCN (3320 km), HC₃N (3285 km), dan CH₃CN (2920 km). Hasil plot disajikan pada Gambar G.1.1-G.1.4 (Lampiran).

Setelah menerapkan ketentuan *fitting* yang telah disebutkan sebelumnya, jumlah data yang digunakan untuk memperoleh nilai kecepatan angin berkurang menjadi 3 titik data untuk HNC, 2 titik data untuk HCN, 2 titik data untuk HC₃N, dan 3 titik data untuk CH₃CN. Setelah diambil nilai mutlaknya, *fitting* dilakukan secara otomatis menggunakan Microsoft Excel. Hasil *fitting* disajikan pada Gambar G.1.1-G.1.4 (Lampiran). Informasi utama dari keluaran analisis regresi pada Microsoft Excel disajikan dalam Tabel H.1.1, H.1.2, dan H.1.3 (Lampiran). Nilai koefisien a dari masing-masing molekul yang disajikan pada Tabel H.3 menunjukkan nilai kecepatan angin ekuatorial yang diperoleh. Seluruh hasil *fitting* dan informasi utama dari keluaran analisis regresi dapat dilihat pada Lampiran bagian G dan H.

4 DISKUSI DAN SIMPULAN

Pada Lampiran bagian E, distribusi kelimpahan molekul HNC, HCN, HC₃N, dan CH₃CN telah digambarkan melalui citra berdasarkan empat *project* pengamatan yang digunakan dalam penelitian ini. Secara umum, seluruh citra dari keempat molekul tersebut menunjukkan adanya pergerakan molekul dari tahun ke tahun. Hal ini ditunjukkan dengan variasi kelimpahan molekul terhadap lintang dari waktu ke waktu serta peningkatan kelimpahan molekul di wilayah kutub selatan Titan dan penurunan kelimpahan di wilayah kutub utara Titan, sehingga mengonfirmasi keberadaan sirkulasi umum satu sel dari kutub-ke-kutub (sel Hadley) di atmosfer Titan.

Nilai kecepatan angin ekuatorial pada atmosfer Titan yang diperoleh dalam penelitian ini disajikan pada Tabel I.1 (Lampiran bagian I). Secara umum, setiap molekul menunjukkan bahwa dari tahun 2012 hingga 2016, nilai kecepatan angin di atmosfer Titan mengalami peningkatan, sedangkan pada tahun 2017 terjadi penurunan, hal ini mengonfirmasi penelitian sebelumnya yang ditunjukkan pada Tabel I.2.

Apabila ditinjau lebih lanjut untuk kecepatan yang diperoleh dari molekul HNC, HC₃N, dan CH₃CN, maka akan diamati bahwa setiap molekul yang mewakili wilayah yang berbeda di atmosfer Titan memiliki kekuatan variabilitas yang berbeda. Urutan variabilitas kecepatan angin dari yang terbesar hingga terkecil adalah sebagai berikut:

1. termosfer, nilai kecepatan angin yang diperoleh dari HNC memiliki variabilitas terbesar sehingga menunjukkan bahwa termosfer adalah daerah paling tidak stabil di atmosfer Titan;
2. mesosfer, nilai kecepatan angin yang diperoleh dari HC₃N memiliki variabilitas lebih lemah dari HNC namun lebih kuat dari CH₃CN sehingga menunjukkan bahwa mesosfer cenderung lebih stabil daripada termosfer Titan;
3. stratosfer, nilai kecepatan angin yang diperoleh dari CH₃CN memiliki variabilitas terkecil sehingga menunjukkan bahwa stratosfer adalah daerah paling stabil di atmosfer Titan.

Hal ini mengonfirmasi hasil Cordiner et al. (2020) yang menyimpulkan bahwa semakin tinggi atmosfer Titan maka semakin tidak stabil nilai kecepatan yang terukur.

5 SARAN

Ketidaksempurnaan hasil analisis SLR yang dapat ditemukan dalam Tabel pada Lampiran bagian H dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor, diantaranya:

- nilai kecepatan yang diambil pada daerah berukuran yang sama dengan atau lebih kecil dari ukuran sintesis beam hanya mencerminkan nilai rata-rata dari daerah tersebut;
 - piksel yang berasal dari *background* masih berkontribusi pada daerah rata-rata tersebut;
 - error yang besar merupakan error turunan dari ketidaksempurnaan dalam proses pengolahan data maupun dari ketentuan dalam mengambil data nilai kecepatan angin untuk setiap molekul.
- Berdasarkan faktor-faktor tersebut, Penulis menyarankan langkah-langkah berikut agar dapat memperbaiki pekerjaan ini di masa depan:
- mengambil nilai kecepatan dari semua piksel agar jumlah titik data lebih banyak dan bukan mencerminkan nilai rata-rata;
 - menghilangkan nilai kecepatan yang berasal dari kontribusi *background*;
 - meninjau model *fitting* lain.

Lampiran

Proyek ini menghasilkan tabel dan gambar dalam jumlah yang banyak sehingga tidak dapat ditunjukkan pada naskah utama, namun dapat dilihat pada Lampiran yang dapat diakses melalui laman https://bit.ly/SPA2021_Lampiran_LB.

6 PUSTAKA

- Cordiner, M.A., E. Garcia-Berrios, R.G. Cosentino, N.A. Teanby, C.E. Newman, C.A. Nixon, A.E. Thelen, & S.B. Charnley. 2020, *The Astrophysical Journal Letters*. 904. L12.
- Lellouch, E., M.A. Gurwell, R. Moreno, S. Vinatier, D.F. Strobel, A. Moullet, B. Butler, L. Lara, T. Hidayat, & E. Villard. 2019, *Nature Astronomy*.
- Moreno, R., A. Marten, & T. Hidayat. 2005, *Astronomy Astrophysics*. 437. 319-328.

Rekonstruksi Trajektori Wahana Antariksa menuju Asteroid Bennu

M. Affan^{1*}, R. E. Poetro², dan E. Soegiartini¹

¹Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

²Program Studi Teknik Dirgantara, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: maulanaaffan99@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini merekonstruksi trajektori OSIRIS-REx menuju asteroid 101955 Bennu. OSIRIS-REx diluncurkan pada tanggal 8 September 2016, melakukan *Deep Space Manuever 1* (DSM1) agar dapat *flyby* dengan Bumi pada tanggal 22 September 2018, lalu melakukan *Deep Space Manuever 2* (DSM2) untuk mendekati Bennu, dan tiba di Bennu pada 3 Desember 2018. Dalam penelitian ini, kami gunakan Simulink dan GMAT untuk melakukan rekonstruksi sebuah wahana menuju Bennu dan hasilnya dibandingkan dengan data OSIRIS-REx. Selain itu, penelitian ini juga melakukan simulasi trajektori dengan *direct mission* menggunakan metode *patched conic*, yaitu metode penyederhanaan perhitungan lintasan benda dari masalah n-benda menjadi masalah 2-benda. Wahana tersebut melakukan manuver untuk mengubah orbit parkir menuju orbit hiperbola. Setelah wahana tersebut berada pada lintasan hiperbola dan keluar dari bola pengaruh Bumi, wahana tersebut akan memasuki orbit heliosentrik menuju Bennu dengan menggunakan transfer Hohmann. Hasil perhitungan analitis metode *patched conic* akan dibandingkan dengan simulasi *direct mission* menggunakan GMAT. Penelitian ini menggunakan dua perangkat lunak yaitu Simulink dan GMAT. Simulink merupakan bagian tambahan dari MATLAB yang digunakan untuk pemodelan, simulasi, dan analisis sistem dinamik dengan menggunakan antarmuka grafis, sedangkan GMAT merupakan perangkat lunak *open source* yang dikembangkan oleh NASA untuk menganalisis misi antariksa.

Kata Kunci: trajektori – OSIRIS-REx – *patched conic* – Bennu

1 PENDAHULUAN

Perkembangan misi antariksa mulai menjangkau tidak lagi planet-planet besar, tapi juga berbagai objek astronomi seperti komet dan asteroid. Pengamatan asteroid melalui wahana antariksa awalnya hanya menjadi bagian tambahan dari sebuah misi antarplanet, seperti saat wahana antariksa Galileo melakukan perjalanan menuju Jupiter dan bertemu dengan asteroid Gaspra. Studi mengenai asteroid berkembang menjadi misi tersendiri. Misi pertama adalah mengorbit dan mendarat di permukaan asteroid yang dilakukan oleh *Near Earth Asteroid Rendezvous* (NEAR), diluncurkan pada tahun 1996 dan mendarat pada tahun 2001 di 433 Eros. Setelah misi tersebut sukses, kemudian bermunculan misi-misi lainnya hingga misi menuju asteroid Bennu.

Origins Spectral Interpretation Resource Identification Security Regolith Explorer (OSIRIS-REx) yang merupakan misi *New Frontier* NASA diluncurkan pada tahun 2016. Misi ini menuju asteroid 101955 Bennu untuk mempelajari dan memetakan asteroid, menentukan efek gaya Yarkovsky pada orbit Bennu, dan kembali ke Bumi pada tahun 2023 dengan membawa sampel permukaan Bennu yang mengandung karbon. OSIRIS-REx menjadi misi ketiga yang akan mengunjungi *Near Earth Asteroid* (NEA). Sebelumnya, terdapat misi NEAR yang

mengunjungi 433 Eros dan Hayabusa yang mengunjungi 25143 Itokawa (Beckman et al., 2013).

OSIRIS-REx diluncurkan pada tanggal 8 September 2016 dari Cape Canaveral, Florida. Kemudian, wahana ini keluar dari bola pengaruh Bumi dan melakukan *Deep Space Manuever* (DSM) 1. DSM 1 dilakukan untuk mengubah orbit agar wahana dapat melakukan *flyby* dengan Bumi pada tanggal 22 September 2017. *Gravity assist* dari Bumi saat wahana melakukan *flyby* untuk mengubah energi relatif wahana terhadap Matahari. Wahana melakukan DSM 2 untuk memosisikan jaraknya dekat dengan Bennu. Wahana tiba di Bennu pada tanggal 3 Desember 2018 (NASA OSIRIS-REx, 2021).

Dalam makalah ini, kami memberikan gambaran hasil rekonstruksi trajektori wahana antariksa menuju Bennu. Rekonstruksi yang kami lakukan menggunakan dua perangkat lunak, yaitu *General Mission Analysis Tools* (GMAT) dan Simulink. Kami menyajikan hasil perbandingan ΔV yaitu selisih kecepatan yang diperlukan untuk manuver pada DSM 1 dan 2, dan kebutuhan propelan antara simulasi dengan misi OSIRIS-REx.

2 LANDASAN TEORI

2.1 Hukum Gravitasi Newton

Hukum Gravitasi Newton menyatakan bahwa setiap benda yang memiliki massa akan muncul gaya tarik menarik dengan benda di sekitarnya. Benda

akan memiliki percepatan yang diakibatkan oleh gaya tarik menarik tersebut. Pernyataan ini diberikan melalui persamaan gerak

$$\sum_{i=1}^n m_i \ddot{\vec{r}}_i = -G \sum_{i=1}^n \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n \frac{m_i m_j}{r_{ji}^3} \vec{r}_{ji}, \quad (1)$$

dengan m_i adalah massa benda yang ditinjau, m_j adalah massa benda di sekitar benda m_i , G adalah konstanta gravitasi, $\ddot{\vec{r}}$ adalah vektor percepatan, dan $\vec{r}$ adalah vektor posisi (Vallado, 2013).

Persamaan (1) digunakan untuk mendapatkan percepatan wahana antariksa yang diakibatkan oleh gaya tarik menarik terhadap Bumi, Matahari, dan Benu, untuk kemudian dengan proses integrasi didapatkan nilai posisi wahana setiap waktu.

2.2 Metode Patched Conic

Metode *patched conic* adalah metode penyederhanaan perhitungan lintasan benda dari analisis *n-body problem* menjadi *2-body problem*. Dalam perhitungan analitis, wahana akan ditinjau bersama Bumi sebagai masalah dua benda. Kemudian, wahana akan melakukan lintasan menuju target menggunakan transfer Hohmann (Curtis, 2005).

2.3 Persamaan Tsiolkovsky

Wahana antariksa melakukan manuver untuk mengubah orbitnya sesuai dengan tujuannya. Wahana memerlukan gaya dorong yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar (propelan). Perhitungan kebutuhan propelan yang dibutuhkan menggunakan persamaan Tsiolkovsky berikut

$$m_{prop} = m_{awal} \left(1 - e^{\frac{-\Delta V}{g_0 I_{sp}}}\right), \quad (2)$$

dengan m_{prop} adalah massa propelan yang diperlukan, m_{awal} adalah massa awal wahana sebelum dikurangi propelan, g_0 adalah percepatan gravitasi, dan I_{sp} adalah impuls spesifik (Vallado, 2013).

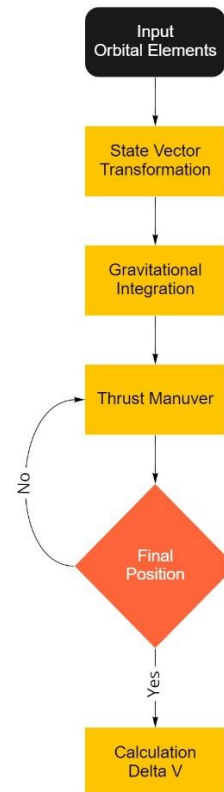
2.4 Metode

Simulink merupakan bagian tambahan dari perangkat lunak MATLAB. Bagian ini terdiri dari kumpulan *toolbox* yang memiliki fungsi tertentu dan harus dihubungkan untuk mendapatkan keluaran dari model perhitungan yang diterapkan. Kami membuat bagian pertama yang berisi elemen orbit dari tiap objek yang akan diubah menjadi vektor posisi dan kecepatan. Vektor tersebut akan menjadi nilai awal dari integrasi yang dilakukan tiap objek

untuk mendapatkan vektor posisi setiap waktu. Khusus untuk wahana ini, simulasi dilakukan dari orbit parkir di Bumi, saat melakukan manuver hingga keluar dari bola pengaruh Bumi, tetapi analisis kami tidak memasukkan aspek orbit parkir dalam bahasan makalah ini. Setelah wahana keluar dari bola pengaruh Bumi dan memasuki orbit heliosentris, wahana akan melakukan DSM 1 dan 2. Proses ini menggunakan percobaan berulang (*try and error*) sampai wahana mendapatkan posisi yang sesuai dalam tiap manuver yang dilakukan. Percobaan dilakukan dengan mengatur waktu dan arah *thrust* (gaya dorong) yang diberikan.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 1 menunjukkan alur simulasi yang dibuat menggunakan Simulink dengan langkah awal memasukkan elemen orbit awal dari wahana, Bumi, dan Benu. Kemudian, elemen orbit diubah ke dalam bentuk vektor posisi dan kecepatan awal. Vektor tersebut akan menjadi nilai awal dalam proses integrasi pada persamaan (1) untuk mendapatkan vektor posisi dan kecepatan setiap waktu. Apabila wahana akan melakukan manuver, maka bagian *thruster* akan diaktifkan dengan mengatur waktu dan arah gaya dorong untuk



Gambar 1. Alur program simulasi yang dibangun menggunakan Simulink

Tabel 1. Nilai parameter DSM 1, DSM 2, dan propelan yang dibutuhkan dalam rekonstruksi menggunakan GMAT dan Simulink dan dibandingkan dengan misi OSIRIS-REx

Data	DSM 1 (m/s)	DSM 2 (m/s)	Total ΔV (m/s)	Propelan 1 (kg)	Propelan 2 (kg)	Total propelan (kg)
OSIRIS-REx	431	16,7	447,7	354	12,8	366,8
GMAT	489,61	30,39	520	411,6	22,72	434,32
Simulink	1047,77	122,82	1170,59	729,09	121,90	850,99

bermanuver. Pemberian waktu *thruster* dan arah gaya dorong dilakukan menggunakan metode *try and error* hingga wahana mencapai target posisi akhir yang diinginkan.

Hasil simulasi yang dilakukan berfokus pada saat wahana keluar dari bola pengaruh Bumi dan berada di orbit heliosentrik. Wahana melakukan DSM 1 dan 2 saat berada di orbit heliosentrik. Pada GMAT, manuver yang digunakan menggunakan konsep *impulsive burn* yaitu pembakaran tiba-tiba, sedangkan pada program yang kami modelkan pada Simulink menggunakan *finite burn* atau pembakaran terbatas.

Tabel 1 menunjukkan parameter hasil rekonstruksi trajektori wahana menuju Benu. Nilai DSM 1 untuk kedua simulasi dibandingkan dengan misi OSIRIS-REx (Neal, 2017 & 2018). GMAT menunjukkan hasil yang mendekati misi OSIRIS-REx. Hasil pada Simulink menunjukkan nilai yang jauh lebih besar disebabkan perbedaan nilai *semi major axis* ketika wahana memasuki orbit heliosentrik. Nilai tersebut lebih kecil sehingga wahana membutuhkan manuver lebih besar untuk mengubah *semi major axis*. Selain itu, program yang dimodelkan pada Simulink masih menggunakan *try and error* untuk memberikan *thrust* saat manuver.

Parameter DSM 2 pada Simulink memiliki perbedaan yang besar disebabkan kondisi wahana saat melakukan *flyby* dengan Bumi. Saat dilakukan *try and error* pada *thrust* untuk melakukan manuver agar mendapatkan inklinasi yang sesuai dengan Benu, selalu terjadi perubahan nilai *semi major axis* sehingga akan dipilih posisi setelah wahana *flyby* yang memiliki *semi major axis* mirip dengan hasil di GMAT tapi berakibat pada inklinasi yang menjadi

lebih besar. Setelah wahana mendapatkan *gravity assist* dari Bumi, orbit wahana akan berubah. Ketika wahana melakukan DSM 2, disebabkan posisi inklinasinya yang berbeda dengan inklinasi Benu, maka manuver yang dilakukan memerlukan nilai perubahan kecepatan lebih besar.

Perhitungan kebutuhan propelan dari tiap manuver dilakukan menggunakan persamaan (2). Massa total wahana sebesar 2110 kg. Nilai I_{sp} dan

g_0 yang digunakan dalam perhitungan masing-masing bernilai 230 detik dan $9,87 \text{ m/s}^2$. Perbedaan kebutuhan propelan berdasarkan persamaan (2) disebabkan oleh variasi ΔV yang dihasilkan saat wahana melakukan manuver. Semakin besar nilai ΔV akan menyebabkan propelan yang dibutuhkan semakin besar.

Selain merekonstruksi trajektori wahana seperti yang dilakukan pada misi OSIRIS-REx, kami juga melakukan perhitungan analisis menggunakan *patched conic* dan transfer Hohmann untuk kasus trajektori wahana ketika berangkat dari Bumi saat di aphelion dan perihelion lalu tiba di Benu saat di perihelion dan aphelion. Perhitungan analisis ini akan menghasilkan keluaran berupa ΔV dengan sekali manuver (*direct mission*). Perhitungan ini menggunakan asumsi bahwa orbit Bumi dan Benu sebidang (*co-planar*). Kemudian, hasil tersebut akan dibandingkan menggunakan GMAT sesuai kondisi asli.

Tabel 2 menunjukkan perbandingan hasil trajektori *direct mission* dari metode *patched conic* dengan simulasi GMAT. Manuver pada *patched conic* menunjukkan nilai yang lebih kecil disebabkan karena wahana hanya melakukan manuver pada bidang yang sama. Wahana tidak melakukan manuver yang mengubah inklinasi. Sebaliknya, simulasi GMAT menggunakan kondisi asli untuk tiap objek. Pada simulasi GMAT, wahana akan menyesuaikan posisi akhir ketika mencapai Benu, di perihelion atau aphelion sehingga wahana perlu melakukan manuver pada sumbu z. Wahana akan mengubah kecepatannya termasuk kecepatan pada sumbu z dan perubahan ini memberikan kontribusi besar dalam besarnya nilai ΔV .

Tabel 2. Perbandingan nilai manuver dan propelan untuk kasus *direct mission* menggunakan perhitungan *patched conic* dan GMAT.

	Patched Conic		GMAT	
	Perihelion ke Aphelion	Aphelion ke Perihelion	Perihelion ke Aphelion	Aphelion ke Perihelion
Manuver (m/s)	290	90	1656,04	1903,06
Propelan (kg)	254,5	82,51	1097,19	1202,22

Direct mission memiliki kelebihan dalam hal waktu terbang (*time of flight*) yang lebih cepat dibandingkan jika wahana melakukan *flyby* dengan objek lain sebelum mencapai target. Data NASA menunjukkan peluang peluncuran (*launch opportunity*) wahana jika di masa depan akan melakukan perjalanan kembali ke Benu. *Launch opportunity* dengan ΔV minimum antara 2024 hingga 2036 terjadi pada tahun 2024, 2030, dan 2036 dengan masing-masing bernilai 5,1 km/s, 5,1 km/s dan 5,2 km/s. Waktu tempuh yang dibutuhkan berkisar 565-570 hari.

4 KESIMPULAN

Penelitian ini melakukan simulasi trajektori wahana dari Bumi ke Benu menggunakan Simulink dan GMAT. Simulasi yang telah dilakukan menunjukkan bahwa GMAT memberikan hasil kebutuhan propelan yang cukup baik dengan galat 18,41% sedangkan Simulink 132%. Hasil Simulink tersebut menunjukkan perlu dilakukan perbaikan pada program yang dirancang terutama bagian manuver.

Selain itu, penelitian ini membandingkan perhitungan analitis metode *patched conic* dengan GMAT untuk kasus *direct mission*. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa metode *patched conic* tidak dapat digunakan untuk mengaproksimasi

trajektori wahana dari Bumi ke Benu karena keterbatasan asumsi yang digunakan. *Direct mission* menjadi pilihan alternatif apabila di masa depan wahana akan melakukan perjalanan ke Benu dengan ΔV *launch opportunity* minimum terjadi di 2024, 2030 dan 2036.

5 DAFTAR PUSTAKA

- Beckman, M., et al. 2013, *Planetary Defense Conference*, 4-16
- Curtis, H. D. 2005, *Orbital Mechanics for Engineering*, Elsevier Butterworth Heinemann, Amsterdam
- NASA. 2021, *OSIRIS-REx: In depth, Solar System Exploration*.
<https://solarsystem.nasa.gov/missions/osiris-rex/in-depth/>.
- NASA. 2021, *Small-Body Mission-Design Tool*.
<https://ssd.jpl.nasa.gov/tools/mdesign.html>.
- Neal, N. J. 2017, *Successful Deep Space Maneuver for NASA's OSIRIS-REx Spacecraft*.
<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2017/successful-deep-space-maneuver-for-nasa-s-osiris-rex-spacecraft>
- Neal, N. J. 2018 *Successful Second Deep Space Maneuver for OSIRIS-REx Confirmed*.
<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/osiris-rex-executes-second-deep-space-maneuver>
- Vallado, D. A. 2013, *Fundamental of Astrodynamics and Applications 4th Edition*, Microsism Press, California

Analysis of Sunspot Groups Evolution Based on The Fractal Dimension of AR12192 and AR12209

S. E. Aziza^{1*} and D. Herdiwijaya¹

¹Departement of Astronomy, Bandung Institute of Technology, Bandung, Indonesia

*E-mail: shafiraersa@gmail.com

ABSTRACT

The area with a strong magnetic field on the Sun is an active region (AR). It is indicated by the presence of sunspots. The large AR has a long lifetime evolution and can produce recurrent sunspots (RS) and trigger lots of solar activities. AR12192 is the largest AR of the 24th solar cycle which occurred on October 18, 2014. AR12192 reemerged as the RS, AR12209 on November 13, 2014. This study analyzed the evolution of AR12192 and AR12209 by measuring their fractal dimension (FD) throughout their lifetimes. The analysis of FD was conducted on heliographic longitude ≤ 60 to minimize the projection effect. The images of each AR were taken from Solar Dynamic Observatory (SDO) with Helioseismic and Magnetic Imager (HMI) Continuum filters. The evolution of ARs can be analyzed from the linear regression relationship between the FD value to time during their lifetimes. Based on this research, the FD value of AR12192 was increasing with the range of 1.31 to 1.52, but the FD value of AR12209 was decreasing with the range of 1.12 to 1.35. These results implied that the complexity level of AR12192 is greater at the beginning than at the end of its total evolution.

Keywords: *Sunspot – Evolution – Fractal*

1 INTRODUCTION

Sunspots are the region of the solar surfaces with a strong magnetic field that generally appear in groups called active regions (ARs). The strong magnetic field on sunspots triggers lots of solar energetic activities, such as solar flares and coronal mass ejections (CMEs). Sunspots within AR are evolving which indicates the magnetic field inside the AR is changing throughout their lifetime.

The evolution of sunspot groups is generally based on the size of AR and the magnetic complexity (Loughhead & Bray, 1961, and related literature therein; McIntosh, 1990; McAteer et al., 2005, and related literature therein). A previous study by (Loughhead & Bray, 1961; McIntosh, 1990; Klicik et al., 2018, and related literature therein) noted that larger and more complex ARs produce numerous and higher energy of solar flares. The size of an AR is evolving throughout its lifetime. It is increasing at the beginning of its evolution until it reaches the maximum value of the total area, and then decreasing at the end of its evolution. Also, the magnetic complexity of an AR is increasing at the beginning and then decreasing at the end of its evolution. It is implied that the evolution of sunspot groups determined the productivity of solar flares.

The complexity level of an AR's image can be measured using the fractal dimension (FD) that was initially introduced by Mandelbrot (1983). FD is the complexity level of a fractal object. A fractal geometry object is an object that has roughness and irregular shape of the geometric structure with infinitely complex and has the self-similarity of a

shape across multiple size scales. The study of FD is used to analyze the complexity and quantification of irregular shapes of the geometric structure, in this case, sunspot group or AR (Zaffar et al., 2020). The FD of the AR's image is determined by the magnetism aspect. It was characterized by the penumbral indebtedness of the sunspot (Milovanov & Zelenyi, 1992).

This study analyzes the total evolution of AR12192 as the largest sunspot group on the 24th solar cycle using FD. AR12192 occurred on October 18, 2014, and reemerged as the recurrent sunspot (RS) which is AR12209 that occurred on November 13, 2014. In this study, the measuring of FD value of each ARs was using the box-counting method. Further, the analysis of FD values of each ARs during their lifetime is not only a predictor of their evolution but also associated with solar energetic events like solar flares.

2 METHODS

The data of sunspot groups evolution in this research is originated from the solar disc images that consist of AR12192 and AR12209. The images of each ARs were taken from the database Institute D'Astrophysique Spatiale (IAS) SDO using an HMI Continuum filter. The images of each ARs measured on heliographic longitude ≤ 60 degrees to minimize the projection effect that starts from October 19, 2014 to October 27, 2014 for AR12192 and November 16, 2014 to November 23, 2014 for AR12209. Figure 1 consists of sample images of AR12192 and AR12209 which are used in this research.

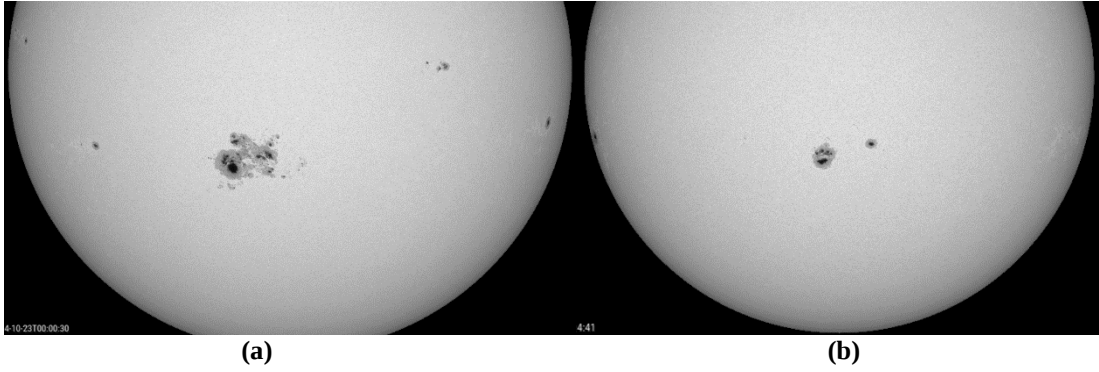


Figure 1. Images of AR12192 (a) and AR12209 (b) that took from IAS SDO using an HMI Continuum filter.

AR12192 showed six X-class solar flares during its passage. But, it only released four X-class solar flares considering the projection effect. Instead, the AR12209 did not trigger any X-class solar flares, only C-class. However, AR12192 was more active than AR12209 as the Recurrent Sunspot group (RS) of AR12192. Therefore, study about sunspot group's evolution is vital to predict solar flares.

The analysis of sunspot groups evolution in this research is carried out by observing the linear regression relationship between FD value against time for each ARs during their lifetime using python Spyder. The FD value was measured by the box-counting method from ImageJ software.

Generally, FD represents the complexity level of a complex object that has a roughness, fragmentation pattern, and irregular shape of the geometric structure. It has the self-similarity of a shape across multiple size scales. The Hausdorff–Besicovitch box dimension or simply box-counting method is one of the techniques to calculate the FD (Zaffar et al., 2020). The box-counting method samples an image and counts how many boxes with a specific dimension can cover up the image. The process is repeated with different box dimensions and the rate of the number of box that can cover the image will define its dimension. The FD value is obtained from the slope of the curve between the log number of boxes (N) as the y-axis and the log scale of the box size (ϵ) as the x-axis. The FD of an object can be calculated by taking a ratio between the log number of the box (N) and log (ϵ) that can be express mathematically as,

$$FD = \frac{\log N}{\log \epsilon}. \quad (1)$$

Note that a higher FD value represents a higher complexity of the image. Besides, FD expresses the space-filling property of the data whereas, the Hurst exponent (HE) is used to represent the smoothness

of the data in this research (Hassan et al., 2014). The relation between FD and HE expressed as follows,

$$FD = 2 - HE. \quad (2)$$

HE lies between 0 to 1. Considering the relationship of FD and HE, HE particularly compares persistence, anti-persistence, and Brownian nature of the time series data (Salakhutdinov et al., 1998; Hassan et al. 2014; Zaffar et al. 2020). If HE value approaches 1, the data is quasi-regular (persistent). If it approaches zero, the data is irregular (anti-persistent). Meanwhile, HE=0.5, the data represented as a Brownian process.

3 RESULTS AND DISCUSSION

This research was conducted to analyze the evolution of AR12192 and AR12209. The analysis is based on FD using the box-counting method for both ARs during their lifetime. Linear regression is also performed to correlate the relationship between FD values to the days of the year (doy) for both ARs. Otherwise, HE used to define the natural behavior of the data.

Figure 2 presents the change of FD value with respect to the doy for AR12192 together with the linear regression along its lifetime. It shows that the FD value of AR12192 ranges from 1.31 to 1.52 with mean value is 1.46. Therefore, the HE value of AR12192 ranges from 0.69 to 0.48 with mean value of 0.585. It indicates that the FD value of AR12192 is persistent. Meanwhile, the linear regression line has an equation as follows,

$$y = (12.1 \pm 3.5) \times 10^{-3} x + (-2.1 \pm 1.0), \quad (3)$$

where y is FD value and x is doy. From that equation, the correlation of FD value to doy of AR12192 is represented by its gradient. The value of the gradient

is $(12.1 \pm 3.5) \times 10^{-3}$. It means that the FD value to the time of AR12192 has a positive correlation.

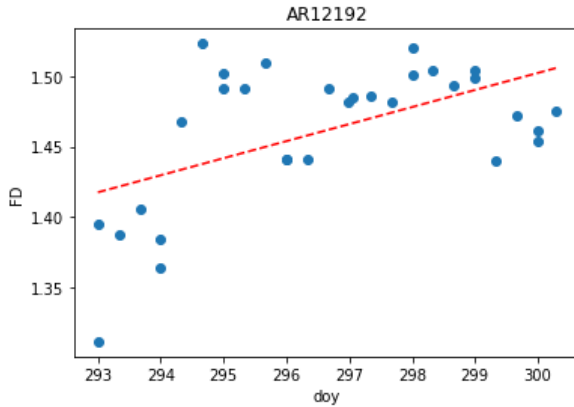


Figure 2. Linear regression relationship between FD value against day of AR12192.

Whereas, Figure 3 shows the change in FD value with respect to the change of the day for AR12209. Based on the data, the FD value of AR12209 ranges from 1.12 to 1.35 with mean value is 1.27. So, the HE value of AR12209 has range from 0.65 to 0.88 with mean value of 0.765 which indicates the data of AR12209 is persistent. Meanwhile, the linear regression line of AR12209 has an equation as follows,

$$y = (-5.6 \pm 4.6) \times 10^{-4} x + (-1.5 \pm 1.5), \quad (4)$$

where y is FD value and x is day. The gradient of the linear regression equation is $(-5.6 \pm 4.6) \times 10^{-4}$ which means the correlation of FD value to time on AR12209 data has a negative correlation.

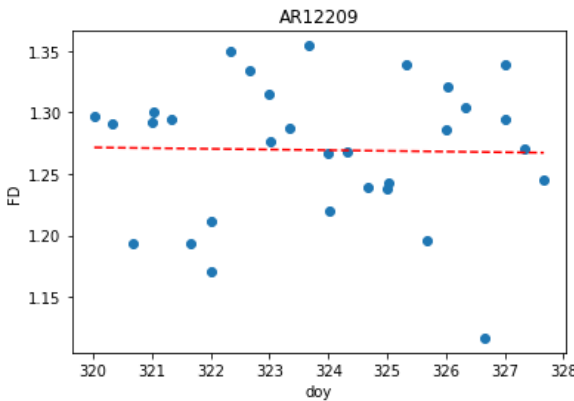


Figure 3. Linear regression relationship between FD value against day of AR12209.

Based on those results, the complexity level of AR12192 is increasing during its lifetime which is shown from the positive value of the gradient. Besides, AR12209 as the RS of AR12192 was

decreasing during its lifetime which is shown from the negative value of the gradient. That means the FD value or complexity level of AR12192 for total evolution was increasing in the beginning and decreasing at the end of its evolution. The range for the total evolution of AR12192 is from 1.12 to 1.52 with mean value about 1.37. It has a similar range as the previous study by (Zaffar et al., 2020) that had a range of AR12192 from 1 to 1.5 for its total evolution. They also used the Hausdorff-Besicovitch box dimension and correlation dimension for their research. Based on that result, they interpreted that AR12192 is persistent and correlated. Other studies by (Herdiwijaya and Indradjaja, 2002) found that the FD value for sunspot groups from January 1749 until December 2000 had a range from 0.5 to 1.5. They interpreted that the granulation dimension of the Sun correlated to the maximum area in its interior. Simply, the study of the solar cycle also can be analyzed using FD of the sunspots.

In this research, the mean value of FD is about 1.37. Another research by (Milovanov and Zelenyi, 1992) found the mean value of sunspots FD is about 1.24. This research has a higher value of FD than that from the previous research. It is because AR12192 is the largest sunspot on the 24th solar cycle and was ranked as the 33rd largest region out of 32908 ARs since 1874. So, it has a more complex texture than other sunspots in general.

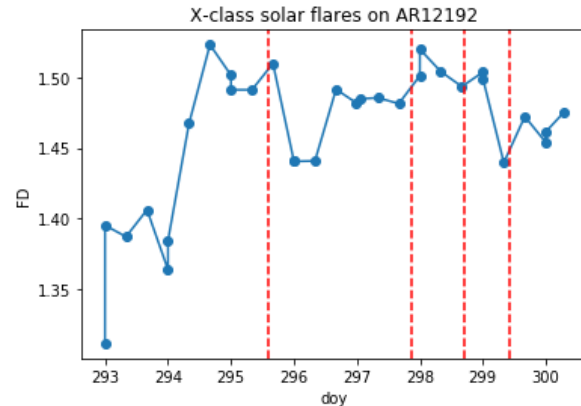


Figure 4. Plotting data of X-class solar flares which occurred on AR12192. The dash-line represent the occurring time of X-class flares.

AR12192 as the largest sunspot group also produced many solar flares including X-class solar flare. It produced six X-class solar flares during its passage, but only four X-class solar flares that conducted due to the consequence of the projection effect, namely X1.6 on October 22, 2014, X3.1 on October 24, 2014, X1.0 on October 25, 2014, and

X2.0 on October 26, 2014. It indicates that AR12192 is more active than AR12209 that only produced C-class solar flares. It can also be interpreted that AR12192 which has a higher value of FD would produce energetic solar flares than the smaller one. Figure 4 shows the relationship of FD value to the day with detection of X-class solar flares on AR12192. Based on the plotted data, this research found that the X-class solar flares on AR12192 occurred when the FD value $> \sim 1.42$. Previous studies by (McAteer et al., 2005) found that X-class flares require a minimum FD value=1.25. Other results from minimum FD value for M-class flares was also performed and it requires FD value=1.2. Their research also used the box-counting method to measure the FD value. So, it indicates that this result is compatible.

Other research by (Dominguez et al., 2014) who studied the complexity of geomagnetic – a solar magnetic activity made a conclusion that the FD value of solar magnetic is correlated with solar activity indexes, such as solar flare or CME. Therefore, a study about FD is also evidenced as guidance to predict solar energetic activity.

4 CONCLUSIONS

This study reveals the evolution of AR12192, AR12209, and the total evolution of AR12209 based on the FD value using the box-counting method. The FD value represents the complexity and roughness of the image of each ARs. Based on this research, the FD value of AR12192 was increasing with the range of 1.31 to 1.52, the FD value of AR12209 was decreasing with the range of 1.12 to 1.35. Therefore, the FD value for AR12192 total evolution has a range from 1.12 to 1.52. These results implied that the complexity level of AR12192 is greater at the beginning than at the end of its total evolution. The FD value depends on the magnetic aspects of the sunspot groups which show from the area of AR, the

number of sunspots on AR, etc. The study about FD value also allows us to use it as the guidance to predict solar energetic activities, in this case, solar flares. Hence, analysis on FD value of AR is compatible to use for studying sunspot groups evolution. Furthermore, it can be used for predicting solar energetic activities.

5 REFERENCES

- Bhatnagar, A. & W. Livingston. 2005, *Fundamental of Solar Astronomy Vol. 6, Ch. 5 : the Active Sun*, World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., Singapura
- Bray, R. J. & R. E. Loughhead, 1964, *Sunspots*, Pitman Press, London
- Chen, H., Zhang, J., Ma, S., Yang, S., Li, L., Huang, X., & Xiao, J., 2015, *ApJL*, 808:L24, 8pp
- Dominiguez, M., Munoz, V., & Valdivia, J. A., 2014, *J. Geophys. Res. Space Physics*, 119, 3585-3603
- Hassan, D., Abbas, S., Ansari, M. R. K., & Jan, B., 2014, *Proc. Of Pakistan Academy of Sciences*, 51, 345-355
- Herdiwijaya, D., & Indradjaja, B., 2002, *Kontribusi Fisika Indonesia*, 13, 8pp
- Kilcik, A., Yurchyshyn, S., Sahin, S., Sarp, V., Obridko, V., & Ozguc, A., 2018, *MNRAS*, 477, 293-297
- Mandelbrot, B. B., 1983., *The Fractal Geometry of Nature*, W. H. Freeman and Company, New York
- McAteer, R. T. J., Gallagher, P. T., & Ireland, J., 2005, *The Astrophysical Journal*, 631, 628-635
- McIntosh, P. S., 1990, *Solar Physics*, 125, 251-267
- Milovanov, A. V., & Zelenyi, L. M., 1992, *Geophys. J Res. Letter*, 19, 1419-1422
- Müller, D., Nicula, B., Felix, S., Verstringe, F., Bourgoignie, B., Csillaghy, A., Berghmans, D., Jiggins, P., Garía-Ortiz, J. P., Ireland, J., Zahniy, S., & Fleck, B., 2017, *Astronomy & Astrophysics* 606, 1-13pp
- Rajkumar, B., Haque, S., & Hruday, W., 2017, *Solar Physics*, 292:170, 1-16
- Salakhutdinova, I.I., 1998, *Sol. Phys*, 181, pp. 221-235
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W., 2012, *Nat. Methods*, 9, 671-675
- Zaffar, A., Abbas, S., & Ansari, M. R. K., 2020, *Solar System Research*, 54, pp. 353-359

Pengamatan Rotasi Jupiter di Observatorium Astronomi Sunan Ampel Surabaya

M. A. Humam^{1*}, N. Sopwan², dan A. A. Yusuf³

¹ Program Studi Ilmu Falak UIN Sunan Ampel Surabaya

² Ilmu Falak UIN Sunan Ampel Surabaya

³ Observatorium Astronomi ITERA Lampung

*E-mail: m.akbarulhumam@gmail.com

ABSTRAK

Observatorium Astronomi Sunan Ampel (OASA) adalah observatorium di bawah naungan Laboratorium Fakultas Syariah dan Hukum UIN Sunan Ampel Surabaya (LAB FSH UINSA). OASA merupakan fasilitas astronomi Program Studi Ilmu Falak UIN Sunan Ampel Surabaya. Salah satu observasi yang telah dilakukan OASA adalah dua kali observasi Rotasi Jupiter. Observasi pertama dilakukan di Malang pada tanggal 25-26 Juni 2020 selama 5 jam menggunakan teleskop reflektor Celestron 130 mm (f/10) dengan kamera ZWO ASI 120MC-S. Observasi kedua dilakukan di Surabaya pada tanggal 24-25 Agustus 2021 selama 10 jam, menggunakan teleskop Meade LX-600 12 inci (f/10) dengan kamera ZWO ASI 120MC-S. Pengolahan citra menggunakan piranti lunak Planetary Imaging PreProcessing (PIPP), Autostakkert 3 (AS!3), dan Registax. Dari hasil pengukuran yang dilakukan, kami mendapatkan periode rotasi Jupiter adalah sekitar 09 jam 13 menit.

Kata Kunci: OASA, Rotasi Jupiter, *Planetary Imaging*.

1 PENDAHULUAN

Observatorium Astronomi Sunan Ampel (OASA) merupakan observatorium yang berada di Universitas Islam Negeri Sunan Ampel terletak pada *rooftop* lantai 10 Gedung Pascasarjana UINSA dengan koordinat geografis 7°19' Lintang Selatan dan 112° 44' Bujur Timur serta ketinggian 40 mdpl. OASA dan diresmikan oleh rektor UINSA Surabaya Prof. Masdar Hilmy, S.Ag., MA, Ph.D pada hari Jumat, 09 April 2021.



Gambar 1. Sampel citra final planet Jupiter hasil pengamatan tanggal 25-26 Juni 2020 di Malang.

Sebagai salah satu fasilitas astronomi bagi Mahasiswa dan Dosen Program Studi Ilmu Falak Fakultas Syariah dan Hukum UIN Sunan Ampel

Surabaya, OASA melayani kebutuhan praktik pembelajaran ilmu falak berupa penentuan arah kiblat, rukyatul hilal, serta observasi gerhana Matahari dan Bulan. Pengamatan astronomi guna media pembelajaran astronomi dasar menjadi kegiatan baru yang dilaksanakan semenjak diresmikannya OASA.

Instrumentasi optik yang dimiliki oleh OASA antara lain adalah 2 buah teleskop Meade LX600 ACF 12 inci (f/10), Celestron 130mm (f/10) dan Celestron SCTW-70, kamera ZWO ASI120 MC-S, Svbonny SV105 Planetary Camera, dan Nikon D7200, yang menjadi alat penunjang pengamatan astronomi. Salah satu pengamatan astronomi yang telah dilakukan oleh mahasiswa dan dosen di OASA adalah pengamatan planet Jupiter guna mengukur periode rotasi planet Jupiter.

2 PENGAMATAN ROTASI JUPITER DI OASA

Pengamatan pertama rotasi Jupiter yang merupakan ajang uji coba instrument sebelum didirikannya OASA. Pengamatan kedua rotasi Jupiter dilaksanakan setelah diresmikannya OASA sebagai media pembelajaran astronomi bagi Mahasiswa.

Pengamatan pertama rotasi Jupiter dilakukan selama 4 jam 40 menit pada 25 Juni 2020 pukul 22:30 WIB hingga 26 Juni 2020 pukul 03:10 WIB di Kota Malang dengan koordinat : 07° 56' 63,63" Lintang Selatan dan 112° 35'14.36" Bujur Timur. Intrument yang digunakan ialah teleskop Celestron 130mm (f/10) disertai Barlow Celestron 2x



Gambar 2. Sampel citra final Planet Jupiter pengamatan tanggal, 24-25 Agustus 2021 di OASA

menggunakan kamera ZWO ASI120 MC-S dengan mounting iOptron AZ Mount Pro. Sampel citra final yang diperoleh sebagai berikut:

Pengamatan kedua terhadap rotasi Jupiter dilaksanakan selama 10 jam 40 menit pada 24 Agustus 2021 pukul 18:00 WIB hingga 25 Agustus 2021 pukul 04:40 WIB di OASA dengan koordinat : 7°19' Lintang Selatan dan 112° 44' Bujur Timur. Instrumen yang digunakan ialah tabung teleskop serta *mounting* Meade LX600 12 inci (f/10) menggunakan kamera ZWO ASI120 MC-S. Hasil akhir dari sampel citra yang diperoleh dapat dilihat pada Gambar 2.

Pengambilan citra pengamatan pertama dan kedua dengan interval 20 menit tiap citranya direkam menggunakan aplikasi SharpCap dengan *output format*: *.ser serta *Colour Space*: RAW 16 dengan *exposure* yakni lamanya waktu kamera mengumpulkan cahaya dan foton untuk setiap *frame*, dan *gain control* yakni pengatur kecerahan (*brightness*) citra harus selalu diatur agar *Histogram Stretch* tidak melebihi ambang tengah. Jumlah *frame* tiap citra pada pengamatan pertama adalah 10.000 buah dan pada pengamatan kedua ialah 5.000 buah. Pengambilan citra *flat* juga dilakukan untuk meningkatkan kualitas citra.

3 IMAGE PROCESSING

Olah citra Planet Jupiter dilakukan dengan teknik *Lucky Imaging* yaitu teknik pencitraan menggunakan kamera berkecepatan tinggi dengan waktu paparan cukup singkat 100 milidetik atau kurang, Proses yang dilakukan adalah sebagai berikut:

3.1 Pre-Processing

Pre-Processing adalah teknik yang digunakan untuk mengubah data mentah menjadi format yang berguna dan efisien. Olah citra pada langkah *Pre-Processing* ini menggunakan piranti lunak *Planetary Imaging Pre-processor* (PIPP), Olah citra dilakukan dengan:

1. Memfilter dan mempertahankan 50% citra terbaik
2. Mengatur agar pusat citra berada di pusat frame
3. Mengkonversi format file “.ser” menjadi “.avi”

3.2 Processing

Processing dilakukan dengan menggunakan dua piranti lunak yakni Autostakkert3 (AS!3) dan Registax 6. Langkah olah citra dengan Autostakkert3 adalah sebagai berikut:

1. Memfilter dan mempertahankan 50% citra terbaik
2. Menyesuaikan ukuran citra dengan fitur *Crop*
3. Melakukan proses *Stacking* dengan mode *Double Stack Reference* yaitu teknik olah citra dengan teknik 2 kali proses agar citra yang dihasilkan lebih berkualitas.
4. Menyimpan file output berformat “.fit”

Setelah dilakukan olah citra pada Autostakkert3 kemudian citra diolah pada Registax 6 dengan langkah sebagai berikut:

1. Mempertajam kualitas citra dengan fitur *Wavelet Filter* yakni teknik proses citra agar hasil citra lebih tajam.
2. Mencocokkan warna citra dengan fitur *RGB Align* yakni mengkalibrasi warna dasar (merah, hijau dan biru) pada citra.
3. Merotasi citra agar memiliki orientasi yang sama
4. Menyimpan file output berformat “.png”

3.3 Post-Processing

Langkah akhir olah citra adalah Post-Processing pada aplikasi Adobe Photoshop CS6 dengan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menyusun citra sesuai waktu pengamatan
2. Memberi penanda waktu pada setiap citra
3. Memberi *watermark*
4. Menggabungkan setiap citra menjadi *Time Lapse* lalu menyimpan hasil akhir ke format “.mp4”

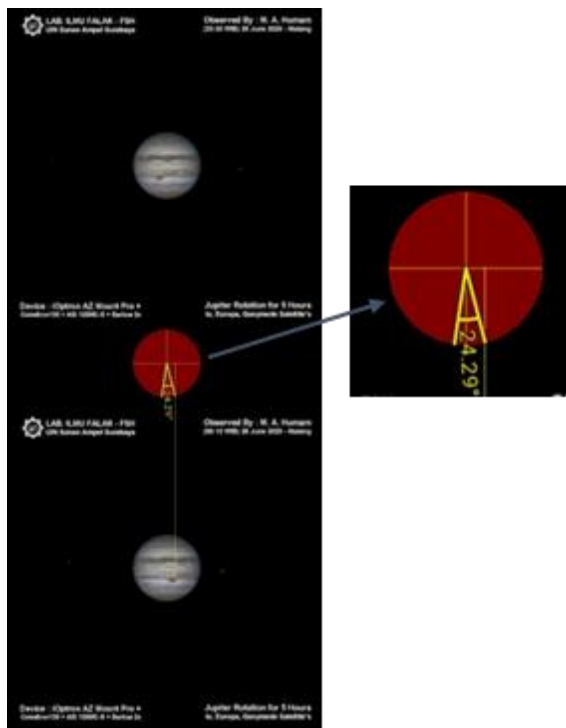
4 PENGUKURAN ROTASI JUPITER

Periode rotasi Jupiter diukur dari sekumpulan citra final, menggunakan piranti lunak “ImageMeter-Photo Measure” pada gadget *Smartphone* berbasis *Operating System* Android. Proses pengukuran yang dilakukan sebagai berikut:

1. Meletakkan citra planet Jupiter pada posisi seperti yang tertera pada Gambar 3 dan Gambar 4.
2. Mengukur besar sudut (r) yang dibentuk oleh GRS saat tepi kiri GRS berada pada posisi tepi kanan GRS.
3. Mengukur lama waktu (i) yang diperlukan GRS saat tepi kiri GRS berada pada posisi tepi kanan GRS.
4. Menghitung periode rotasi planet Jupiter, P , yang mengikuti persamaan: $P = \frac{(360^\circ \cdot i)}{r} t$

4.1. Pengukuran Periode Rotasi Jupiter pada Citra 25-26 Juni 2020

Pengukuran periode rotasi planet Jupiter yang dilakukan tanggal 25-26 Juni 2020, diperoleh sudut rotasi planet Jupiter adalah $r = 24,29^\circ$ dan $i = 40$ menit. i dihitung ketika GRS berada 20 menit sebelum dan sesudah melewati titik pusat planet Jupiter. Berdasarkan pengukuran sudut rotasi planet Jupiter, diperoleh hasil bahwa periode rotasi planet Jupiter P adalah 9 jam 52 menit 50 detik, yaitu melalui proses pengukuran sebagai berikut:

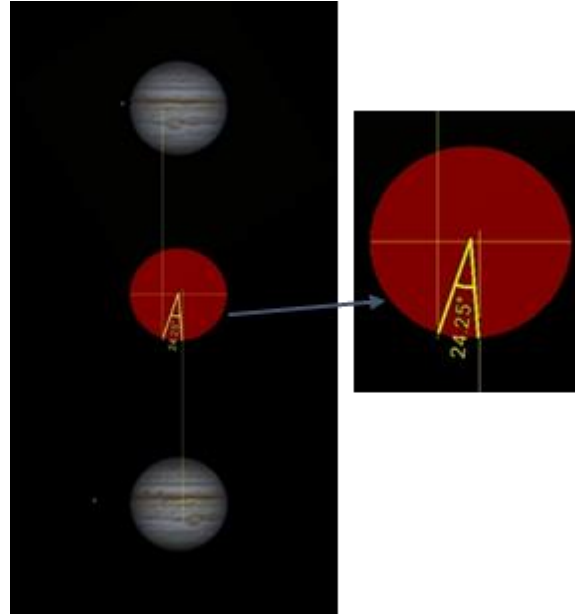


Gambar 3 Proses pengukuran periode rotasi Planet Jupiter Citra 25-26 Juni 2020.

4.2. Pengukuran Periode Rotasi Jupiter pada Citra 24-25 Agustus 2021

Pengukuran periode rotasi planet Jupiter yang dilakukan tanggal 24-25 Agustus 2021, diperoleh sudut rotasi planet Jupiter adalah $r = 24,25^\circ$ dan $i =$

40 menit. i dihitung ketika GRS berada 20 menit sebelum dan sesudah melewati titik pusat planet Jupiter. Berdasarkan pengukuran sudut rotasi planet Jupiter diperoleh hasil bahwa periode rotasi planet Jupiter adalah 9 jam 53 menit 48 detik, yaitu melalui proses pengukuran sebagai berikut:



Gambar 4 Proses pengukuran periode rotasi Planet Jupiter citra 24-25 Agustus 2021.

5 AKURASI PENGUKURAN ROTASI

Guna mengetahui nilai keakuratan pengukuran periode rotasi planet Jupiter, penulis membandingkan hasil pengukuran dengan data pembandingan periode rotasi pada *Great Red Spot* yakni pada sistem II periode rotasi planet Jupiter oleh *Website Universe Today* serta data pembandingan oleh *Britannica* melalui websitenya disajikan pada tabel berikut ini dalam format (jam:menit:detik):

Tabel 1. Perbandingan nilai periode rotasi Jupiter antara hasil yang diperoleh oleh OASA, Universe Today dan Britannica.

Nilai Periode Rotasi Jupiter		
OASA	Universe Today	Britannica
09:53:48	09:55:00	09:55:41

Dalam penelitian ini terdapat perbedaan antara hasil pengukuran OASA dengan data pembandingan yang diambil dari *Website Universe Today* dan *Britannica*. Jika dibandingkan dengan Universe Today perbedaannya adalah 01 menit 12 detik (0,12%). Jika dibandingkan dengan *Britannica* 01 menit 52 detik (0,18%).

Hasil selisih pengukuran ini disebabkan oleh beberapa faktor antara lain:

1. Pengukuran sudut rotasi hanya menggunakan bantuan aplikasi dari *Smartphone* Android dan pemilihan titik ukurnya hanya secara visual sehingga terdapat kemungkinan perbedaan titik ukur pada pengukuran 1 dan pengukuran 2.
2. Pencatatan waktu pada saat pengambilan citra memiliki kemungkinan terdapat perbedaan sinkronisasi waktu pada tiap citranya dalam komputer.

6. KESIMPULAN

- 1 Terdapat perbedaan hasil pengukuran OASA dengan data oleh Universe Today dan Britannica disebabkan oleh pemilihan titik ukur dan sinkronisasi waktu komputer.
- 2 Hasil pengukuran OASA terdapat perbedaan 01 menit 12 detik (0,12%) dengan Universe Today dan 01 menit 52 detik (0,18%) dengan Britannica.

Ucapan Terima Kasih

Kami menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah mendukung yakni panitia Seminar Panorama Antariksa Prodi Astronomi ITB 2021 serta pengelola Observatorium Astronomi Sunan Ampel (OASA)

7. PUSTAKA

- Autostakkert Creator's, 2016, Feature and Guides, <https://www.autostakkert.com/wp/guides/>, diakses pada Agustus 2021
- Legault, T. 2014. Astrophotography. Rock Nock Inc.
- Linda, T. 2015 Jupiter And Saturn. Chelsea House.
- PIPP Creator's, 2014, PIPP Manual, <https://sites.google.com/site/astropipp/pipp-manual>, diakses pada Agustus 2021
- Registax Creator's, 2011, RegiStax 6 Preview, <https://www.astronomie.be/registax/previewv6-1.html>, diakses pada Agustus 2021
- Tobias Chant Owen, 2018, Jupiter, <https://www.britannica.com/place/Jupiter-planet/Cloud-composition>

Pengamatan Bintang Ganda dengan *Bosscha Robotic Telescope*

M. Yusuf* dan Y. Yulianty

Observatorium Bosscha, FMIPA, Institut Teknologi Bandung

*E-mail: yusuf@as.itb.ac.id

ABSTRAK

Pengamatan bintang ganda visual menjadi topik penelitian utama di sepanjang sejarah Observatorium Bosscha, Teleskop 60 cm Refraktor Ganda Zeiss di Observatorium Bosscha menjadi teleskop utama yang digunakan untuk pengamatan bintang ganda. Berpandu kepada daftar bintang ganda yang dimiliki Observatorium Bosscha (Jasinta, 1997), kami seleksi bintang-bintang ganda beresolusi cukup besar (separasi $> 5''$ dan delta mag < 3 mag) untuk diamati teleskop robotik 35 cm, Bosscha Robotic Telescope (BRT), Sistem robotik dan *scheduling* pada BRT terbukti memberikan efisiensi pengambilan data dimana dari uji pengamatan, data 20 bintang ganda dapat diperoleh dalam periode 2 malam pengamatan. Dengan upaya yang dibangun ini, diharapkan produktivitas pengamatan bintang ganda di Observatorium Bosscha akan lebih meningkat,

Kata Kunci: *Teleskop Robotik – Bintang Ganda*

1 PENDAHULUAN

Observatorium Bosscha telah banyak mengambil peran dalam pengamatan bintang ganda visual sejak tahun 1920, Faktanya, Teleskop Refraktor Ganda Zeiss secara khusus dipesan untuk dapat mengakomodir pekerjaan astrometri bintang ganda, Aktivitas pengamatan bintang ganda dengan Teleskop Zeiss telah menghasilkan sebanyak 5,432 pasang bintang ganda (Jasinta, 1997) dengan ragam jumlah titik pengamatan untuk setiap pasang bintangnya.

Setelah dilakukan *crosscheck* pada kompilasi data tersebut dengan data GAIA, ditemukan sebanyak 2,073 pasang bintang terkonfirmasi kegandaan fisisnya (Imaduddin, 2021) sementara 129 pasang terkonfirmasi bukan merupakan bintang ganda. Selain itu, ada 226 pasang bintang dengan status mungkin sementara 3,005 pasang lain belum diketahui status kegandaannya.

Banyaknya pasang bintang ganda yang belum terkonfirmasi memunculkan potensi pekerjaan lanjutan pengamatan bintang ganda di Observatorium Bosscha.

Dengan mode gerak teleskop yang masih manual dan jumlah malam cerah di Observatorium Bosscha yang tidak banyak membuat upaya akuisisi data bintang ganda menggunakan Teleskop Zeiss menjadi pekerjaan yang menuntut dan menghabiskan waktu.

2 BOSSCHA ROBOTIC TELESCOPE

Moderinisasi teleskop dan pengembangan sistem teleskop robotik di Observatorium Bosscha telah membuahkan hasil yang positif (Yusuf, 2019), Teleskop 35 cm BRT merupakan satu-satunya teleskop modern di Observatorium Bosscha yang

telah berfungsi secara penuh dengan mode robotik, Teleskop cermin ini telah digunakan untuk berbagai pekerjaan diantaranya untuk pengamatan eksoplanet dengan fotometri transit sebagai follow-up dari pengamatan TESS, pengamatan bintang variabel, dan pengamatan asteroid.

Memanfaatkan sistem guiding dan *scheduling* pada BRT yang telah *robust*, kami melihat masih terdapat potensi yang cukup besar untuk mengoptimalkan jendela waktu malam cerah untuk digunakan pengamatan bintang ganda.

Melalui beberapa tahapan pekerjaan di bawah ini, kami mencoba menyeleksi bagaimana kemungkinan pengamatan bintang ganda dapat dilakukan oleh BRT dan upaya membangun program pengamatan bintang ganda dengan BRT. Seleksi bintang dilakukan dengan kriteria:

- 1 Penyaringan Objek, Dari jumlah pasang bintang ganda dengan status mungkin dan belum diketahui kegandaannya, kami melakukan seleksi objek dengan kriteria yang dapat diakomodir oleh BRT, yaitu memiliki separasi sudut > 5 derajat dan delta magnitude < 3 mag, Hal ini meninggalkan bintang-bintang dengan sudut separasi yang lebih kecil untuk tetap dapat diamati oleh Teleskop Zeiss, Dari kriteria di atas didapatkan 408 pasang bintang;
- 2 Jumlah Objek per Bulan, Pengamatan objek dilakukan ketika berada di sekitar meridian, Dari 408 pasang bintang, ditemukan rata-rata 30 objek per bulan yang dapat diamati oleh BRT, Melalui batasan *scheduling* BRT yaitu bergantung kepada *airmass* atau jarak horison didapatkan dalam rentang tersebut bisa didapatkan 20 data per objek dengan 20 pasang bintang per malam.

2.1 BRT Scheduler

Langkah berikutnya dilakukan penyusunan database bintang yang akan diamati oleh BRT dan membangun *scheduler*. Pada *database* dimasukan input objek, koordinat, magnitudo, separasi, sudut posisi, waktu eksposur, filter. Dengan Skrip kemudian akan mengubah *database* menjadi format RTML untuk kemudian dimasukan sebagai job pada *scheduler* dengan menggunakan RTML.

3 PENGOLAHAN DATA

Pada uji pengamatan bintang ganda, data pengamatan akan diolah dengan *plate solve astrometry* dan Astro ImageJ.

4 HASIL PENGUKURAN

Melalu uji pengamatan yang dilakukan selama 2 malam, telah berhasil dilakukan pengamatan sebanyak 39 pasang bintang. Diperoleh data pengukuran seperti pada Tabel 1, Hasil komparasi dengan pengukuran data sebelumnya (kolom Tahun Pengamatan Terakhir) memberikan hasil yang positif.

5 KESIMPULAN

Dari uji pengamatan bintang ganda, BRT dapat mengambil peran pada pengamatan bintang ganda dengan parameter separasi 5 detik busur dan delta magnitudo 3 mag. Pengamatan dengan teleskop kecil sangat menjanjikan untuk dilanjutkan sebagai pendukung pengamatan bintang ganda yang dilakukan oleh Teleskop Zeiss di Observatorium Bosscha. Untuk selanjutnya, dapat dibuat sistem teleskop robotik modern dengan parameter yang lebih ideal untuk meningkatkan produktifitas pengamatan bintang ganda.

6 PUSTAKA

- Jasinta D., Raharto, M., Soegiartini, E., 1999, *Photographic observations of visual double stars*, Astronomy and Astrophysics Supplement Series,
- Yusuf, M., Mahasena, P., Jatmiko, A., 2019, *Bosscha Robotic Telescope (BRT) - a 0,35 meter telescope on Bosscha Observatory*, Journal of Physics: Conference Series Vol, 1127 conference 1

Tabel 1. Hasil pengukuran sudut pisah dan sudut separasi.

WDS	Discovery Num	ρ (")	θ (°)	Tahun Pengamatan Terakhir	ρ (")	θ (°)
00523-4718	HJ 3403	$12,821 \pm 0,004$	$336,46 \pm 0,02$	VOU 1930,5	12,87	336,2
00057+1750	STF 3061	$7,754 \pm 0,011$	$149,04 \pm 0,10$	PAN 1985,6	7,65	147,7
00150+0849	STF 12	$11,378 \pm 0,021$	$147,07 \pm 0,07$	VAB 1952,6	11,50	147,92
00116-0305	STF 8	$7,92 \pm 0,001$	$291,67 \pm 0,5$	VAB 1953,0	7,88	291,88
23595-2631	LAL 193	$10,597 \pm 0,008$	$169,62 \pm 0,04$	VAD 1981,8	10,59	169,66
23544-2703	LAL 192	$6,378 \pm 0,012$	$271,55 \pm 0,10$	VOU 1926,6	6,80	269,0
23574-1606	HJ 5435 AB	$14,695 \pm 0,005$	$7,55 \pm 0,02$	JAS 1987,8	14,74	7,57
23574-1606	HJ 5435 BC	$23,888 \pm 0,010$	$52,969 \pm 0,03$	-	-	-
23574-1606	HJ 5435 AC	$17,139 \pm 0,012$	$90,61 \pm 0,04$	-	-	-
23135-4056	HJ 5387	$7,876 \pm 0,011$	$276,03 \pm 0,05$	WAL 1933,5	8,05	276,9
23050-5121	HJ 5382	$7,590 \pm 0,007$	$51,06 \pm 0,09$	VAD 1982,1	7,62	50,86
22257-4518	HJ 5335	$9,916 \pm 0,024$	$55,88 \pm 0,07$	VOU 1934,5	9,51	65,1
21304-3448	HJ 5274	$26,524 \pm 0,017$	$119,76 \pm 0,026$	VOU 1932,5	23,0	136,8
23301-1717	HJ 3197	$8,119 \pm 0,015$	$306,86 \pm 0,08$	VAD 1961,7	8,16	306,9
23239-5349	DUN 249	$26,424 \pm 0,018$	$212,03 \pm 0,02$	VAD 1981,7	26,45	211,99
23208-5018	DUN 248	$16,888 \pm 0,015$	$212,07 \pm 0,06$	JAS 1992,5	16,88	211,81
23072-5041	DUN 246	$8,907 \pm 0,015$	$253,74 \pm 0,04$	JAS 1995,5	8,82	255,49
23086-5944	DUN 245	$13,511 \pm 0,015$	$289,38 \pm 0,05$	WAL 1933,8	13,67	290,6
23441-2712	COO 259	$6,357 \pm 0,012$	$341,25 \pm 0,19$	JAS 1993,7	6,35	161,26
23009-2216	BU 179	$13,361 \pm 0,017$	$116,15 \pm 0,02$	THE 1952,1	13,30	116,30
00532-2447	WNO 1	$5,346 \pm 0,049$	$5,86 \pm 0,22$	VAD 1983,1	5,44	8,17
00080-1414	STF 3065	$9,625 \pm 0,012$	$289,92 \pm 0,05$	VAB 1955,1	9,65	109,07
00408-0714	STF 49	$8,954 \pm 0,016$	$321,72 \pm 0,08$	WAL 1933,6	7,11	319,1
00099+0827	STF 4	$4,979 \pm 0,02$	$275,30 \pm 0,18$	PAN 1984,9	5,28	274,97
00582-1541	S 390	$6,363 \pm 0,009$	$215,43 \pm 0,12$	VAD 1982,9	6,43	215,82
00315-6257	LCL 119	$26,976 \pm 0,011$	$168,29 \pm 0,04$	JAS 1990,6	26,96	168,42
21196-3929	I 438 AB	$5,158 \pm 0,027$	$179,06 \pm 0,09$			
21196-3929	I 438 BC	$12,573 \pm 0,014$	$220,21 \pm 0,09$			
00063-6414	I 433	$5,918 \pm 0,027$	$136,24 \pm 0,29$	VAD 1978,2	5,741	134,81
00540-2503	HJ 3407	$12,877 \pm 0,003$	$126,60 \pm 0,01$	PAN 1985,7	12,93	126,70
00426-5407	HJ 3388	$16,707 \pm 0,008$	$241,60 \pm 0,02$	THE 1953,4	16,76	240,19
00335-5520	HJ 3376 AB,C	$6,811 \pm 0,046$	$243,35 \pm 0,36$	WAL 1930,7	6,5	246
00276-3157	HJ 3367 AB	$5,229 \pm 0,008$	$178,98 \pm 0,06$	JAS 1987,7	5,29	178,92
00216-5232	HJ 3360	$17,527 \pm 0,005$	$54,26 \pm 0,02$	JAS 1988,7	16,30	48,36
00524-6930	DUN 2	$20,423 \pm 0,023$	$81,79 \pm 0,04$	THE 1953,8	20,42	81,79
00146-3604	HJ 3354	$17,075 \pm 0,005$	$334,88 \pm 0,02$	VOU 1934,6	17,12	334,7
00530-6105	GLI 4	$5,707 \pm 0,019$	$70,97 \pm 0,15$	WAL 1933,6	6,14	71
23476-6031	COO 261	$5,614 \pm 0,018$	$99,26 \pm 0,14$	VAD 1955,2	5,73	100,11
00493-2124	BU 301 AC	$10,975 \pm 0,007$	$298,70 \pm 0,02$	THE 1952,8	10,071	298,96

Skenario Evolusi Bintang Ganda Nova

A. R. Kusuma Putra^{1*}, M. Putra¹, Aprilia¹, M. I. Hakim¹, dan Y. Sugianto¹

¹Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: arifaldi13@gmail.com

ABSTRAK

Nova merupakan salah satu sub-kelas dari *cataclysmic variables* (CV) yang terdiri dari sebuah bintang katai putih dan bintang *late-type* bermassa kecil sebagai pasangannya. Sebagai CV, kedua bintang komponennya berjarak cukup dekat, sehingga bintang pasangan tersebut memenuhi *Roche lobe*-nya. Hal ini menimbulkan pertanyaan, bagaimana asal-usulnya sehingga terdapat sistem bintang dengan periode pendek dan salah satunya terdiri dari bintang katai putih, yang pada keadaan tertentu dapat digolongkan sebagai nova. Penelitian ini berusaha menjawab pertanyaan tersebut dari sisi evolusi bintang dengan beberapa pendekatan yang dilakukan. Digunakan program *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics* (MESA) sebagai alat komputasi untuk membuat simulasi evolusi bintang ganda *progenitor* nova. WY Sagittae dipilih sebagai pembanding jejak evolusi yang dibuat menggunakan MESA, dari 27 model dengan kombinasi parameter awal ($M_{1,i}$, $M_{2,i}$, dan P_i) yang berbeda. Hasil komputasi dari model yang “terbaik” dikaji lebih detail untuk melihat apa saja yang terjadi sepanjang evolusinya.

Kata Kunci: Nova – Progenitor – MESA

1 PENDAHULUAN

Nova, sebagai salah satu sistem bintang ganda jenis *cataclysmic variables* (CV), memiliki karakteristik sebagai bintang ganda berinteraksi yang memiliki periode pendek. Dengan salah satu komponennya yang merupakan *white dwarf* (WD), pada kondisi tertentu, transfer massa pada sistem bintang ini dapat menimbulkan nova. Salah satu pertanyaan yang timbul adalah seperti apa *progenitor* sistem bintang ini.

Seperti yang ditunjukkan oleh penelitian-penelitian sebelumnya (cth. Irawati et al., 2013; Ryosuke, 2017), kode program evolusi bintang dapat dipakai untuk mencari *progenitor* dari sebuah sistem bintang ganda. Penelitian ini ditujukan untuk melakukan simulasi komputasi mencari *progenitor* dari sebuah nova yang telah diketahui propertinya. Kode program evolusi bintang yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah MESA r12778 dengan modul MESA binary (Paxton et al., 2015). Variabel parameter awal *progenitor* nova yang digunakan adalah massa awal bintang primer ($M_{1,i}$), massa awal bintang sekunder ($M_{2,i}$), dan periode awal (P_i).

Karena keterbatasan perangkat untuk melakukan simulasi, beberapa asumsi digunakan untuk penyederhanaan. Asumsi yang digunakan pada penelitian ini yaitu: 1) sistem bintang merupakan sistem konservatif; 2) orbit lingkaran dipertahankan sepanjang evolusi; dan 3) WD yang terbentuk dianggap massa titik.

2 DATA DAN KOMPUTASI

Dari data parameter objek pembanding, penulis memperkirakan parameter awal sebagai tebakan

awal. Penulis menjalankan MESA binary dengan parameter awal tebakan tersebut. Melihat hasilnya yang dibandingkan dengan data objek pembanding, penulis membuat beberapa kombinasi parameter awal. Dari sana, seluruh kombinasi yang ada akan kembali menjadi parameter masukan untuk menjalankan MESA binary. Dengan membandingkan seluruh parameter keluaran dari seluruh kombinasi dengan parameter objek pembanding, diambil kombinasi parameter awal terbaik yang paling mendekati parameter keluarannya dengan objek pembanding.

Tabel 1. Tabel tabulasi data parameter WY Sge.

Parameter	Nilai	Satuan	Ref.
P	0,15363453	hari	a
SpT_2	M4 $\pm$ 1		b
M_{WD}	0,8	$M_{\odot}$	c
M_2	0,5-1.1	$M_{\odot}$	d
$\log L_2/L_{\odot}$	$0,268^{+0.021}_{-0.131}$	$M_{\odot}$	b
$\log L_2/L_{\odot}$	$-1,80^{+0.35}_{-0.75}$		b
$T_{eff,2}$	$3\,398^{+0.141}_{-0.114}$	K	b
R_2	$0,363^{+0.044}_{-0.161}$	$R_{\odot}$	b
$\dot{M}_{trans}$	7×10^{-9}	$M_{\odot}/\text{tahun}$	c

^aFuentes-Morales et al. (2021)

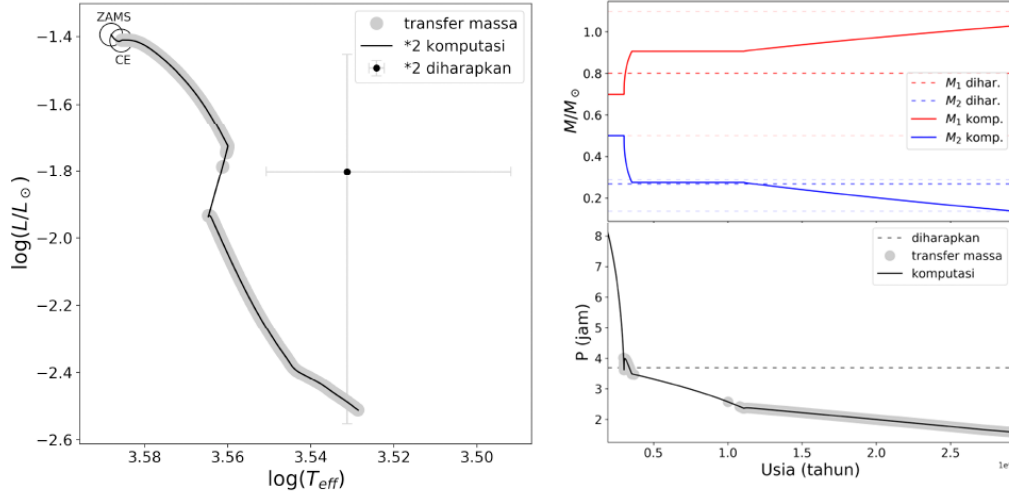
^bKnigge (2006)

^cSomers et al. (1996)

^dSomers et al. (1997)

2.1 Data Objek Acuan

Objek yang dijadikan acuan pada penelitian ini adalah WY Sge. Parameter yang diambil untuk dijadikan pembanding adalah periode (P), kelas spektrum bintang sekunder (SpT_2), massa WD (M_{WD}), dan rasio massa ($q = M_{WD}/M_2$). Kemudian



Gambar 1. Kedua panel merupakan hasil komputasi yang dilakukan MESA binary untuk parameter awal $M_{1,i} = 4.0M_{\odot}$, $M_{2,1} = 0.5M_{\odot}$, dan $P_i = 800$ hari. Panel sebelah kiri merupakan plot jejak evolusi bintang sekunder pada diagram H-R. Panel sebelah kanan merupakan plot jejak evolusi bintang, dari atas ke bawah berturut-turut, untuk parameter massa kedua komponen dan periode pada fase pasca-CE.

melalui deduksi data pengamatan pada literatur lain (Knigge, 2006), didapat luminositas bintang sekunder (L_2), temperatur efektif bintang sekunder ($T_{\text{eff},2}$), radius bintang sekunder (R_2), dan laju transfer massa ($\dot{M}_{\text{trans}}$). Data tersebut di-tabulasikan dalam Tabel 1.

2.2 Sistematika Penggunaan MESA

Penggunaan MESA binary dalam penelitian ini akan dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

5. *Fase pra-CE.* Dengan $M_{1,i}$, $M_{2,1}$, dan P_i sebagai parameter masukan dan radius bintang primer (R_1) mendekati radius *Roche lobe*-nya ($R_{\text{RL},1}$) sebagai *stopping condition*.
6. *Fase pasca-CE.* Dengan model bintang sekunder keluaran fase pra-CE beserta massa inti bintang primernya (sebagai WD yang digunakan selanjutnya sebagai massa titik) dan periode setelah CE (dijelaskan pada sub-bagian 2.3) sebagai parameter masukan. Lalu, $M_2 = 0.1$ sebagai *stopping condition*.

2.3 Mengakali Fase CE

MESA r12778 belum dapat menjalankan proses komputasi ketika fase CE berlangsung (Paxton et al., 2015). Sehingga, pendekatan analitik dibutuhkan untuk mengakalinya. Parameter yang berubah secara substansial akibat CE adalah jarak pisah. Maka, jarak pisah akan diubah sebagai parameter masukan fase pasca-CE. Perubahan itu dihitung dari persamaan (Willems & Kolb, 2004; Irawati et al., 2013)

$$\frac{A_f}{A_i} = \frac{M_c/M_1}{1 + 2M_e/M_2\alpha_{\text{CE}}\lambda r_L}, \quad (1)$$

dengan A_f dan A_i berturut-turut adalah jarak pisah orbit pada akhir fase pra-CE dan pada awal fase pasca-CE, M_c dan M_e berturut-turut adalah massa inti dan massa selubung bintang primer, serta α_{CE} dan λ diasumsikan bernilai 1.0 dan 0.5 (Davis et al., 2010; Irawati et al., 2013). Seluruh parameter tersebut diperoleh dari data keluaran komputasi pra-CE. Perhitungan A_f akan menjadi masukan parameter P pada fase pasca-CE.

2.4 Perkiraan Awal Parameter Progenitor

Dengan teori evolusi bintang ganda yang telah ada (cth. Iben, 1991), dapat dideduksi perkiraan parameter awal dari sebuah nova. Dengan parameter WY Sge yang telah dihimpun, perkiraan awal dari WY Sge adalah: $P_i = 900$ hari, $M_{1,i} = 4.0M_{\odot}$, dan $M_{2,i} = 0.5M_{\odot}$. Kemudian, MESA binary dijalankan dengan parameter masukan di atas. Hasil komputasinya di plot dalam Gambar 1. Untuk M_1 dan P , hasil komputasi mendekati dengan nilai yang diharapkan (nilai milik WY Sge) ketika sistem berada pada episode transfer massa pertama. Sementara, diagram HR dan M_2 meleset. Agar pada episode transfer massa pertama M_2 dapat melalui

Tabel 2. Tabel kombinasi parameter *progenitor*.

Parameter	Rentang Nilai			Satuan
P_i	800	900	1000	hari
$M_{1,i}$	3,0	4,0	5,0	$M_{\odot}$
$M_{2,i}$	0,3	0,4	0,5	$M_{\odot}$

nilai yang diharapkan, maka diperkirakan bahwa $M_{2,i}$ harus dikurangi. Lalu P_i diperkirakan lebih panjang, sehingga transfer massa dapat berlangsung lebih lama dan pada diagram HR, bintang lebih mendekati nilai yang diharapkan sebelum episode transfer massa pertama berhenti.

Tabel 3. Tabel properti kombinasi terbaik yang dibandingkan dengan data properti WY Sge.

Parameter	Hasil Komputasi	WY Sge
P_i (hari)	800	
$M_{1,i}$ ($M_\odot$)	4,0	
$M_{2,i}$ ($M_\odot$)	0,4	
$\chi_{\min}$	0,18675	
Model (n)	1426	
Usia (juta tahun)	287,8	
P_n (jam)	3,50230	3,687
$M_{WD,n}$ ($M_\odot$)	0,76137	0,800
$M_{2,n}$ ($M_\odot$)	0,33309	0,268
$(\log L_2/L_\odot)_n$	-1,63703	-1,803
$(\log T_{\text{eff}})_n$	3,56671	3,531
$(\log \dot{M}_{\text{trans}})_n$ ($M_\odot/\text{thn}$)	-8,17136	-8,155
$R_{2,n}$ ($R_\odot$)	0,37268	0,363

2.5 Kombinasi Parameter Progenitor

Dari hasil pada sub-bagian 2.4, dibuat beberapa kombinasi parameter di sekitar parameter perkiraan. Terdapat 27 kombinasi dan rentang parameternya ditabulasikan dalam Tabel 2. MESA binary kemudian dijalankan dengan keseluruhan kombinasi parameter tersebut.

Inlist MESA binary yang digunakan pada penelitian ini dapat diakses melalui laman <https://github.com/arifaldi13/evo-nova>.

2.6 Kombinasi Terbaik

Untuk menentukan kombinasi terbaik, parameter-parameter acuan yang disebutkan pada Bagian 1 dari data keluaran MESA binary dicocokkan dengan data objek pembandingan. Pencocokkan dilakukan dengan mencari jarak terdekat dari seluruh (tujuh) parameter yang ada untuk seluruh model dalam seluruh kombinasi. Mirip seperti apa yang dilakukan pada metode *chi-squared*, namun dengan tujuh dimensi. Jarak terdekat dari setiap model dihitung dengan pendekatan

$$\begin{aligned} \chi_n^2 = & (\Delta P_n)^2 + (\Delta M_{1,n})^2 + (\Delta M_{2,n})^2 \\ & + (\Delta R_{2,n})^2 + (\Delta (\log L_2)_n)^2 \\ & + (\Delta (\log T_{\text{eff}})_n)^2 \\ & + (\Delta (\log |\dot{M}_{\text{trans}}|)_n)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

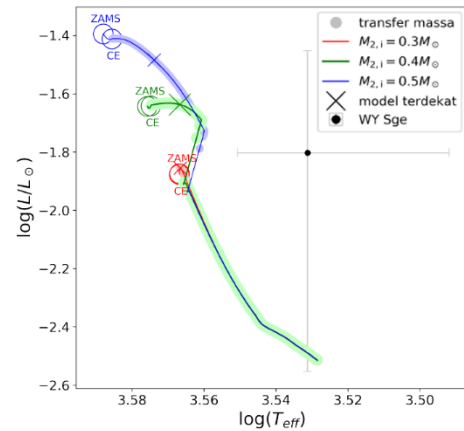
dengan ΔX_n adalah selisih parameter X keluaran komputasi pada model ke- n . Model terbaik dalam sebuah kombinasi merupakan model yang memiliki χ_n terkecil ($\chi_{\min}$). Kombinasi dengan $\chi_{\min}$ terkecil merupakan kombinasi terbaik.

3 HASIL

Kombinasi terbaik yang diperoleh adalah parameter awal $P_i = 800$ hari, $M_{1,i} = 4,0M_\odot$, dan $M_{2,i} = 0,4M_\odot$. Rincian properti dari kombinasi terbaik ini ditabulasikan dalam Tabel 3.

Pada Tabel 3, jelas bahwa hampir seluruh parameter hasil komputasi kombinasi terbaik mendekati parameter WY Sge yang tersedia. Parameter yang meleset dengan signifikan yakni temperatur efektif dan luminositas. Nampak simpangannya dengan parameter WY Sge pada Gambar 2.

Penjelasan skenario evolusinya dibagi menjadi dua fase, yaitu fase pra-CE dan fase pasca-CE. Untuk seterusnya, sebutan untuk kombinasi terbaik ini disebut sebagai "sistem bintang model" dan individu bintang di dalamnya disebut "bintang model."

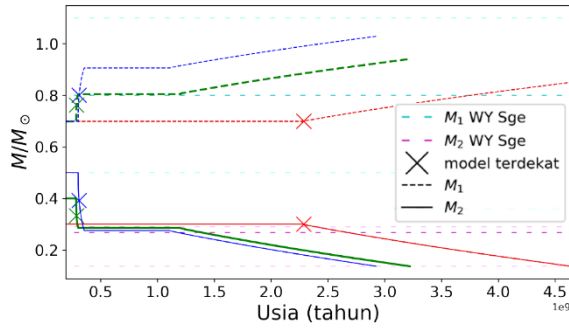


Gambar 2. Jejak evolusi bintang sekunder dari kombinasi terbaik di Diagram H-R. Kombinasi terbaik ditandai dengan warna hijau dengan model terbaiknya ditandai dengan tanda silang (x).

Bintang model primer berevolusi lebih dahulu hingga fase AGB dengan bintang sekundernya masih berada di deret utama. Bintang model primer mulai masuk pada fase AGB pada usia ~180 juta tahun dengan terlihatnya bintang model mulai mengembang dengan sangat cepat.

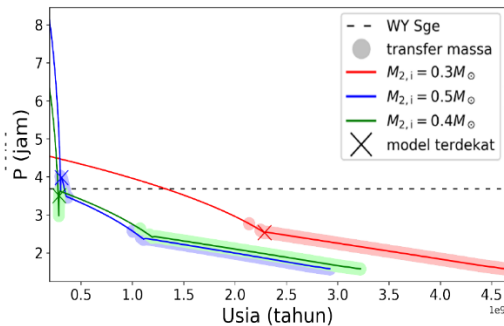
Inti bintang sisa pembakaran hidrogen mulai terbentuk dan cenderung konstan selama fase AGB berlangsung yang bernilai ~0,69 $M_\odot$. Dengan mendekatinya radius bintang model dengan radius *Roche lobe*-nya, bintang model memulai terjadinya

transfer massa ke bintang pasangannya. Namun model pra-CE berakhir di sini dengan dipastikan setelah ini akan terjadi CE dalam waktu yang relatif sangat singkat dibanding fase lainnya.



Gambar 3. Jejak evolusi massa kedua komponen dari kombinasi terbaik pada fase pasca-CE. Kongurasi warna dan tanda masih sama dengan Gambar 2.

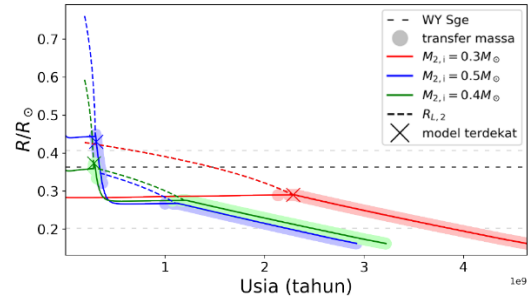
Setelah CE berlangsung, periode dari sistem bintang model masih terus mengerut, terlihat pada Gambar 4. *Roche lobe* dari bintang model sekunder pun mengecil, terlihat pada Gambar 5. Pada usia ~ 280 juta tahun, dengan mengerutnya periode dan radius *Roche lobe*, *Roche lobe* dari bintang sekunder mulai terisi penuh. Transfer massa cepat mulai terjadi dengan nilai $\sim 7 \times 10^9 M_{\odot}/\text{tahun}$. Dengan laju transfer massa demikian, juga didukung dengan hasil perhitungan komputasi yang juga modelnya dekat di sekitar waktu ini, nova bisa terjadi saat itu. Transfer massa ini juga terlihat pada Gambar 3 ditunjukkan dengan kenaikan nilai M_1 dan penurunan nilai M_2 .



Gambar 4. Jejak evolusi periode dari kombinasi terbaik pada fase pasca-CE. Kongurasi warna dan tanda masih sama dengan Gambar 2.

Selama transfer massa cepat terjadi, periode naik kembali. Bintang sekunder yang kehilangan massa kemudian mengerut, lalu kembali ke kestabilan termalnya. Seiring menurunnya laju transfer massa hingga benar-benar hilang, periode kembali mengerut, begitu pula radius *Roche lobe*-nya. Suatu ketika bintang model sekunder sudah memenuhi *Roche lobe*-nya kembali dan terjadi transfer massa

yang lebih pelan dan stabil dari episode transfer massa sebelumnya. Sistem bintang model kemudian berhenti sampai bintang sekundernya telah menghabiskan massanya hingga menjadi $0,1 M_{\odot}$.



Gambar 5. Jejak evolusi radius bintang sekunder dari kombinasi terbaik pada fase pasca-CE. Kongurasi warna dan tanda masih sama dengan Gambar 2.

4 SIMPULAN

Proses simulasi telah dilakukan dengan menggunakan MESA r12278. Beberapa pendekatan dilakukan dalam sistematika penggunaan MESA terutama untuk mengakali fase CE. Terdapat 27 kombinasi parameter P_i , $M_{1,i}$, dan $M_{2,i}$ berbeda yang digunakan dalam penelitian ini. Objek nova yang digunakan sebagai acuan adalah WY Sge. Didapat hasil terbaik yaitu $P_i = 800$ hari, $M_{1,i} = 4,0 M_{\odot}$, dan $M_{2,i} = 0,4 M_{\odot}$. Hampir seluruh parameter pengamatan WY Sge dipenuhi oleh kombinasi terbaik ini kecuali parameter pada diagram H-R. Skenario yang terjadi termasuk mekanisme fisis telah dianalisis pada Bagian 3.

5 PUSTAKA

- Davis, P. J., Kolb U., & Willems, B. 2010, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 403(1), 179-195
- Fuentes-Morales, I., Tappert, C., Zorotovic, M., Vogt, N., Puebla, E. C., Schreiber, M. R., Ederoclite, A., & Schmidtobreick, L. 2021, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 501, 6083-6102
- Iben, I. Jr. 1991, *Astrophysical Journal Supplement.* 76, 55-104
- Irawati, P., Putra, M., Herdiwijawa, D., & Zen, F. P. 2013, *Astrophysics and Space Science.* 346(1), 79-87.
- Knigge, C. 2006, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 373(2), 484-502
- Ryosuke, H. 2017, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 466(4), 3775-3783
- Somers, M. W., Mukai, K., & Naylor, T. 1996, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 278(3), 845-853
- Somers, M. W., Ringwald, F. A., & Naylor, T. 1997, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 284(2), 359-364
- Willems, B. & Kolb, U. 2004, *Astronomy and Astrophysics.* 419. 1057-107

100 Tahun Pengamatan Bintang Ganda di Observatorium Bosscha: Benarkah Objek yang Diamati itu Secara Fisis Ganda?

I. Imaduddin^{1,2}, C. Vidante¹, B. D. S. Budi¹, S. Fatkhusalma¹, dan M. Irfan²

¹Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

²Observatorium Bosscha, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: i.imaduddin@students.itb.ac.id

ABSTRAK

Pengamatan bintang ganda visual di Observatorium Bosscha telah berlangsung dari tahun 1924 hingga saat ini. Terdapat 5431 pasang bintang dari 12435 pengukuran yang dirangkum dalam sebuah *database*. Penting bagi pengamat bintang ganda seawal mungkin melakukan perhitungan lintasan agar bisa disusun prioritas pengamatan. Pasangan bintang yang memiliki periode orbit pendek bisa diprioritaskan di program pengamatan serta pasangan yang diyakini sebagai pasangan optis bisa dihilangkan. Maka dari itu, untuk menentukan bintang program, dilakukanlah pencocokan (*crossmatch*) objek pengamatan antar dua *database*. Pencocokan dilakukan dengan meninjau nama WDS, *discoverer*, dan posisi. Masing-masing objek dimasukkan ke dalam lima buah kategori berdasarkan tingkatan probabilitasnya. Secara berurutan sebanyak 2074, 138, 88, 129, dan 3002 dari total 5431 pasang bintang dikategorikan ke dalam kelompok “Physical” (ganda secara fisis), “Maybe” (kemungkinan memang ganda), “??” (masih dipertanyakan kegandaannya), “No” (secara fisis tidak ganda) dan “Unknown” (masih belum diketahui kegunaannya karena beberapa parameter tidak dapat dihitung). Dari setiap pasang bintang yang berhasil dikategorikan, nilai probabilitasnya tercantum agar dapat menjadi bahan pertimbangan di pekerjaan selanjutnya. Penentuan prioritas objek pengamatan pada program bintang ganda di Observatorium Bosscha diharapkan dapat dilakukan kembali.

Kata Kunci: *Bintang ganda – Bintang ganda visual – Metode statistik*

1 PENDAHULUAN

Pengamatan bintang ganda visual di Observatorium Bosscha telah berlangsung dari tahun 1924 hingga sekarang. Berdasarkan perkembangan teknologi, pengamatan mulai dilakukan dengan menggunakan metode visual, plat fotografi, hingga kamera digital. Tujuannya adalah untuk mengetahui posisi relatif bintang sekunder terhadap bintang primer seperti separasi sudut (ρ) dan sudut posisi (θ). Pemodelan dari data pengamatan dilakukan agar solusi persamaan orbitnya dapat ditentukan.

Objek pengamatan tidak banyak berubah selama hampir 100 tahun dari program tersebut berjalan. Hal ini disebabkan oleh periode orbit dari bintang ganda terutama bintang ganda visual berkisar pada orde puluhan hingga ribuan tahun. Tidak mengherankan jika dalam kurun waktu pengamatan 100 tahun, orbit yang dibangun dari data separasi sudut (ρ) dan sudut posisi (θ) untuk suatu pasangan bintang ganda yang diamati belum membentuk satu periode. Akibatnya banyak pasangan bintang yang belum diketahui solusi persamaan orbitnya.

Dari belasan ribu pengamatan, terdapat sekitar 5431 pasang bintang telah berhasil dikumpulkan oleh Jasinta (1997) yang kemudian disebut sebagai *database* JAS97. Ribuan pasang bintang ini merupakan bagian dari 600 sistem bintang ganda yang didaftarkan pada program pengamatan. *Database*-nya sendiri merupakan hasil kompilasi

dari puluhan artikel yang melaporkan hasil pengamatan program bintang ganda visual di Observatorium Bosscha untuk rentang waktu pengamatan tertentu.

Sayangnya ribuan pasangan bintang tersebut belum diketahui keabsahannya terhadap definisi bintang ganda itu sendiri. Apakah setiap pasangan bintang ganda tersebut saling terikat satu sama lain secara gravitasi atau hanya tampak ganda ketika diamati? Hal ini penting untuk ditinjau agar kita dapat mengetahui pasangan bintang mana yang benar-benar secara fisis terikat satu sama lain. Tujuan dari program pengamatan ini sendiri adalah untuk menentukan solusi persamaan orbit bintang ganda, sehingga untuk pasangan bintang yang secara fisis tidak terikat oleh gravitasi tidak perlu dimasukkan kembali ke dalam daftar objek pengamatan. Selain itu, tingkatan prioritas objek pengamatan dapat ditentukan kembali atas tinjauan tersebut.

Tulisan ini dibuat untuk mengetahui jumlah pasangan bintang ganda yang terdaftar pada program pengamatan bintang ganda di Observatorium Bosscha yang saling terikat gravitasi satu sama lain. Pekerjaan dilakukan dengan mencocokkan pasang bintang yang ada pada JAS97 dengan sebuah katalog bintang ganda yang telah dikonfirmasi kegandaannya secara fisis oleh Harshaw (2018), selanjutnya disingkat HAR18. Pada bagian selanjutnya akan dibahas data yang digunakan, baik *database* JAS97 maupun katalog HAR18. Metode

Tabel 1. Rangkuman data JAS97.

Rentang parameter fisis	
Parameter	Rentang
Separasi sudut (ρ)	0,003 – 10"
Magnitudo komponen 1 (Gmag)	0 – 13,75
Magnitudo komponen 2 (Gmag)	3,15 – 16,79
Perbedaan magnitudo (Gmag)	-1,74 – 11,07
Orbit objek pengamatan	
Kelompok	Jumlah
Satu periode orbit	4 pasangan
Orbit berkuvatur baik	45 pasangan
Orbit berkuvatur	20 pasangan
Orbit tampak berkuvatur	135 pasangan
Orbit tanpa kurvatur	400 pasangan

yang digunakan untuk menentukan kegandaan pada setiap objek yang ditinjaupun secara singkat akan dibahas pada bagian ini. Hasil dari pencocokkan objek akan dibahas di bagian selanjutnya. Pada bagian akhir, akan dibahas kesimpulan dan saran untuk keberlangsungan program pengamatan bintang ganda di Observatorium Bosscha.

2 DATA

2.1 Database pengamatan bintang ganda Observatorium Bosscha

Database pengamatan bintang ganda yang dilakukan Observatorium Bosscha telah dikumpulkan di JAS97. Database ini berisi 12435 pengamatan bintang ganda sejak tahun 1924-1997. Ini merupakan kompilasi dari puluhan publikasi data pengamatan yang dilakukan menggunakan metode visual, sebanyak 3495 pengamatan, maupun plat fotografi, sebanyak 8930 pengamatan. Waktu pengamatan, separasi sudut (ρ), serta posisi sudut (θ) antar komponen bintang ganda terlampir pada database tersebut. Dari belasan ribu pengamatan yang berhasil didokumentasikan, terdapat setidaknya 5431 pasang bintang dari 600 sistem bintang ganda yang berhasil diamati, dengan rincian 5289 bintang ganda dengan nama unik WDS dan

5431 bintang ganda dengan nama unik *discoverer*. Rangkuman parameter fisis dan tahun pengamatan JAS97 ditunjukkan di Tabel 1. Perlu diperhatikan pula bahwa separasi sudut, magnitudo, dan perbedaan magnitudo objek dari pengamatan bergantung pada kisi yang digunakan. Bintang ganda dengan frekuensi pengamatan tertinggi di JAS97 adalah AGC 1 AB (α CMa) dan KUI 75 AB (HD 152751). Pengamatan terbanyak dilakukan pada tahun 1942.

2.2 Katalog bintang ganda HAR18

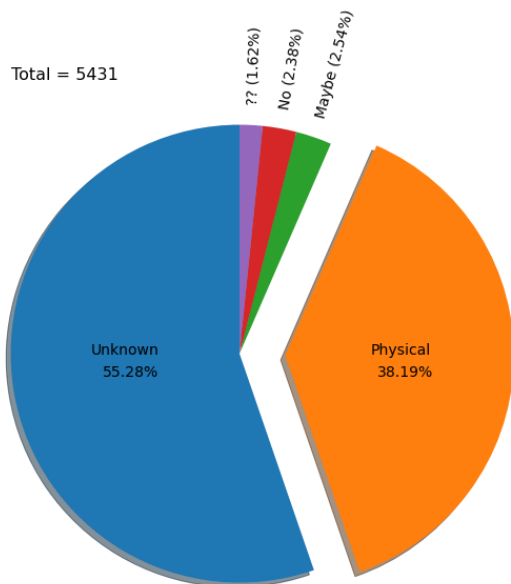
HAR18 berhasil mengidentifikasi kegandaan 139781 pasang bintang dalam katalog WDS (Worley & Douglass, 1997). katalog Gaia DR2 (Gaia Collaboration, dkk. 2018b) digunakan untuk meninjau kegandaan bintang-bintang tersebut. Empat buah parameter yang ditinjau oleh HAR18 untuk mengidentifikasi antara lain paralaks, gerak diri, regresi terhadap orbit yang dibentuk, serta kecepatan radial relatifnya. Probabilitas setiap pasang bintang dihitung dengan menetapkan bobot relatif dari setiap parameter yang ditinjau. Secara berurutan, bobot relatif dari keempat parameter di atas bernilai: 75%, 10%, 10%, dan 5%.

Dari metode yang digunakan, HAR18 mengelompokkan kegandaan bintang yang ditinjaunya menjadi enam tingkatan probabilitas: 1) tinggi ($\geq 85\%$) yang dinotasikan sebagai “Y”; 2) menengah (65 - 85%) yang dinotasikan sebagai “Y?”; 3) mungkin secara fisis memang ganda (50 - 65%), dinotasikan sebagai “Maybe”; 4) masih dipertanyakan kegandaannya yang dinotasikan sebagai “??” (35 - 50%); 5) secara fisis bukan bintang ganda, “No”, dengan probabilitas ($\leq 25\%$); dan 6) tidak diketahui karena dua atau lebih dari parameternya tidak dapat dihitung. Pada akhirnya, pasang bintang yang probabilitasnya masuk ke dalam kategori menengah dan tinggi dianggap sebagai bintang ganda yang secara fisis terikat oleh gravitasi satu sama lain, sehingga hanya lima kelompok saja yang dikategorikan dalam katalog tersebut.

Tabel 2. Jumlah pasang bintang yang berhasil dikategorikan fisisnya.

Parameter	Deskripsi	Probabilitas	Jumlah
Physical	Ganda secara fisis	Tinggi ($> 85\%$) dan menengah (65 – 85%)	2074
Maybe	Kemungkinan memang ganda	50 – 65%	138
??	Masih dipertanyakan kegandaannya	35 – 50%	88
No	Secara fisis tidak ganda	0 – 35%	129
Unknown	masih belum diketahui kegunaannya karena beberapa parameter tidak dapat dihitung	-	3002
Total			5431

Sebanyak 33% dari total pasang bintang berhasil diidentifikasi HAR18 sebagai bintang ganda yang terikat secara fisis oleh gravitasi satu sama lain. Hanya 8% dari total pasang bintang yang dinyatakan bukan merupakan bintang ganda. Akan tetapi, sebanyak 49% pasang bintang yang ditinjau belum diketahui secara pasti karena ada dua, bahkan lebih, parameter yang tidak bisa dikalkulasi dengan metode yang digunakan. Sisanya merupakan bintang-bintang yang mungkin bintang ganda maupun yang masih dipertanyakan kegandaannya.



Gambar 1. Persentase pasang bintang yang telah dikategorikan relatif terhadap total jumlah pasang bintang yang ditinjau.

3 HASIL

Dari data yang telah dijelaskan di bagian sebelumnya, dilakukan pencocokan (*crossmatch*) nama objek yang ada pada JAS97 dengan katalog HAR18. Untuk memastikan objek yang dicocokkan benar, koordinat objek pun ditinjau. Selain itu, pencocokan dengan katalog lain, seperti katalog WDS (Worley & Douglass, 1997), ADS (Aitken & Doolittle, 1932), Gaia DR2 (Gaia Collaboration et al., 2018b), dan lain-lain. Hasil pencocokannya dapat dilihat di Tabel 1 dan Gambar 1. Untuk kategori kegandaan setiap bintang pada *database* JAS97 beserta probabilitas yang diukur oleh HAR18 dapat diunduh versi daringnya pada laman bit.ly/bosscha_doublestar_nov2021.

Terdapat setidaknya 2074, atau sekitar 38.19%, dari 5433 pasang bintang yang merupakan bintang ganda yang secara fisis terikat oleh gravitasi satu

sama lain. Bisa dikatakan cukup kecil persentase dari kelompok probabilitas bintang ganda yang kemungkinannya ganda ("Maybe"), masih dipertanyakan ("??"), maupun secara fisis tidak ganda ("No"), yaitu, secara berurutan, 2.54%, 1.62%, dan 2.38% dari *database* JAS97. Sayangnya, lebih dari separuh total objek pada *database* JAS97 tidak diketahui dengan pasti kegandaannya secara fisis. Hal ini terjadi karena pada data yang dikumpulkan, masih banyak pasang bintang yang belum bisa dihitung dengan menggunakan metode yang dilakukan oleh HAR18. Terlepas dari itu, hasil ini dapat digunakan untuk meninjau kembali daftar objek pengamatan bintang ganda visual yang dilakukan di Observatorium Bosscha.

4 DISKUSI

Penentuan kegandaan secara fisis objek pengamatan pada program pengamatan bintang ganda di Observatorium Bosscha telah berhasil dilakukan. Sebanyak 2074 pasang bintang dinyatakan terikat secara gravitasi. Jumlah tersebut disarankan digunakan sebagai prioritas utama dari program pengamatan. Terdapat 129 pasang bintang yang dikategorikan sebagai bintang ganda yang tidak terikat satu sama lain dan pasang bintang tersebut dapat dihilangkan dari daftar objek program pengamatan. Pengamatan terhadap pasang bintang yang masuk ke dalam kategori "Maybe" dan "??" masih diperlukan untuk meningkatkan nilai probabilitas dari setiap pasang bintang tersebut. Sehingga untuk 226 pasang bintang tersebut dapat dimasukkan ke dalam prioritas menengah dari program pengamatan. Bintang-bintang yang masuk ke dalam kategori "Unknown" sebaiknya tidak diikutkan ke dalam program pengamatan bintang ganda di Observatorium Bosscha. Namun, dengan jumlah pasang bintang yang tergolong banyak, kategori ini perlu ditinjau ulang.

Selain itu, kami juga meninjau terdapat beberapa perbedaan metode di katalog HAR18. Pertama, analisis galat dari paralaks bintang, yaitu pemilihan error paralaks/paralaks $< 15\%$, seperti yang sudah dijelaskan oleh Lindegren, dkk (2018), belum dilakukan di HAR18. Hal tersebut sebaiknya dilakukan agar jarak yang diturunkan dari paralaks dapat digunakan dan menghindari mendapatkan nilai galat yang lebih besar dari nilai paralaksnya, mengingat bahwa paralaks merupakan salah satu parameter yang digunakan dalam menentukan kegandaan bintang ganda dengan bobot 75%. Kedua, Gaia DR2 memiliki limitasi dalam mengamati bintang dengan $G_{\text{mag}} < 4$ (Gaia Collaboration, dkk. 2018b). Hal tersebut

mengakibatkan bintang ganda terang masuk dalam kategori “Unknown”, contohnya adalah AGC 1 AB (α CMa).

Untuk pekerjaan selanjutnya, objek pengamatan pada *database* JAS97 sebaiknya perlu ditinjau ulang. Hal ini dapat dilakukan dengan menghitung kembali probabilitas kegandaannya menggunakan metode HAR18 dan katalog yang parameternya lebih lengkap seperti Gaia EDR3 (Gaia Collaboration, dkk. 2021). Perlu juga melakukan pencocokan dengan database dan katalog lain, seperti Zavada dan Piska (2016), Sapozhnikov, dkk (2020), dan Jiménez-Esteban, dkk (2019). Diharapkan, jumlah pasang bintang yang berada pada kategori tersebut dapat berkurang dan jumlah objek pada kategori lain dapat meningkat. Terakhir, hasil dari pekerjaan ini diharapkan dapat meningkatkan pengembangan dan produktivitas dari program pengamatan bintang ganda yang dilakukan di Observatorium Bosscha.

Ucapan Terima Kasih

Kami menyampaikan terima kasih kepada Observatorium Bosscha secara umum dan terima kasih atas dedikasi semua pihak yang bekerja di program pengamatan bintang ganda ini, khususnya.

5 PUSTAKA

- Atiken, R. G. dan Doolittle, E. 1932, *New General Catalogue of Double Stars within 120 degrees of the North Pole*, Carnegie Institution of Washington.
- Harshaw, R. 2018. *JDSO*. 14(4), 734.
- Jasinta, D. M. D. 1997. *ASP Conf. Ser.* 130, 135.
- Jiménez-Esteban, dkk. 2019. *AJ*. 157, 78.
- Gaia Collaboration, dkk. 2018b. *A&A*. 616, A1.
- Gaia Collaboration, dkk. 2021. *A&A*. 649, A1.
- Lindgren, dkk. 2018. *A&A*. 616, A2.
- Sapozhnikov, dkk. 2020. *Astron. Rep.* 64, 756.
- Worley, C. E. dan Douglass, G. G. 1997. *AAS*. 125, 523.
- Zavada & Piska. 2016. *AJ*. 159, 33.

Low Resolution Spectroscopic Observation of the 2021 Outburst of the Recurrent Nova RS Ophiuchi

I. Hafizah^{1*}, A. A. Yusuf¹, A. Oktaviandra¹, R. Muztaba¹, and H. L. Malasan^{1,2}

¹ITERA Lampung Astronomical Observatory, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia

²Astronomy Division, Faculty of Mathematics and Natural Sciences, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

*E-mail: izatul.hafizah@staff.itera.ac.id

ABSTRACT

RS Oph outbursts were recorded in 1898, 1933, 1958, 1967, 1985, and 2006, with the most recent outburst identified by an Ireland amateur astronomer, Keith Geary on 2021 August. Since its outburst, RS Oph was observed in almost every wavelength range, from hard X-rays to radio wavelength. We report low-resolution spectroscopic observations ($R=1000$) of Nova RS Oph in the 390-710 nm range. RS Oph was observed on August 16, 2021, using LISA Pack Spectrograph equipped with Atik 314L+ CCD and Ritchey Chretien GSO 10-inch ($F/8$) telescope. As in most novae, the spectra are dominated by strong hydrogen Balmer lines ($H\alpha$, $H\beta$, $H\gamma$, $H\delta$, and $H\epsilon$). In addition, the absence of nebular forbidden lines in the spectra indicate that the nebular phase has not yet occurred, but RS Oph is thought to enter the nebular phase. This is related to the results of intermediate-resolution spectroscopic observations ($R = 5000$) by Fajrin et al (2021) at Bosscha Observatory which showed the presence of multiple expanding shells with high velocity.

Keywords: *Nova – RS Oph – Spectroscopy*

1 INTRODUCTION

The nova outburst in binary systems is powered by thermonuclear runaway on the white dwarf's surface (e.g., Warner, 1995, 2008; Bode & Evans, 2008). The hydrogen-rich material is accreted from the donor star to the white dwarf over a long period of time, forming an envelope on its surface. The thermonuclear runaway is triggered when the critical pressure at the base of the accreted layer is achieved, leading to a dramatic brightening. If the binary system survives the outburst, and mass accumulates again, causing the nova to recur on a timescale that is dependent on the accretion rate and the mass of the white dwarf. Recurrent novae are objects that have experienced more than one nova outbursts (e.g., Mukai, 2015). All ancient novae are thought to be recurring, with centuries-long periods between outbursts.

The classification of nova spectra shortly after outburst is a promising avenue for the research of nova populations. Based on the emission lines in their spectra, Williams (1992) found that the spectra of Galactic novae may be separated into one of two main spectroscopic categories, FeII and He/N. When compared to novae with strong lines of He and N (the "He/N" novae), novae with notable FeII emission (the "FeII" novae) have P Cygni absorption profiles, evolve more slowly, have lower expansion velocities, and have lower levels of ionization.

K. Geary reported the 2021 nova outburst of RS Oph on August 8, 2021 (AAVSO Alert Notice 752).

The presence of significant Balmer lines, as well as HeI, FeII, OI, and NII features with P Cyg profiles, are revealed in the initial spectral follow-up observations (Taguchi, Ueta & Isogai, 2021). Spectral observation by Fajrin et al. (2021) with a $\lambda/\Delta\lambda \sim 5000$ reveals broad emission, with a blue-shifted absorption line of H-alpha ($\Delta v = -40.272 \pm 2.202$ kms⁻¹ on Aug. 10.5690 UT) fully visible. The broad H emission line's velocity is estimated to be roughly 2800 kms⁻¹. As expected, the profile and velocity imply that this outburst is a nova explosion. The broad emission line suggests the presence of a second shell that is rapidly expanding.

Williams et al. (1991) devised a physical basis to describe the outburst spectral evolution, generally referred to as the Tololo Classification Scheme. The features of the stronger emission lines are used to determine the phases of evolution in this scheme. The spectrum is classified as belonging to either phase coronal, permitted, auroral, or nebular. Through the ionizing radiation filed and mean gas density, these phases are linked to the physical condition of the shell. As a result, the classification gives insight on the physical conditions in the nova ejecta as the outburst progresses.

To complete the information that has been found here we present low-resolution spectroscopic observations of RS Oph on August 16, 2021 and discuss (1) emission line identification of RS Oph low-resolution spectra, (2) nova RS Oph classification and phase determination, and (3) show image of the nova RS Oph to see how the brightness of RS Oph changes over time.

2 OBSERVATIONS

To obtain low-resolution optical spectra of RS Oph we used LISA Pack spectrograph mounted to the 10-inch Ritchey-Chretien GSO telescope $F/8$ located in ITERA Lampung astronomical observatory, Lampung, Indonesia (see Figure 1). For finderscope, we used CMOS ZWO ASI 178mm. The spectra have a resolution of $R = 1000$ and cover 390-710 nm range in wavelength. The object was observed on 2021 Aug 16, 746 UT with integration time of 360 seconds. Figure 2 is a finding chart that we use to identify RS Oph. Using IRAF tasks packed in the noao packages, the spectra are reduced in the standard way, including bias and dark removal, flat-fielding, and wavelength calibration. A Neon (Ne) lamp was used to calibrate the wavelengths.

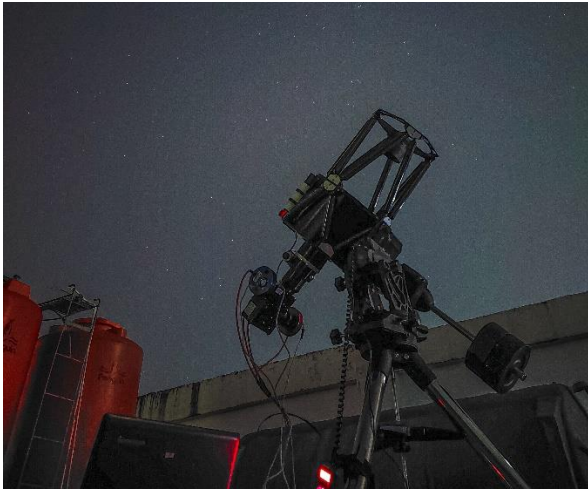


Figure 1. Instrument configuration during observation.

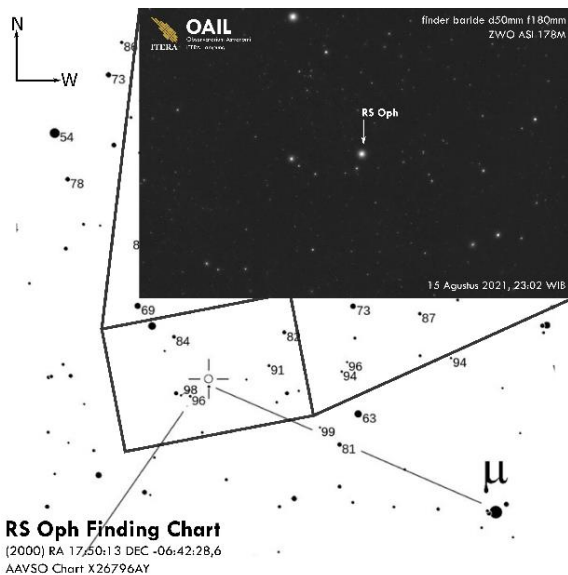


Figure 2. Finding chart and finderscope's field of view.

3 RESULTS

Figure 3 shows the RS Oph spectrum. Strong Balmer emission was found, such as $H\alpha$ (6563 Å), $H\beta$ (4865 Å), $H\gamma$ (4340 Å), $H\delta$ (4100 Å), dan $H\epsilon$ (3917 Å). The strong non-Balmer lines present in the spectrum is FeII and NaI (5892 Å) which correspond to FeII class novae. These two lines were also found in the spectrum of RS Oph on 2021 Aug 9, 44 UT (Figure 4) observed with Fiber-fed IFS at 3.8 m Senmei telescope, Okayama (Taguchi, Ueta & Isogai, 2021).

In addition, we also took image of RS Oph through a finder scope to see how fast the nova is dimming. Figure 5 shows that the brightness of RS Oph decreased within a few weeks which is also correspond to the characteristics of FeII class novae. Therefore, our observations indicate that this nova belongs to the FeII nova class. The absence of nebular forbidden lines in the spectra such as [NII] $\lambda 6584$ Å or [OIII] $\lambda 5007$ Å indicate that the nebular phase has not yet occurred, but RS Oph is thought to

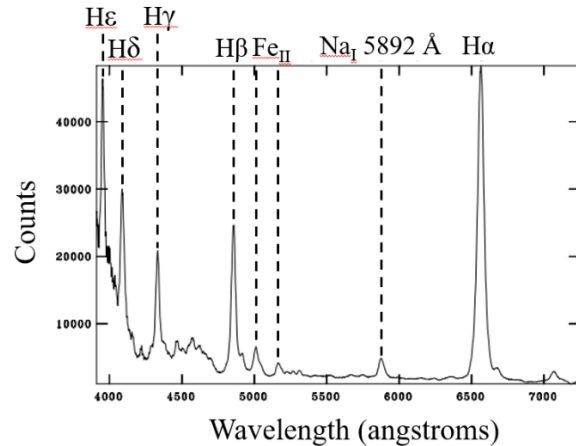


Figure 3. RS Oph low-resolution spectrum observed at ITERA Astronomical Observatory on 2021 Aug 16.746 UT.

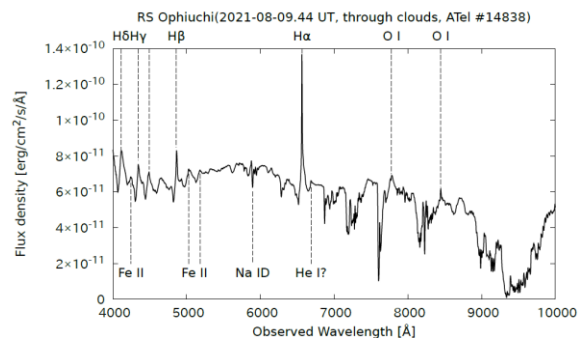


Figure 4. RS Oph low-resolution spectrum observed at Okayama on 2021 Aug 9, 44 UT (Taguchi, Ueta & Isogai, 2021)

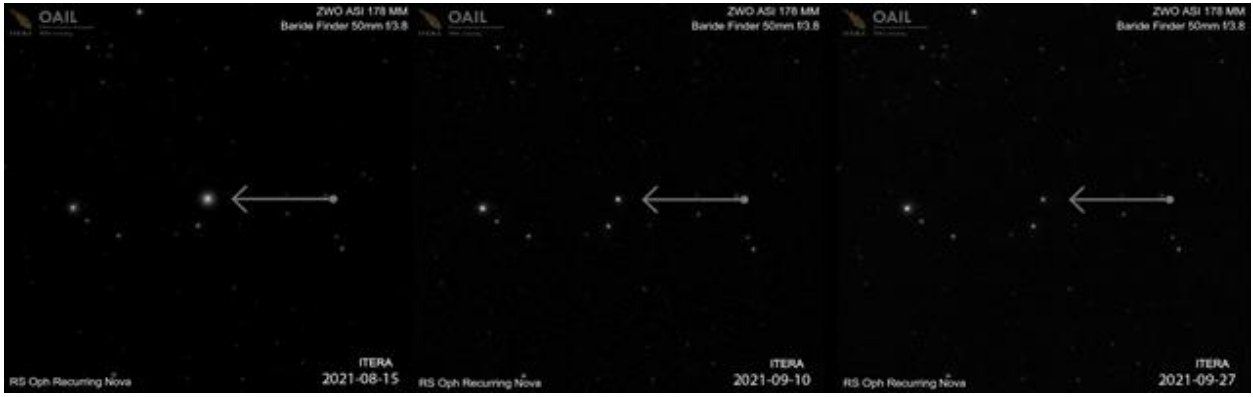


Figure 5. Image of RS Oph observed with Baride finder scope and CMOS ZWO ASI 178MM from August 15, 2021, to September 27, 2021.

enter the nebular phase. However, to confirm this, it is still necessary to have a spectrum for the following days.

4 CONCLUSIONS

We report spectroscopic observations of the recurrent nova RS Oph obtained after the 2021 nova outburst and obtain the following results:

1. The RS Oph spectrum is dominated by Hydrogen-Balmer lines.
2. The characteristics of the RS Oph spectrum are in correspond to FeII nova class.
3. RS Oph is thought to enter nebular phase
4. The brightness decrease on the RS Oph image shows a scale of several weeks, however a light curve from the RS Oph is highly suggested to verify this information.

Acknowledgments

This work is supported by Institut Teknologi Sumatera. We thank Evan I. Akbar, Irfan Imaduddin and M. Fajrin for the collaborative work. We express our gratitude to the Organizing Committee of Seminar Panorama Antariksa, ITB, for the support.

5 REFERENCES

- Anupama, G. C. 2012, *ASI Conference Series*, 6, 143-149
- Bode, M. F. & Evans, A. 2008, *Classical Novae 2nd Edition*. Cambridge University Press, Cambridge
- Fajrin, M., Imaduddin, I., Malasan, H. L., Arai, A., Shinnaka, Y., & Kawakita, H. 2021, *The Astronomer's Telegram*, 14909
- Cheung, C. C., Ciprini, S., & Johnson, T. J. 2021, *The Astronomer's Telegram*, 14834
- Mikolajewska, J., Aydi, E., Buckley, D., et al. 2021, *The Astronomer's Telegram*, 14852
- Mukai, K. 2015, *Acta Polytechnica CTU Proceedings*, 2, 246
- Shidatsu, M., Negoro, H., Mihara, T., et al. 2021, *The Astronomer's Telegram*, 14846
- Taguchi, K., Ueta, T., & Isogai, K. 2021, *The Astronomer's Telegram*, 14838
- Wagner, S. J. & H. E. S. S. Collaboration 2021, *The Astronomer's Telegram*, 14844
- Warner, B. 1995, *Cataclysmic Variable Stars*. Cambridge University Press, Cambridge
- Warner, B. 2008, in *Classical Novae ed. M. Bode & A. Evans*. Cambridge University Press, Cambridge
- Williams, R. E. 1992, *AJ*, 104, 725
- Williams, D., O'Brien, T., Woudt, P., et al. 2021, *The Astronomer's Telegram*, 14849

Optical Integral Field Spectroscopy Study of Supernova Remnants

J. Suherli^{1*} and S. Safi-Harb¹

¹*Department of Physics and Astronomy, University of Manitoba, Winnipeg, Canada*

**E-mail: suherlij@myumanitoba.ca*

ABSTRACT

The study of supernova remnants (SNRs) is key to our understanding of various unsolved problems in astrophysics. These include: the supernovae explosion mechanism, the properties of the stellar progenitors, the heating and the chemical enrichment of the interstellar medium (ISM), and the fate of stars following their death. The relatively new domain of integral field spectroscopy has transformed observational spectroscopy, and in particular, has revived the SNRs research in the optical regime. It has enabled the studies of SNRs in much depth: providing high-resolution spectroscopy of SNRs allowing us to put constraints on their nature and their interaction with their surroundings. In this paper, we summarize the powerful potential of integral field optical spectroscopy of SNRs, highlighting our group's ongoing and future work in this area.

Keywords: *Integral field spectroscopy – Supernova remnants – Neutron stars*

1 SUPERNOVAE AND SUPERNOVA REMNANTS

The word "super-nova" was first introduced by Walter Baade and Fritz Zwicky in their 1934 series of papers, to refer to *the transition of an ordinary star into a neutron star* (see Baade & Zwicky, 1934a,b,c). We now classify supernovae (SNe) into two major classes: the 'core-collapse SNe' that occur when massive stars (of initial masses $\geq 8 M_{\odot}$) reach their last evolutionary stages and collapse to form a neutron star or a black hole, and the 'thermonuclear (or type Ia) SNe' when white dwarfs in binary systems are triggered into runaway nuclear fusion which generally destroys the progenitor star; see Chevalier (1996) for an early review.

Following the supernova explosion, the ejecta spill out into space forming the beautiful diffuse nebulae that we see for approximately 100,000 years following the explosion, the Supernova Remnants (SNRs). Supernova explosions are among the most energetic events in the universe, releasing about 10^{51} erg of kinetic energy into the interstellar medium (ISM) and scattering in space the heavy elements fabricated during the star's lifetime and the SN explosion. As well, SNR shocks contribute to cosmic ray acceleration to very high energies. As such, SNe significantly influence the chemical content and dynamics of the ISM, and depending on the density of the ISM and the shock velocity, supernova explosions could either trigger or suppress star formation (e.g. Nagakura et al. 2009; Booth & Schaye, 2013).

Despite many fields in astrophysics (both Galactic and Extragalactic) using and depending on supernovae, the nature of their progenitors, explosion mechanism and particularly their

aftermath continues to be debated. Much can be learned from studying and zooming in on nearby events. Due to the rare occurrence of observable supernovae in our Galaxy, we can focus our study on SNRs which remain visible for thousands of years post stellar death, providing us with nearby laboratories to trace the observable SNRs back to their SN engines. In particular, the nature of the shocked interstellar medium, its emission lines characteristics, spatial distribution and progenitor imprints (such as an associated compact object) hold important clues about the supernova progenitors and aftermath.

1.1 Central Compact Objects

An intriguing aspect that makes studying SNRs crucial is their compact objects leftovers. Progenitors that survived the (core-collapse) supernova explosions collapse into either neutron stars or black holes, depending on their initial masses. Among the many different subclasses of neutron stars that have been observed in the past few decades, there is a particularly unique class of isolated neutron stars detected in X-rays near the SNR centres, called 'Central Compact Objects' (CCOs; for review see De Luca, 2017 and Safi-Harb, 2017).

This unique class, whose nature and progenitors continue to be debated, provides us with important clues about the diversity of SNe and their aftermath. CCOs have been dubbed as 'anti-magnetars' (Gotthelf et al. 2013) given their relatively low surface dipole magnetic fields ($\sim 10^{10}$ G, compared to 10^{12} G of the average neutron stars or 10^{14-15} G for magnetars) inferred from timing a few objects of the sample. CCOs are exclusively visible in X-ray and so far, they have no identified counterparts at any other wavelength. Furthermore, their characteristic

ages are orders of magnitude larger than their hosting SNRs' ages (about 2 to 5 orders of magnitude larger). These unique properties have been addressed through invoking fallback from the SN burying their magnetic field and through magnetic field evolution in neutron stars (Ho 2011, Rogers & Safi-Harb 2016). Furthermore, addressing their explosion properties and progenitors through recent X-ray observations of their associated SNRs has so far led to lower mass progenitors and explosions (see e.g., Braun et al. 2019). As described below, modern optical studies of this sample are needed as they provide further important clues on their birth properties and environment.

1.2 Optical Studies of Supernova Remnants

Long before the SNR field was born, several Galactic SNRs were known as optical nebulae to astronomers. Their optical spectra are dominated by line emission, in particular H α , and forbidden line emission of nitrogen, oxygen, and sulfur. The presence of these forbidden lines indicates strong cooling behind the shock front (i.e. radiative shocks; Seward & Charles, 1995) and is usually associated with mature SNRs.

However, not only mature SNRs display optical emission. Some young SNRs have dense clumps in their surrounding ISM, and as the shock waves penetrate these clumps, the shocks slow down and become radiative. There are also young SNRs located in a partially neutral medium whose spectra have no forbidden line emission, but show hydrogen Balmer lines (e.g. Heng, 2010; Vink, 2020). Lastly, optical studies of their associated compact objects can provide clues about their energetics and environment which is directly linked to their SNR hosts.

Imaging and spectroscopic studies of SNRs in the optical regime offer a unique opportunity to probe the explosion dynamics and progenitors, the nucleosynthesis process, the shock mechanism and the ambient medium conditions. Hence, studying the SNRs, particularly the poorly studied-in-the-optical CCOs-hosting class, is needed to further constrain the basic parameters of these objects and addressing the diversity of SNe and their remnants (Chevalier, 1977; Safi-Harb, 2017).

2 INTEGRAL FIELD SPECTROSCOPY OF SUPERNOVA REMNANTS

Since its advent in the 1980s (Bacon & Monnet, 2017), radio astronomers have used integral field spectroscopy long before it was finally adopted in

the optical regime. Integral field spectroscopy enables a more effective way to study astronomical objects, especially compared to the "traditional" aperture and long-slit spectroscopy.

In "traditional" spectroscopy, a single aperture or a slit is placed on the focal plane, then the light from the object goes through the slit and gets dispersed by the spectrograph onto the detector. The main disadvantage of this method is that only a point or a line through the object is sampled at the same time. In order to cover a full extended object, it requires several consecutive exposures, sometimes with altered slit positions. This is not only time-consuming, but also prone to errors in pointing when doing different exposures.

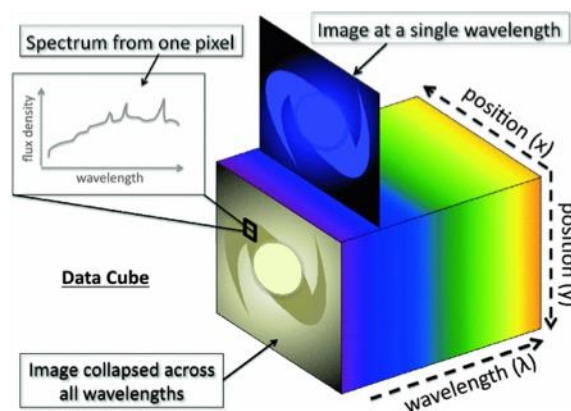


Figure 1. The schematic diagram of a datacube (Harrison, 2016). A datacube provides information in three dimensions: two spatial dimensions (most commonly right ascension and declination) and a third dimension of wavelength.

Integral field spectroscopy aims at addressing these aforementioned problems by allowing spectroscopy and imaging of a two-dimensional area of an image plane to be done simultaneously. As the spectrum of each spatial element is taken at the same time, the result is more stable and uniform. This is how integral field spectroscopy provides an efficacious solution for astronomical spectroscopic studies.

This technique produces spectra of each spatial point of a two-dimensional field, which then generates a three-dimensional data product called a datacube. A datacube is essentially a stack of many images at different wavelengths of the same plane of the sky (see Figure 1). With integral field spectroscopy, astronomers are able to study astronomical objects in a novel and more effective way, especially if the objects have complex structures or there are many objects in the same field of view.

2.1 Recent Breakthrough

Integral field spectroscopy has revived SNRs research at optical wavelengths. Studying SNRs with the integral field spectroscopy approach has recently shown its incredible potential. For example, it has allowed the study of dust destruction in SNR shocks (Dopita et al. 2016), the investigation of important diagnostics for the cosmic-ray acceleration efficiency in SNR shocks (Ghavamian et al. 2017), the discovery of new elements in the SNR ejecta (Seitenzahl et al. 2018, 2019), and the three-dimensional reconstructions of SNRs structure (Martin et al. 2021).

One of the recent relevant highlights of integral field spectroscopy capability in SNR research is the work done by Vogt et al. (2018). Using MUSE (Multi-Unit Spectroscopic Explorer on the Very Large Telescope, Chile; Bacon et al. 2010) data, a previously unknown compact remnant of the supernova progenitor of extragalactic SNR 1E0102.2-7219 was discovered. The compact remnant, believed to be an added CCO to the growing CCOs class, is embedded in an unexplained dense ring of cold gas, shining in the recombination lines of Ne I and O I. This would then indicate the first detection of a CCO through Integral Field Spectroscopy. However, there is an ongoing debate about the nature of the compact remnant (see Hebbar et al. 2020; Long et al. 2020; Banovetz et al. 2021). Regardless, this is the very first time that (optical) light on a CCO candidate identified in a SNR outside of the X-ray regime.

3 ONGOING AND FUTURE WORKS

The optical study is the oldest method to study SNRs, yet it has been limited by the unavailability of detectors that are sufficiently sensitive to reveal the most details in the SNRs spectra. With the promising powerful capabilities of integral field spectroscopy, our SNR group at the University of Manitoba aims to further tackle the unsolved problems in current SNR research.

Our main focus is to utilize the newly revealed potential of integral field spectroscopy observational data for SNRs research in the optical regime; specifically in order to find ways to understand the supernovae explosions mechanisms and the properties of the progenitors. The high-resolution spectral studies of SNRs will potentially provide new evidence dating back to the time of the explosions. There are several unsolved questions that we would like to address: what elements are produced by the supernovae explosions and what are

their kinematics and morphological distributions?; what are the constraints we can infer from SNRs observations for the physical properties of the progenitors?; is there any optical signature of the compact objects we can observe and if so, what are their and their environment's physical properties?

3.1 SNR G266.2-1.2 (in prep.)

SNR G266.2-1.2 or Vela Jr. is a shell-type SNR that lies along the same line of sight as the larger Vela SNR. It is a young SNR with a CCO located at its geometric centre (CXO J085201.4-461753; see Aschenbach, 1998; Pavlov et al. 2001; Kargaltsev et al. 2002). Our MUSE data (4750 Å - 9350 Å) of Vela Jr. characterized a nebula that is strongly emitting in [N II], at the exact location of the known CCO. Together with the recent possible identification of a CCO in SNR 1E0102.2-7219, this is the first time that the CCOs and their interactions with their environment are observed in the optical wavelength. This opens a new door for CCO observations outside the X-ray regime.

Our data confirms with certainty that the feature, previously identified as an H α nebula (Pellizzoni et al. 2002, Mignani et al. 2007), shines primarily in [N II] $\lambda\lambda$ 6548,6583. The initial estimate indicates that the [N II] nebula must have a line of sight velocity of 60-80 km/s. We also identify a faint rim of H α (see Figure 2) on the nebula and emissions from [S II] $\lambda\lambda$ 6716,6731, and [S III] λ 9068, along with [N I] λ 5198+5200(blended), He I λ 6678, [Ar III] λ 7136, and [Fe II] λ 8616.

Our MUSE data show that the [N II] abundances are much stronger than H α , and that there is no [O

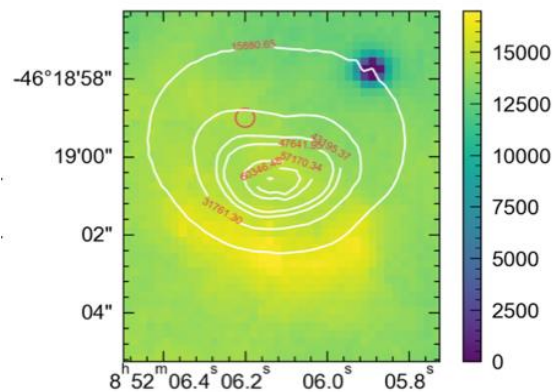


Figure 2. The intensity distribution of H α emission with [N II] overlay in white (flux levels: 25%, 50%, 68%, 75%, 90%, 95%, and 99.7%). The red circle marks the Vela Jr. CCO's location and the coordinates are in J2000. The purple circle on the top right corner is the residual from the continuum subtraction process.

III] emission. Our new observations of Vela Jr. with MUSE will provide a better spatial resolution of the CCO nebula and a clearer view of the emission lines associated with the nebula. We will provide reliable flux calibration and an assessment of the connection between the nebula and the CCO, thus constraining the nature of the CCO and associated SN explosion.

Acknowledgements

We thank our collaborators P. Ghavamian (Towson University, U.S.A.), I. Seitenzahl and A. Ruiter (UNSW, Australia) and W. Ho (Haverford College, U.S.A.). We also thank the organizer and supporters of *Seminar Panorama Antariksa 2021*. Our research is primarily supported by the Natural Science Engineering Research Council of Canada.

4 REFERENCES

- Aschenbach, B. 1998, *Nature*, 396, 141-142
- Baade, W. & Zwicky, F. 1934a, *PNAS*, 20, 254-259
- Baade, W. & Zwicky, F. 1934b, *Contribution from the Mount Wilson Observatory*, 3, 73-78
- Baade, W. & Zwicky, F. 1934c, *Physical Review*, 46, 76-77
- Bacon, R., Accardo, M., Adjali, L., et al. 2010, in *SPIE Conference Series Vol. 7735* (eds. I. McLean, S. Ramsay, & H. Takami), SPIE, Washington
- Bacon, R. & Monnet, G. 2017, *Optical 3D-Spectroscopy for Astronomy*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- Banovetz, J., Milisavljevic, D., Sravan, N., et al. 2021, *ApJ*, 912, 33
- Booth, C. & Schaye, J. 2013, *Scientific Reports*, 1738
- Braun, C., Safi-Harb, S., & Fryer, C. 2019, *MNRAS*, 489, 4444-4463
- Chevalier, R. 1977, *ARA&A*, 15, 175-196
- Chevalier, R. 1996, in *IAU Colloq. 145: Supernovae and Supernova Remnants* (eds. R. McCray & Z. Wang), Cambridge University Press, Cambridge, pp. 399-406
- De Luca, A. 2017, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 932, 012006
- Dopita, M. A., Seitenzahl, I. R., Sutherland, R. S., Vogt, F. P. A., Winkler, P. F., & Blair, W. P. 2016, *ApJ*, 826, 150
- Gotthelf, E.V., Halpern, J., & Alford, J. 2013, *ApJ*, 765, 58
- Harrison, C. M. 2016, *Observational Constraints on the Influence of Active Galactic Nuclei on the Evolution of Galaxies*, Springer International Publishing, Cham
- Hebbar, P. R., Heinke, C. O., & Ho, W. C. G. 2020, *MNRAS*, 491, 1585-1599
- Heng, K. 2010, *PASA*, 27, 23-44
- Ho, W.C.G. 2011, *MNRAS*, 414, 2567
- Kargaltsev, O., Pavlov, G. G., Sanwall, D., & Garmire, G. P. 2002, *ApJ*, 580, 1060-1064
- Long, X., Gaetz, T. J., & Plucinsky, P. P. 2020, *ApJ*, 904, 70
- Martin, T., Milisavljevic, D., & Drissen, L. 2021, *MNRAS*, 502, 1864-1881
- Mignani, R. P., Zharikov, S., & Caraveo, P. A. 2007, *A&A*, 473, 891-896
- Nagakura, T., Hosokawa, T., & Omukai, K. 2009, *MNRAS*, 399, 2183-2194
- Pavlov, G. G., Sanwall, D., Kiziltan, B., & Garmire, G. P. 2001, *ApJ*, 559, L131
- Pellizzoni, A., Mereghetti, S., & De Luca, A. 2002, *A&A*, 393, L65
- Rogers, A., & Safi-Harb, S. 2016, *MNRAS*, 457, 1180
- Safi-Harb, 2017, *J. Phys.: Conf. Ser.*, 932, 012005
- Seitenzahl, I. R., Ghavamian, P., Laming, J. M., & Vogt, F. P. A. 2019, *Phys. Rev. Lett.*, 123, 041101
- Seitenzahl, I. R., Vogt, F. P. A., Terry, J. P., Ghavamian, P., Dopita, M. A., Ruiter, A. J., and Sukhbold, T. 2018, *ApJ*, 853, L32
- Seward, F. D. & Charles, P. A. 1995, *Exploring the X-Ray Universe*, Cambridge University Press, Cambridge
- Vink, J. 2020, *Physics and Evolution of Supernova Remnants*, Springer Nature Switzerland AG, Cham
- Vogt, F. P. A., Bartlett, E. S., Seitenzahl, I. R., Dopita, M. A., Ghavamian, P., Ashley, R., & Terry, J. P. 2019, *Nature Astronomy*, 2, 465-471

Batasan Massa dan Radius Bintang Neutron pada Sistem SAX J1748.9-2021 Berdasarkan Metode *Touchdown Point*

M. Daud^{1*} dan K. Vierdayanti²

¹Program Studi Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10, Bandung, 40132, Indonesia

²Kelompok Keahlian Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Jl. Ganesa 10, Bandung, 40132, Indonesia

*E-mail: muhammaddaud23@students.itb.ac.id

ABSTRAK

X-ray burst tipe-I (*burst*) merupakan fenomena ketidakstabilan termal yang terjadi di sekitar permukaan bintang neutron pada sistem *Low-Mass X-ray Binary* (LMXB). Pada kasus *burst* tertentu, fluks yang teramati mencapai nilai limit Eddington. Kasus tersebut dikenal sebagai *Photospheric Radius Expansion* (PRE *burst*) dan dapat dimanfaatkan untuk memberikan informasi properti intrinsik bintang neutron. Pada penelitian ini dilakukan penentuan batasan massa dan radius bintang neutron pada sistem LMXB SAX J1748.9-2021 yang terletak di gugus bola NGC 6440 menggunakan metode *touchdown point* dengan pendekatan Newtonian. Analisis *time-resolved spectroscopy* dilakukan terhadap sembilan data spektrum PRE *burst* yang diambil dari misi *Rossi X-ray Timing Explorer* (RXTE) dengan instrumen *Proportional Counter Array* (PCA) untuk mendapatkan parameter saat titik *touchdown*. Didapatkan batas nilai massa dan radius bintang neutron 0,60-1,88 massa Matahari dan 11,8-18,0 km berdasarkan data dan analisis yang dilakukan. Hasil tersebut memberikan batas massa yang relatif lebih kecil dan batas radius yang relatif lebih besar dibandingkan dengan penelitian sebelumnya melalui pendekatan relativistik dengan dua data PRE *burst*. Selain itu, didapatkan variasi nilai untuk setiap data PRE *burst* yang menunjukkan perbedaan keadaan sistem pada waktu yang berbeda sehingga pengukuran akan lebih baik dilakukan untuk jumlah data yang lebih banyak.

Kata Kunci: bintang neutron – *photospheric radius expansion* – *x-ray burst* tipe-I

1 PENDAHULUAN

X-ray burst tipe-I (*burst*) merupakan fenomena ketidakstabilan termal yang teramati pada sistem *Low-Mass X-ray Binary* (LMXB) dengan anggota sebuah bintang neutron dan sebuah bintang normal dengan massa $< 1 M_{\odot}$. Pada sistem tersebut terdapat mekanisme transfer materi dari bintang pasangan ke bintang neutron (Seward & Charles, 2010). Materi yang terakumulasi di permukaan bintang neutron membentuk lapisan tipis yang dapat mengalami perubahan keadaan temperatur dan densitas seiring waktu hingga memungkinkan terjadinya reaksi pembakaran nuklir. Pembakaran nuklir yang terjadi pada selubung yang relatif tipis dibandingkan ukuran bintang neutron tersebut berlangsung secara tidak stabil sehingga pembangkitan energi terjadi secara eksplosif yang dikenal sebagai *thermonuclear runaway* (lihat review Lewin, 1993).

Kurva cahaya *burst* memiliki peningkatan kecerlangan secara singkat, sedangkan peredupannya memiliki profil eksponensial (Galloway et al., 2008; Sharma et al. 2020). Berdasarkan pengamatan spektroskopi, *burst* memiliki profil benda hitam, walaupun ditemukan adanya deviasi (Worpel et al., 2013). Pada kasus *burst* tertentu, teramati nilai fluks yang mencapai

limit Eddington. Kasus tersebut dapat dideskripsikan melalui mekanisme *Photospheric Radius Expansion* (PRE). Mekanisme PRE melibatkan pengembangan fotosfer bintang neutron saat terjadi *burst*, kemudian kembali ke ukuran semula setelah terjadi *burst* dan diikuti dengan proses *cooling*. Peristiwa saat fotosfer kembali ke ukuran semula setelah terjadi *burst* disebut sebagai titik *touchdown*. Titik *touchdown* dapat diidentifikasi melalui parameter normalisasi benda hitam, K_{bb} , dan temperatur benda hitam, kT_{bb} , yang berada pada nilai ekstrem lokal (Galloway et al., 2008). Pada umumnya, fluks bolometrik saat titik *touchdown* diasumsikan bernilai sama dengan fluks Eddington sehingga dapat dimanfaatkan untuk menentukan batasan massa dan radius bintang neutron (Miller & Lamb, 2016; Li et al., 2017).

Identifikasi parameter K_{bb} dan kT_{bb} dilakukan melalui proses *spectral fitting* pada data spektrum PRE *burst*. Secara khusus, perlu dilakukan pengolahan *time-resolved spectroscopy* untuk mendapatkan parameter saat titik *touchdown*. *Time-resolved spectroscopy* dilakukan dengan membagi data spektrum suatu PRE *burst* menjadi beberapa segmen waktu sehingga diperoleh data spektrum sebanyak jumlah segmen yang dibuat. Setiap segmen spektrum kemudian dianalisis menggunakan metode *spectral fitting* sehingga didapat parameter K_{bb} dan kT_{bb} dari setiap segmen spektrum. Kedua

parameter tersebut kemudian divisualisasikan dalam dimensi waktu sehingga diperoleh informasi terkait titik *touchdown* (Miller & Lamb, 2016).

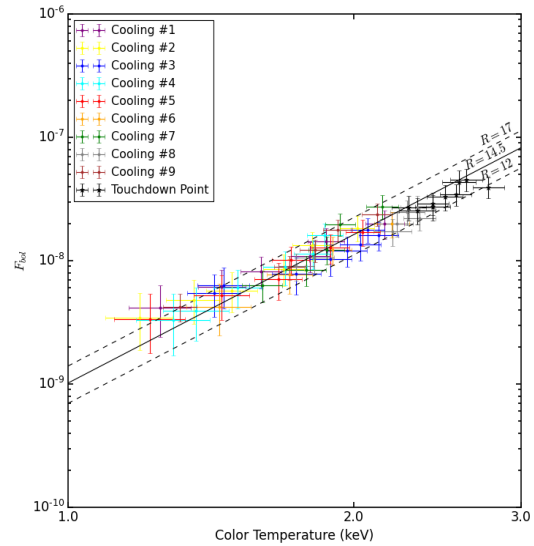
Pada penelitian ini, kami menentukan batasan massa dan radius bintang neutron pada sebuah sistem LMXB di gugus bola NGC 6440, yakni SAX J1748.9-2021. LMXB tersebut ditemukan pada tahun 1998 (in 't Zand et al., 1999) melalui misi BeppoSAX dan teridentifikasi sebagai salah satu sumber PRE *burst* (Galloway et al., 2020). Sistem tersebut terletak pada RA = 17^h48.9^m dan deklinasi *dec* = -20°21". Sistem SAX J1748.9-2021 juga memiliki karakteristik sebagai pulsar pada waktu tertentu. Objek dengan karakteristik tersebut dikenal sebagai *intermittent X-ray pulsar*. Identifikasi sistem ini telah dilakukan pada panjang gelombang sinar-X maupun optik (Cadelano et al., 2017). Nilai batas massa dan radius yang telah ditentukan dapat dimanfaatkan untuk memberikan syarat batas pada persamaan keadaan bintang neutron untuk memahami struktur dan partikel penyusun bintang neutron dengan lebih baik (Kim et al., 2021).

2 ASUMSI DAN PARAMETER PADA PERISTIWA PHOTOSPHERIC RADIUS EXPANSION

Asumsi yang umum digunakan pada penentuan batas nilai massa dan radius adalah nilai fluks saat titik *touchdown* bernilai sama dengan fluks Eddington. Selain itu, diasumsikan juga bahwa seluruh luas area permukaan bintang neutron terlibat dalam proses emisi PRE *burst*. Pada penelitian ini, kedua asumsi tersebut berlaku, efek rotasi bintang neutron diabaikan, dan pengukuran dilakukan dalam kerangka Newtonian. Pada penelitian ini juga dianggap bahwa radius fotosfer sama dengan radius permukaan bintang neutron $R_{ph} = R$. Jika foton pada atmosfer bintang neutron secara efektif mengalami hamburan elektron dan inti atom mengikuti elektron karena gaya elektrostatik, maka

Tabel 1. Data PRE *burst* yang diolah (Galloway et al., 2020).

No.	Obs-ID	Burst Start Time (MJD UT)
#1	60035-02-02-03	52190,46880
#2	60035-02-02-05	52192,26778
#3	60035-02-02-06	52193,32612
#4	60035-02-02-06	52193,40321
#5	60035-02-03-01	52195,32193
#6	94315-01-06-01	55218,95340
#7	94315-01-06-05	55221,80770
#8	94315-01-08-01	55233,50810
#9	94315-01-08-07	55238,17259



Gambar 1. Plot fluks bolometrik dan temperatur benda hitam pada daerah *cooling* dan titik *touchdown*.

bentuk fluks saat titik *touchdown* dapat dideskripsikan melalui persamaan (1)

$$F_{TD} = \frac{cGM}{\kappa d^2}, \quad (1)$$

dengan F_{TD} , c , G , M , κ , dan d berturut-turut menyatakan fluks bolometrik ketika *touchdown*, laju cahaya dalam vakum, konstanta gravitasi, massa bintang neutron, opasitas atmosfer, dan jarak bintang terhadap pengamat. Nilai opasitas atmosfer yang umum digunakan adalah $\kappa = 0.2(1 + X) \text{ cm}^{-2}$ (Li et al., 2017) dengan X adalah fraksi Hidrogen. Sementara itu, dari perbandingan antara fluks pada permukaan bintang neutron dengan fluks yang teramati, dapat ditentukan radius berdasarkan persamaan (2)

$$K_{bb} = \frac{1}{f_c^4} \frac{R^2}{d^2}, \quad (2)$$

dengan K_{bb} menyatakan normalisasi benda hitam, $f_c (= T_{bb}/T_{eff})$ adalah faktor koreksi warna, dan R menyatakan radius bintang neutron. Foton yang dihasilkan oleh fotosfer bintang neutron akan mengalami hamburan saat *burst* terjadi sehingga nilai temperatur yang teramati menjadi lebih besar dari temperatur efektif fotosfer. Faktor koreksi warna, f_c , digunakan untuk mengoreksi perbedaan temperatur tersebut.

Nilai parameter normalisasi benda hitam, K_{bb} , dan temperatur benda hitam, kT_{bb} , didapat melalui pengolahan *time-resolved spectroscopy*. Selanjutnya, nilai fluks bolometrik dapat ditentukan berdasarkan persamaan (3) (Galloway et al., 2008)

$$F_{bol} = 1,076 \times 10^{-11} \left(\frac{kT_{bb}}{1 \text{ keV}} \right) K_{bb} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}. \quad (3)$$

Perhatikan bahwa fluks bolometrik bergantung pada parameter K_{bb} dan kT_{bb} yang diperoleh dari *spectral fitting*.

3 DATA DAN ANALISIS

Data PRE *burst* diambil dari misi *Rossi X-Ray Timing Explorer* (RXTE) dan instrumen *Proportional Counter Array* (PCA). Data tersebut direduksi dan diolah menggunakan perangkat lunak Heasoft 6.28. Data PRE *burst* yang diolah dapat dilihat pada Tabel 1. *File Good Time Interval* (GTI) dibuat untuk mendapatkan interval data yang tidak terganggu oleh SAA berdasarkan kriteria objek *bright*. Data PRE *burst* yang diolah adalah data dengan mode *Event*.

Waktu awal pengolahan *burst* ditentukan berdasarkan parameter TSTART pada *file* dengan mode *Burst-Catcher*. Spektrum *burst* diekstrak menggunakan perintah **seextract** pada *file* mode *Event* dengan waktu eksposur kelipatan 0,25 detik yang bervariasi sedemikian sehingga didapatkan sekitar 1500-3000 *count* dalam kurun waktu eksposur tersebut. Spektrum yang diekstrak hanya berasal dari PCU 2 saja.

Spektrum *background* kemudian diekstrak dengan waktu eksposur 16 detik pada rentang waktu sebelum waktu awal *burst* dari *file Event*. Kriteria interval data yang digunakan sebagai spektrum *background* adalah sebagai berikut:

- 1 Memiliki jumlah *count* < 25% *count* puncak *burst*, F_{peak} ;
- 2 Memiliki jumlah *count* < $\mu \pm \sigma$, dengan σ adalah standar deviasi dari seluruh *count file* pengamatan yang bersesuaian setelah dikoreksi

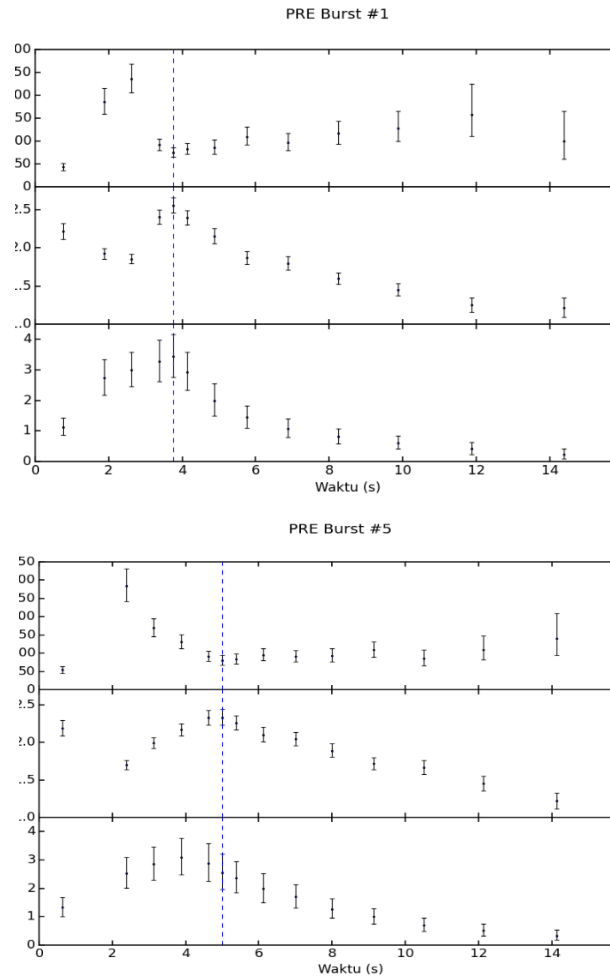
Tabel 2. Nilai parameter fotosfer bintang neutron pada titik *touchdown* dan daerah *cooling*.

No. <i>Burst</i>	F_{TD} ($10^{-8} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$)	kT_{TD} (keV)	$\bar{K}_{bb}$ ($\text{km } 10 \text{ kpc}^{-1}$) ²
#1	3,450	2,561	115,8
#2	3,296	2,493	119,9
#3	2,702	2,285	107,7
#4	2,726	2,420	89,80
#5	2,565	2,332	104,7
#6	2,915	2,423	85,44
#7	4,367	2,580	102,6
#8	4,558	2,628	80,83
#9	3,940	2,771	112,6

GTI.

Selanjutnya, *file* respon dibuat menggunakan perintah **pcarsp** dengan input sebuah *file* spektrum

yang diekstrak dari *file Event* pada interval PRE *burst*. Spektrum *background* dikurangi dari spektrum *burst* sehingga didapat spektrum dengan emisi yang hanya berasal dari *burst* saja. Proses reduksi tersebut umum dilakukan pada reduksi data *burst* (Worpel et al., 2013). Selanjutnya, *spectral fitting* dilakukan pada spektrum *burst* yang telah dikurangi *background* menggunakan model benda hitam terabsorpsi **tbabs×bbodyrad** pada rentang 3-22 keV menggunakan XSPEC. Nilai densitas kolom hidrogen netral n_H yang digunakan adalah $0,307 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (HI4PI Collaboration, 2016). Berdasarkan proses *spectral fitting* yang dilakukan pada spektrum *burst* yang telah dikurangi *background*, didapat parameter normalisasi, K_{bb} , dan temperatur benda hitam, kT_{bb} , pada titik *touchdown* dan daerah *cooling* yang disajikan pada Tabel 2 dengan nilai *chi-squared* tereduksi, χ_{red}^2 , berada pada rentang 0,399-1,771.



Gambar 2. PRE *burst* #1 (atas) dan PRE *burst* #5 (bawah).

Jika parameter kT_{bb} dan F_{bol} dari sembilan PRE *burst* pada daerah *cooling* diplot pada satu diagram, maka akan didapat *trend* yang cukup linier dalam skala logaritmik. Diagram tersebut dapat dilihat pada Gambar 1. Hal tersebut menunjukkan bahwa parameter radius fotosfer tidak berubah secara signifikan saat proses *cooling*. Data dapat didekati dengan model benda hitam tanpa koreksi *redshift*, yang menghasilkan rentang radius 12-17 km. Pada diagram tersebut juga disajikan data titik *touchdown* yang secara sistematis menempati daerah yang mendekati batas bawah radius yang diperoleh dari asumsi benda hitam.

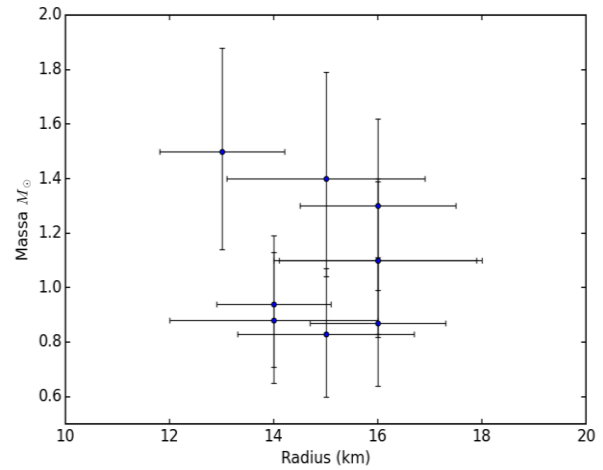
Pada Gambar 2 disajikan plot *time-resolved spectroscopy* dari parameter kT_{bb} , K_{bb} , dan F_{bol} dari *burst* #1 dan #5. Dari kedua diagram tersebut, dapat dilihat profil yang cukup seragam, yakni kenaikan K_{bb} yang bersesuaian dengan penurunan kT_{bb} , selanjutnya K_{bb} berkurang dan kT_{bb} meningkat hingga mencapai titik ekstrem lokalnya masing-masing bersesuaian dengan titik *touchdown*. Sementara itu, pada kurva cahaya fluks bolometrik didapat peningkatan yang cukup cepat dalam kurun waktu sekitar 5 detik, kemudian meredup secara perlahan dalam kurun waktu sekitar 10-15 detik. Garis biru menunjukkan letak titik *touchdown*. Nilai rerata luminositas Eddington dengan bobot seragam dari sembilan PRE *burst* adalah $L_{Edd} = (2,7 \pm 0,7) \times 10^{38} \text{ ergs s}^{-1}$.

Parameter $\bar{K}_{bb}$ didapat dari nilai rerata normalisasi benda hitam pada data dengan nilai F_{bol} pada rentang $0,1F_{TD}$ dan $0,7F_{TD}$. Nilai massa dan radius bintang neutron ditentukan melalui persamaan (1) dan (2). Hasilnya disajikan pada Gambar 3. Sementara itu, nilai faktor koreksi warna, f_c , yang digunakan adalah 1,35 dan fraksi hidrogen X yang digunakan adalah 0.

4 HASIL DAN KESIMPULAN

Batasan massa dan radius bintang neutron pada sistem SAX J1748.9-2021 telah diperoleh berdasarkan metode *touchdown point* dengan menggunakan data sembilan PRE *burst*. Nilai massa berada pada rentang $0,60\text{-}1,88 M_{\odot}$ dan nilai radius berada pada rentang 11,8-18,0 km. Nilai ini masih mencakup hasil dari Güver & Özel (2013) yang menggunakan dua data PRE *burst* dan pendekatan relativistik, namun dengan batas nilai radius yang lebih besar dan batas nilai massa yang lebih kecil.

Pada hasil yang didapatkan, terdapat perbedaan nilai massa dan radius yang cukup signifikan antara



Gambar 3. Nilai massa dan radius bintang neutron

satu *burst* dengan *burst* lainnya sehingga penentuan batasan massa dan radius akan lebih baik dengan data yang lebih banyak. Pengolahan *time-resolved spectroscopy* dengan lebih banyak segmen spektrum dengan jumlah *count* yang memadai untuk setiap segmen pada sebuah profil PRE *burst* akan memberikan akurasi yang lebih baik.

5 PUSTAKA

- Cadelano, M., et al. 2017, *The Astrophysical Journal* 844: 53
- Galloway, D. K., et al. 2008, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 179: 360-422
- Galloway, D. K., et al. 2020, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 249: 32
- Güver, T. & Özel, F. 2013, *The Astrophysical Journal Letters* 765: L1
- HI4PI Collaboration, N. Ben Bekhti, L. Floer, et al. 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 594, A116, (HI4PI Map)
- in 't Zand, J. J. M., et al. 1999, *Astronomy & Astrophysics* 345: 100-108
- Kim, M., Kim, Y.-M., Sung, K. H., Lee, C.-H., & Kwak, K. 2021, *Astronomy & Astrophysics* 650, A139
- Lewin, G. H., van Paradijs, J., & Taam, R. E. 1993, *Space Science Reviews* 62: 223-389
- Li, Z., Falanga, M., Chen, L., Qu, J., & Xu, R. 2017, *The Astrophysical Journal* 845: 8
- Miller, M. C. & Lamb, F. K. 2016, *The European Physical Journal A* 52, 63
- Seward, F. D. & Charles, P. A. 2010, *Exploring the X-ray Universe 2nd ed.*, Cambridge University Press
- Sharma, R., Beri, A., Sanna, A., & Dutta A. 2020, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 49: 4361-4368
- Worpel, H., Galloway, D. K., & Price, D. J. 2013, *The Astrophysical Journal* 772: 94

Studi Pengaruh Metalisitas pada Evolusi Bintang Bermassa Rendah Menggunakan MESA-r12778

S.A. Sakinah^{1*} dan Aprilia¹

¹Program Studi Magister Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: sinta.ays@gmail.com

ABSTRAK

Metalisitas (Z) merupakan fraksi massa unsur kimia yang lebih berat daripada helium. Metalisitas menjadi krusial untuk dikaji, karena dapat memengaruhi parameter fisis bintang selama tahapan evolusinya. Fokus penelitian yaitu mengetahui pengaruh variasi nilai metalisitas ($Z = 0,0001; 0,001; 0,002; 0,004; 0,01; 0,02; \text{ dan } 0,03$) terhadap evolusi bintang bermassa rendah, dengan sampel bintang bermassa $1 M_{\odot}$. Asumsi awal pemodelan, yaitu dengan mengambil nilai standar metalisitas matahari sebesar $Z = 0,017$, kemudian memvariasikan nilai metalisitas dibawah dan diatas nilai tersebut untuk melihat pengaruhnya terhadap evolusi bintang, dari fase *Pre-Main Sequence* (PMS) hingga fase *White Dwarf* (WD). Program evolusi bintang yang digunakan adalah MESA-r12778 versi Linux. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa pada kondisi bintang bermetalisitas tinggi, parameter opasitas (κ) dan *lifetime* (t) meningkat, sedangkan nilai luminositas (L), temperatur permukaan (T_{eff}), densitas (ρ), radius (R), dan massa (M) menurun. Hasil yang berkebalikan diperoleh untuk nilai metalisitas rendah. Pada kondisi bintang bermetalisitas tinggi, jumlah elektron transisi yang dapat menangkap foton bertambah, sehingga *mean free path photon* berkurang dan foton tidak dapat bergerak keluar dari interior bintang menuju permukaan secara bebas, akibatnya bintang terlihat lebih buram (*opaque*). Bintang bermetalisitas tinggi juga turut andil dalam peningkatan *mass loss*, terutama pada fase *Red Giant Branch* (RGB). Pada tinjauan *lifetime*, kelimpahan logam yang tinggi membuat waktu pembakaran energi nuklir dan *main sequence lifetime* yang lebih lama, dan akhirnya meningkatkan *lifetime* bintang. Peningkatan *lifetime* bintang dapat dilihat dari perubahan metalisitas sebesar 1%, yang dapat memberikan selisih usia hidup ~ 2 Gyr.

Kata Kunci: Metalisitas – Evolusi bintang – MESA

1 PENDAHULUAN

Hampir semua fenomena di alam semesta termasuk evolusi bintang dipengaruhi oleh metalisitas. Metalisitas (Z) didefinisikan sebagai fraksi massa elemen yang lebih berat dari helium (Y) dan hidrogen (X). Tinjauan metalisitas menjadi penting karena dapat memengaruhi parameter fisis bintang selama tahapan evolusinya.

Berdasarkan penelitian Kalirai et al. (2009), yang membandingkan dua gugus bintang M4 dan NGC 6791 dengan metalisitas yang berbeda, dan membuktikan adanya pengaruh metalisitas dalam perubahan nilai parameter fisis pada jejak evolusi bintang. Selanjutnya, Romero et al. (2015) menggunakan program evolusi bintang *La Plata stellar evolution Code* (LPCODE) juga mendapatkan hasil yang sama.

Untuk dapat mengonfirmasi hasil penelitian sebelumnya. Pada penelitian ini, kami fokuskan untuk mengaplikasikannya pada program evolusi bintang yang berbeda, yaitu *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics* (MESA) release 12778 versi Linux, dengan melihat pengaruh variasi nilai metalisitas ($Z = 0,0001; 0,001; 0,002; 0,004; 0,01; 0,02; \text{ dan } 0,03$) terhadap parameter opasitas, luminositas, temperatur permukaan, densitas,

lifetime, radius, dan massa bintang bermassa $1 M_{\odot}$ dari fase PMS hingga WD.

Data dan instrument yang digunakan secara lebih terperinci dipaparkan di Bab 2. Kemudian, bagian hasil dan pembahasan di Bab 3. Serta diakhiri dengan kesimpulan di Bab 4.

2 DATA DAN INSTRUMEN

Sampel bintang bermassa $1 M_{\odot}$ (*solar like star*), dengan tujuh variasi metalisitas, yaitu $Z = 0,0001; 0,001; 0,002; 0,004; 0,01; 0,02; \text{ dan } 0,03$ digunakan untuk dapat melihat pengaruh metalisitas pada evolusi bintang bermassa rendah. Pemilihan nilai metalisitas tersebut menyesuaikan dengan penelitian dari Romero et al. (2015), sehingga dapat mengonfirmasi hasil yang diperoleh, walaupun menggunakan program evolusi bintang yang berbeda.

Instrumen penelitian berupa program *open source* yang dapat mensimulasikan evolusi bintang bermassa rendah hingga bintang bermassa besar, dengan rentang massa awal yang diperbolehkan $M_{\text{MS}} = 0,08 M_{\odot} - 100 M_{\odot}$ (Paxton dkk., 2011), yaitu MESA-r12788 versi Linux. MESA-r12778 sudah dilengkapi dengan adanya fitur *test-suite* evolusi bintang bermassa rendah dari fase *Pre-Main Sequence* (PMS) hingga *White Dwarf* (WD) di dalam direktori kerja MESA.



Gambar 1. Diagram pengaruh metalisitas tinggi pada parameter fisis selama evolusi bintang bermassa rendah.

Beberapa asumsi awal yang digunakan dalam pemodelan ini adalah komposisi awal matahari yang digunakan mengikuti Grevesse dan Sauval (1998) dengan nilai fraksi hidrogen sebesar $X=0,735$, helium $Y=0,248$, dan metalisitas sebesar $Z=0,017$. Skema angin bintang yang digunakan, yaitu Reimers dengan *scaling factor reimer* $\eta_R = 0,8$ pada fase RGB, dan Blöcker dengan *scaling factor blöcker* $\eta_B = 0,7$ pada fase AGB. *Base nuclear reaction network* yang digunakan adalah O18 dan ne22 dan efek rotasi bintang diabaikan.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Perubahan nilai metalisitas (Z) yang berarti perubahan pada komposisi kimia dalam struktur bintang bermassa rendah direpresentasikan melalui besaran fisis opasitas (κ). Pada kasus bintang bermetalisitas tinggi, nilai opasitas bintang meningkat. Hal ini dikarenakan pada kondisi metalisitas tinggi, jumlah elektron transisi yang dapat menangkap foton akan semakin bertambah, sehingga *mean free path photon* berkurang dan foton tidak dapat bergerak keluar secara bebas dari interior bintang menuju permukaan, sehingga bintang akan terlihat lebih buram (*opaque*). Hal tersebut dapat diamati dari semakin kecilnya nilai luminositas (L) dan temperatur permukaan bintang (T_{eff}). Selain itu, nilai opasitas yang besar juga menyebabkan bintang memiliki densitas atau kerapatan yang lebih kecil. Berbeda dengan bintang bermetalisitas rendah yang memiliki densitas lebih besar atau bersifat lebih *compact*.

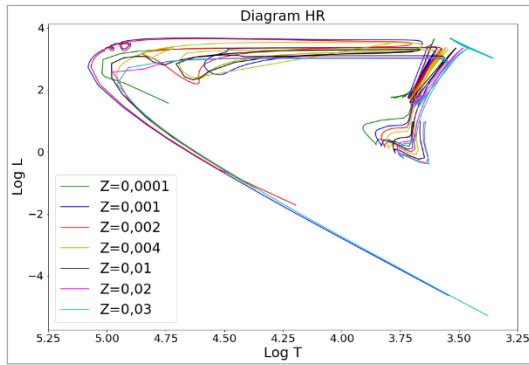
Aspek lainnya yang dapat berpengaruh pada kondisi metalisitas tinggi adalah perubahan pada transpor energi. Pada kondisi tersebut, transpor energi melalui proses konveksi menjadi lebih dominan dibandingkan dengan transpor energi secara radiasi. Hal ini disebabkan karena pada

kondisi metalisitas tinggi, nilai opasitas yang meningkat menyebabkan gradien temperatur juga meningkat di dalam bintang (Amard dan Matt, 2020). Hal ini mengarah pada semakin dalamnya lapisan konveksi, atau dengan kata lain proses konveksi menjadi lebih dominan.

Metalisitas juga mempunyai andil dalam memengaruhi aktivitas magnetik dan laju rotasi. bintang bermetalisitas tinggi mempunyai laju rotasi yang lebih kecil. Beda halnya dengan bintang bermetalisitas rendah yang mempunyai laju rotasi lebih besar. Amard dan Matt (2020), memprediksi bahwa *solar like star* dengan $Z=0,008$ (*poor metal*) mempunyai laju rotasi yang lebih besar sehingga periode rotasi bintang menjadi kurang dari 20 hari. Selain itu, kopling antara lapisan konveksi dan rotasi dari bintang, dapat memicu mekanisme pembangkitan medan magnet. Aktivitas magnetik yang besar juga mendorong pelontaran materi dari permukaan bintang baik melalui angin bintang pada fase RGB, AGB, maupun *planetary nebula*, yang berakibat pada jumlah *mass loss* yang semakin besar. Selain itu, waktu evolusi bintang yang lebih lama juga berperan dalam tingginya *mass loss* tersebut. yang akhirnya membuat *remnant radius* (R) dan *remnant mass* (M) pada akhir fase hidup bintang lebih kecil (Giarrata, 2017). Ringkasan dari pengaruh nilai metalisitas yang tinggi pada bintang bermassa rendah divisualisasikan dalam bentuk diagram pada Gambar 1. Hal sebaliknya terjadi untuk bintang bermetalisitas rendah.

3.1 Diagram Hertzsprung Russel (HR)

Pengaruh metalisitas terhadap luminositas dan temperatur permukaan bintang direpresentasikan melalui diagram HR. Untuk bintang bermassa $1M_{\odot}$ dengan tujuh variasi metalisitas yang tertera pada Gambar 2 diagram HR menunjukkan bahwa

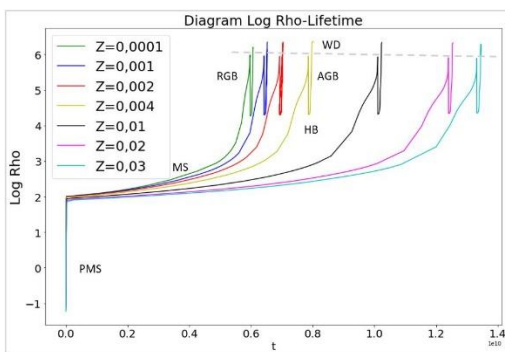


Gambar 2. Diagram HR bintang bermassa $1 M_{\odot}$ dengan tujuh variasi metalisitas 0,0001 (hijau); 0,001 (biru tua); 0,002 (merah); 0,004 (kuning); 0,01 (hitam); 0,02 (ungu); dan 0,03 (biru muda) dari fase PMS hingga WD.

bintang dengan metalisitas tertinggi $Z=0,03$ (garis biru muda) mempunyai posisi yang lebih kanan dan lebih bawah, yang menandakan bintang mempunyai nilai temperatur permukaan dan luminositas yang lebih kecil. Beda halnya dengan bintang bermetalisitas terendah, $Z=0,0001$ (garis hijau) yang menempati posisi yang lebih kiri dan atas, yang menandakan nilai temperatur permukaan dan luminositas yang lebih besar. Hasil ini mengonfirmasi teori sebelumnya yang tertera pada Gambar 1.

3.2 Pengaruh metalisitas terhadap densitas

Diagram $\log \rho$ terhadap *lifetime* pada Gambar 3, menunjukkan pada saat evolusi awal, fase PMS, densitas bintang bermassa rendah naik secara tajam hingga mencapai densitas sekitar $100 \rho_{\odot}$, bintang kemudian memasuki fase deret utama dengan peningkatan densitas secara perlahan (ditunjukkan oleh garis landai), setelah fase *Terminal Age Main Sequence* (TAMS), densitas bintang kembali meningkat secara signifikan (ditunjukkan oleh garis yang lebih curam) memasuki fase RGB, kemudian,



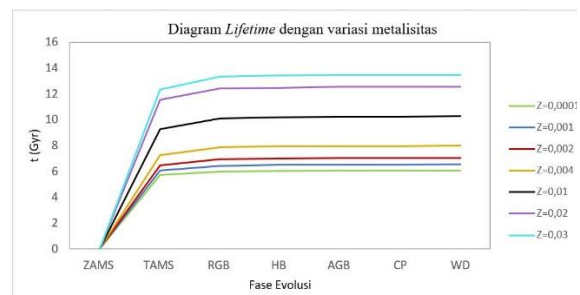
Gambar 3. Diagram $\log \rho$ terhadap *lifetime* dari fase PMS hingga WD. Tinjauan pada fase RGB ditandai dengan garis putus-putus.

menyusut pada fase HB, dan meningkat kembali pada fase AGB hingga WD. Untuk bintang bermetalisitas tinggi $Z=0,03$ (garis biru muda) mempunyai posisi lebih bawah, dapat dilihat dari awal fase deret utama hingga ke fase RGB. Kemudian, dapat terlihat bahwa densitas bintang bermetalisitas tinggi lebih kecil dibandingkan densitas bintang bermetalisitas rendah, walaupun selisihnya tidak terlalu signifikan (ditandai dengan garis putus-putus). Berdasarkan literatur, perubahan densitas akibat metalisitas ini akan signifikan untuk bintang bermassa besar (Hirshci, dkk., 2008).

3.3 Pengaruh metalisitas terhadap *lifetime*

Data *lifetime* yang diperoleh dari hasil output MESA, diklasifikasikan berdasarkan tahapan-tahapan tertentu untuk tujuh variasi metalisitas. Tahapan-tahapan tersebut di antaranya *Zero Age Main-Sequence* (ZAMS) yaitu kondisi saat bintang baru saja memasuki fase deret utama dan *Terminal Age Main-Sequence* (TAMS) adalah kondisi akhir fase deret utama ditandai dengan hidrogen di inti telah sepenuhnya habis berubah menjadi helium. Kemudian, memasuki fase bintang raksasa, diantaranya fase *Red Giant Branch* (RGB), *Horizontal Branch* (HB), dan *Asymptotic Giant Branch* (AGB). Setelahnya, memasuki fase pasca AGB dan *planetary nebula*, yaitu tahapan awal *Cooling Process* (CP) ditandai dengan temperatur bintang yang mulai mendingin (berkurang) dan kemudian diakhiri di fase *White Dwarf* (WD). Data tersebut diplot dan diperoleh hubungan metalisitas dan *lifetime* bintang, ditunjukkan pada Gambar 4.

Diagram *lifetime* pada setiap fase evolusi bintang pada Gambar 4, menunjukkan bahwa bintang bermetalisitas tinggi (garis biru muda dengan $Z=0,03$), berusia hidup bintang lebih lama sekitar 13 Gyr, berbeda dengan bintang bermetalisitas rendah (garis hijau dengan $Z=0,0001$) yang mempunyai usia hidup lebih singkat sekitar 6 Gyr. Selain itu, dari Gambar 4 juga terlihat bahwa untuk perubahan metalisitas sebesar 1% saja, bahkan dapat

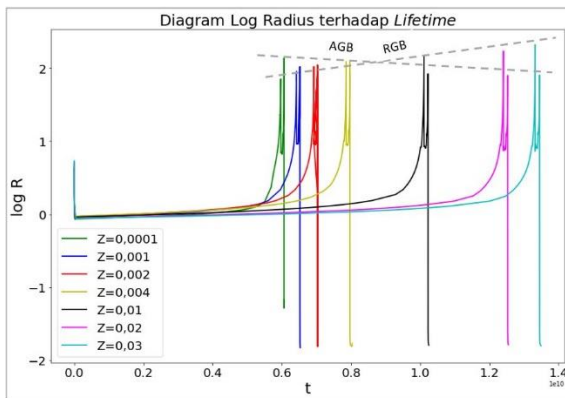


Gambar 4. Diagram hubungan *lifetime* pada variasi metalisitas bintang bermassa $1 M_{\odot}$ dalam beberapa tahapan evolusinya.

memberikan selisih usia hidup ~ 2 Gyr. Misalnya pada bintang bermetalisitas $Z=0,02$ (garis ungu) yang mempunyai usia hidup sekitar 12 Gyr bintang bermetalisitas $Z=0,01$ (garis hitam) mempunyai usia hidup sekitar 10 Gyr. Dari diagram tersebut juga menunjukkan bahwa fase deret utama (ZAMS-TAMS) merupakan fase terlama hidup bintang.

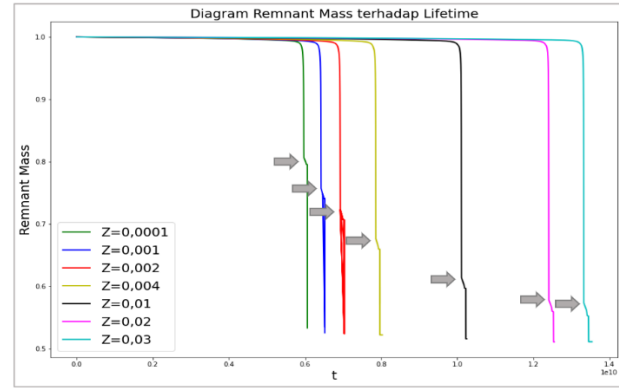
3.4 Pengaruh metalisitas terhadap remnant radius dan remnant mass bintang

Gambar 5 secara umum menunjukkan bahwa radius bintang setelah fase deret utama memasuki fase RGB akan membesar, kemudian berkurang saat memasuki fase HB, dan kembali membesar ketika memasuki fase AGB, dan akhirnya berkurang signifikan pasca AGB yaitu saat memasuki fase WD. Pada fase RGB, bintang bermetalisitas tinggi $Z=0,03$ (garis biru muda) mempunyai radius yang paling besar. Sedangkan pada fase AGB, bintang bermetalisitas tinggi tersebut mempunyai radius yang paling kecil, atau dengan kata lain, bintang bermetalisitas tinggi pada akhirnya mempunyai ukuran yang lebih kecil dibandingkan bintang bermetalisitas rendah. Hal ini disebabkan karena pelontaran materi dari permukaan bintang yang lebih banyak terjadi pada fase AGB. Selain itu, bintang bermetalisitas tinggi juga mempunyai waktu hidup yang lebih lama sehingga *mass loss* baik berupa pelontaran materi ke medium antar bintang dan angin bintang lebih sering terjadi, yang berakibat semakin banyaknya materi yang hilang dari permukaan bintang.



Gambar 5. Diagram log R terhadap *lifetime* dari fase *pre-main sequence* hingga *white dwarf*. Tinjauan pada fase RGB dan AGB ditandai dengan garis putus-putus.

Hal yang sama juga terdapat pada parameter *remnant mass* bintang. Data dari hasil *output* MESA berupa parameter massa selama tahapan evolusinya pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram *remnant mass* terhadap *lifetime* dari fase PMS hingga WD, dengan tanda panah menandakan posisi pada fase RGB.

4 KESIMPULAN

Metalisitas terbukti dapat memengaruhi parameter fisis bintang selama evolusinya. Pada kondisi bintang bermetalisitas tinggi, parameter opasitas (κ) dan *lifetime* (t) meningkat, sedangkan nilai luminositas (L), temperatur permukaan (T_{eff}), densitas (ρ), *remnant radius* (R), dan *remnant mass* (M) menurun. Hasil yang berkebalikan diperoleh untuk nilai metalisitas rendah.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih banyak kepada semua dosen di Program Studi Magister Astronomi FMIPA ITB. Penelitian ini juga mendapat dukungan dari beasiswa LPDP periode 2020-2021.

5 PUSTAKA

- Amard, L. & Matt, P. 2020, *The Astrophysical Journal*, 889, 108-120
- Giarratana, S. 2017, *Thesis*, Universita degli studi Padova, 5-59
- Grevesse, N. & Sauval, A. J. 1998, *Space Sci. Rev.* 85, 161
- Hirschi, R., Chiappini, C., Meynet, G., Maeder, A., & Ekström, S. 2008, in *Proc. of Stellar Evolution at Low Metallicity, Massive Stars as Cosmic Engines*, IAU Symposium, 250, 217-230
- Kalirai, J. S., Saul Davis, D., Richer, H. B., Bergeron, P., Catelan, M., Hansen, B. M. S., & Michael Rich, R. 2009, *The Astrophysical Journal*, 705, 408-425
- Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., Herwig, F., & Timmes, F. 2011, *The Astrophysical Journal*, 192, 1-35.
- Romero, A. D., Campos, F., & Kepler, S. O. 2015, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 450, 3708-3723.

V/R Variations in H α Emission Line Spectra of B-emission Star EW Lac Based on Its Spectral Physical Parameters

A. S. Bernadi^{1*} and Aprilia¹

¹Department of Astronomy, Bandung Institute of Technology, Bandung, Indonesia

*E-mail: ancillashania@gmail.com

ABSTRACT

B-emission (Be) stars are non-supergiant B-type stars whose spectra have shown one or more Balmer emission lines. B emission stars usually have variability on their spectra emission and the variability varies differently on each star. EW Lacertae (HR 8731) is one of B-emission stars which is still studied until now since the star has periodic variability on V/R (violet to red intensity ratio) feature of the emission line. The goal of the research is to analyze V/R variations of H α emission line in the spectrum of B-emission Star EW Lac based on its spectral physical parameters. The data are downloaded from BeSS (B-Emission Star Spectra) database from 2001 to 2020. IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) program is used to data reduction. The spectra's parameters calculated are peak velocity V_p and V_r , radial velocity V_c , FWHM, EW, peak separation $2\Delta_p$, and absorption depth D_c . The results show: the period of V/R long term variation in EW Lac is ± 8 years and 4 months; all of the physical parameters have a weak correlation with V/R long term variation; and the long term V/R variation is suspected come from one-armed oscillation in the central equatorial disk of the star.

Key Words: B-Emission Star – EW Lac Star – Spectroscopy

1 INTRODUCTION

B-emission (Be) star is a B type non supergiant star that ever have an emission line in its spectra, or have the emission line now. This emission line presumed to have arisen because of star envelope's rotational motion (Struve, 1931). B[e] star have a really high rotation speed, in some stars the rotation speed almost approaching their critical speed.

The thing that makes Be star an interesting object to study is the characteristic of this star which has emission features in its spectrum. Besides that, this star also has a wide range of variability in the parameters of the emission line. This is an interesting object of study for researchers because the cause of this variability is still unknown. Some of the proposed scenarios include non-radial pulsations, rotational modulation, and one-armed oscillations in the disk surrounding the Be star.

One of the Be stars which actively studied until now is EW Lac (EW Lacertae) or HR 8731. EW Lac is a Be star with B4IIIpe class and has a shell emission profile. The observed rotational speed ($v \sin i$) is 265 km/s (Chauville, et al., 2001). EW Lac is already known as a Be star which shows periodic variability in the value of V/R (violet to red ratio) in the H α spectrum. This variability has existed since 1975 (Kogure and Suzuki, 1984).

Hubert et al. (1987) divided the spectral state of this star into two phases named the quiet phase in the Be-shell state (1960-1974) and the active phase when variations occurred (1975-1984). The V/R variation period has an average of 7 years, and the

results of a recent study by Mon et al. (2013) found that the characteristics of the variation in 2007 – 2012 were similar to those that occurred in 1976 – 1986.

In this work, further research will be carried out on the star EW Lac. The research will focus on the V/R variations that exist in the spectrum of this star, especially looking for periods of variability by utilizing the data from previous work and adding the latest data. Data from variations of other parameters contained in the H α spectrum and looking for its relation with V/R variations. From this work, it is expected to determine what causes the V/R variability that occurs.

2 RESEARCH METHOD

Spectral data for the star EW Lac were taken from the B Emission Star Spectra database. All spectra from various observers and instruments will appear in this database. For research purposes, the H α spectrum data taken is the spectrum from 2001 to 2020. The spectrum is first sorted, only the spectrum in the H α region (6562Å) will be taken and spectrum separation is also carried out with clear emission features.

The 79 data will be processed using software assistance. The software used is IRAF (Image Reduction and Analysis Facility).

3 RESULT AND ANALYSIS

Data obtained from the spectrum using fitting and deblending tools on IRAF are continuum line value, emission peak and central core absorption's wavelength, flux, equivalent width, and full width at

half maximum. After the data is processed, the parameter value obtained are V/R ratio, emission peak and central core absorption's velocity, radial velocity, emission line's full width at half maximum and equivalent width, peak separation, and absorption depth.

The resolution of the data is various depending on the instrument that is used. The data that is used in this research was taken from the database of BeSS, the minimum resolution range is 5000 while the largest is 50000. This, when converted into uncertainty, becomes $1.3 \text{ \AA}$ for data with a resolution of 5000 and $0.13 \text{ \AA}$ for data with a resolution of 50000 so that the range the data uncertainty is $\pm 0.13 - 1.3 \text{ \AA}$. All the result is shown on Figure 1 – Figure 7.

3.1 Long Term V/R Variation Period of H α Line in EW Lac

The V/R graph show two emission peaks in July 2008 and December 2016. From here it can be concluded that long term V/R variation period of EW Lac is 8 years and 4 months. This result only has 4 months difference with Mon et al., (2013) that found the long-term V/R variation period ranged between 7 until 8 years. This imply that V/R variation from 1970 until 2020 may be have the same cause.

The one-armed oscillation also indicated from the V/R value. When the V/R value is really high, as in 2008, it signifies the envelope's part that move to observer's direction is more than the opposite part. This difference show that the one-armed oscillation is present in star's envelope. Meanwhile, when the V/R ratio is 1 (one), then one-armed oscillation may be not occurred in the star's envelope at that time.

3.2 Relation Between V/R Variation with Other Physical Parameters in H α Emission Spectrum In EW Lac

Red and Violet Peak Velocity. In general, peak velocity have a very low correlation with V/R variation value at the same time. This is observed in violet and red peak. Violet peak velocity is higher than violet peak at 2007 – 2016. From this, we can predict that emission spectrum is more dominant to undergo blue shift, and this can be caused by an area in star's envelope that move closer to the observer.

Radial Velocity. EW Lac's radial velocity have an oscillating value with period shorter than V/R variation. The radial velocity oscillation have approximately one year period. This value can be analyzed further by considering if there is effect from the earth's orbital velocity and rotation that affect the observation.

Equivalent Width (EW). Equivalent width value show abundance of hydrogen in star's envelope. In general, emission equivalent width not showing a strong correlation with V/R variation. Starting in 2013, EW emission value keep decreasing. This is because the absorption is getting stronger as time getting by. When the absorption become stronger, emission feature became smaller so that the EW emission also getting smaller. In 2008 when V/R variation is in the peak, the EW value is still high, indicating that there is area in star's envelope that have higher density than the others. This area with higher density can cause one-armed oscillation phenomenon, causing the V/R peak in that year.

Full Width at Half Maximum (FWHM). Red and violet peak's FWHM graph have a very similar form, except in 2006 – 2011 that coincide with V/R maxima in 2008. FWHM value also have a weak correlation with V/R value.

Absorption Depth. In general, correlation between absorption's depth and V/R is not found. But, this depth value seem to oscillate with a random value and period.

Peak Separation. Peak separation value can be used to determine envelope's radius. If assumed that star envelope is circle and move with Keplerian rotation, then the average envelope radius is 4.52 star radius. Other interesting thing is in 2017, peak separation value increased quite sharply, this arises because the emission feature is getting wider. Peak separation value show rotational velocity field, associated with conservation of angular momentum. If the velocity field is small, as in 2017, then at that time the envelope's density is distributed evenly throughout the area and the one-armed oscillation don't appear.

3.3 The Cause of Long Term V/R Variation in EW Lac

Model about the cause of long term V/R variation that actively progress and used by many people is one-armed oscillation model. This model first suggested by Okazaki (1991) based on global oscillation theory in thin and non-self-gravitating disk. According to Okazaki (1991), long term V/R variation is caused by global one-armed oscillation phenomenon in cold equatorial disk. In isothermal equatorial disk, one-armed oscillation model also can explain well about long term periodicity that observed in B-emission star.

Newest assumption about the cause of V/R variation in EW Lac is explained on Mon et al. (2013). The article explained that the cause of long term V/R variation is one-armed oscillation, but the

movement is retrograde. It is because there is difference in electron amount in different optical depth, indicate that there is a rise in density at the disk. This density enhancement assumed to be one-armed oscillation in star's equatorial disk.

4 CONCLUSION

Based on this research, it can be concluded that:

- The period of time scale long term V/R variation from 2001 until 2020 is 8 years and 4 months.
- Every physical parameter discussed has a weak correlation with V/R value.
- EW Lac star's long term V/R variation is caused by global phenomenon one-armed oscillation in a cold equatorial plane.
- One armed oscillation in EW Lac star can be shown from some parameters. For example, in 2008 equivalent width value is high, thus

give rise to difference in envelope's density and create one-armed oscillation.

Acknowledgement

The authors are grateful for Dr. Aprilia, Dr. Chatief Kunjaya, Dr. M. Irfan Hakim, and Dr. Lucky Puspitarini for the guidance and input while working on this research.

5 REFERENCES

- Chauville, J., Zorec, J., Ballereau, D., Morrell, N., Cidale, L. & Garcia, A. 2001, A&A, 378, 861
 Hubert, A. M., Floquet, M. Chauville, J. & Chambon, M. T. 1987, A&AS, 70, 443
 Kogure, T. & Suzuki, M. 1984, PASJ, 36, 191
 Mon, M., Suzuki, M., Moritoni, Y. and Kogure, T. 2013, PASJ, 65, 77
 Okazaki, A. T. 1991, PASJ, 43, 75
 Struve, O., 1931, ApJ, 73, 94

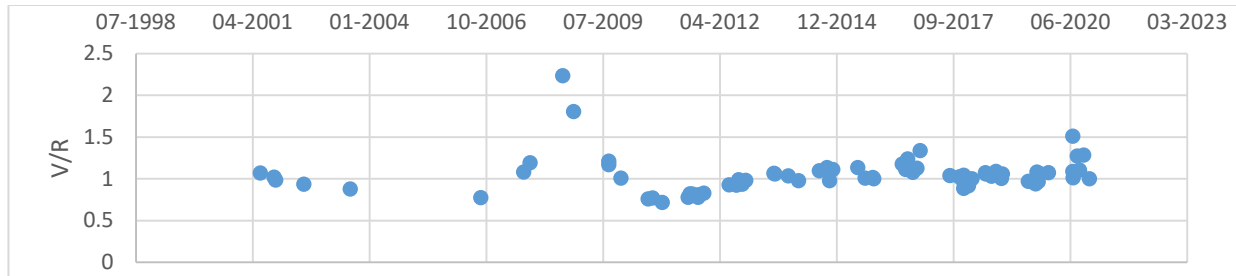


Figure 1. Long term variation of V/R from 2001 until 2020 in EW Lac.

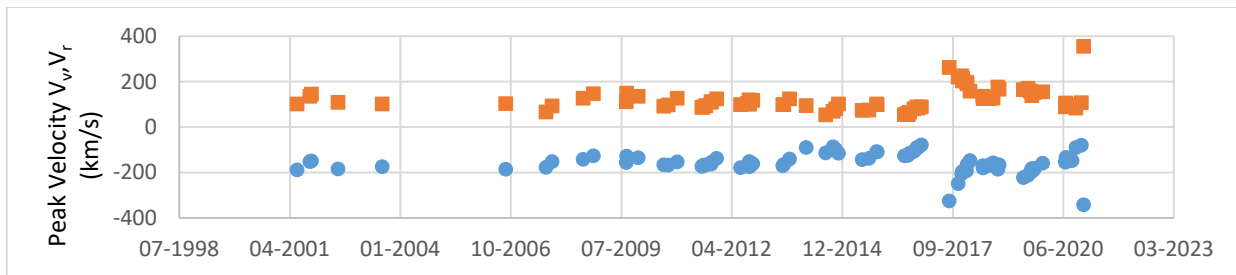


Figure 2. Long term variation of peak velocities from 2001 until 2020 in EW Lac.

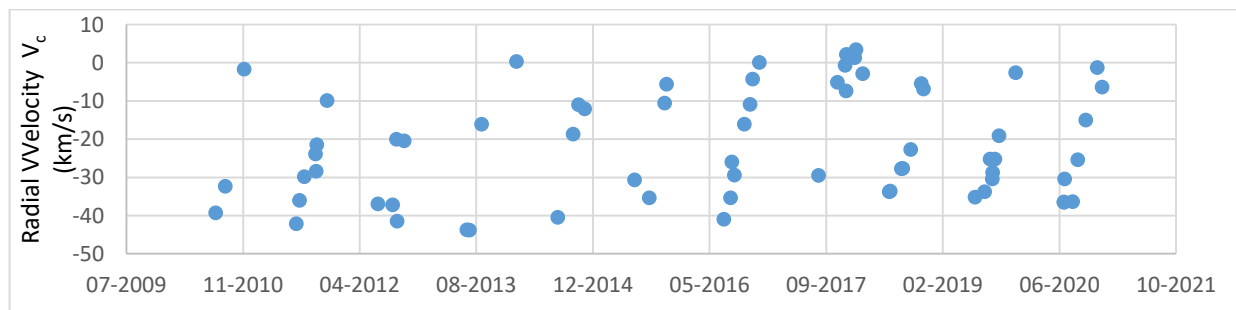


Figure 3. Long term variation of radial velocities from 2010 until 2020 in EW Lac.

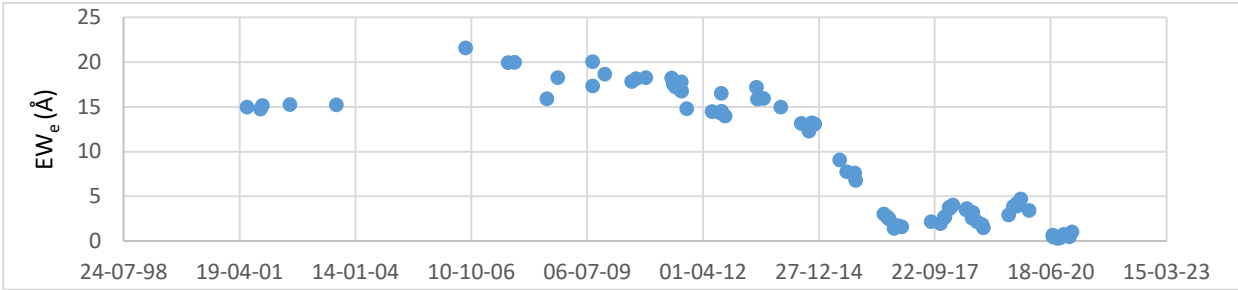


Figure 4. Long term variation of equivalent width from 2001 until 2020 in EW Lac.

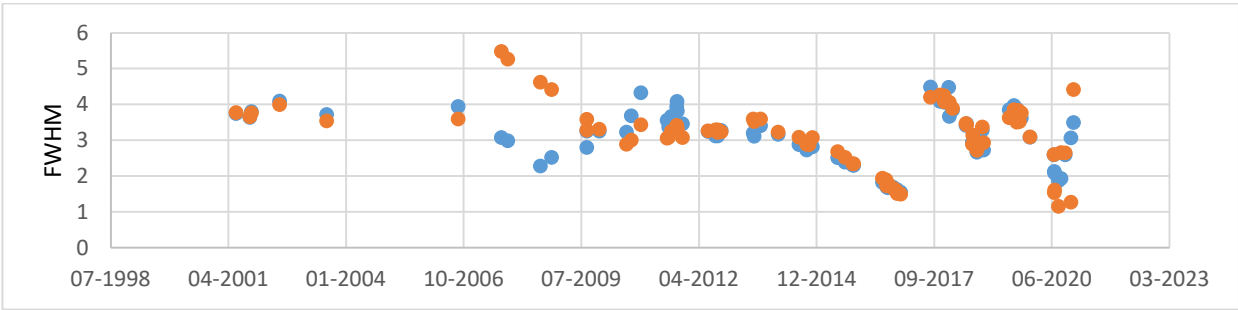


Figure 5. Long term variation of Full Width at Half Maximum from 2001 until 2020 in EW Lac.

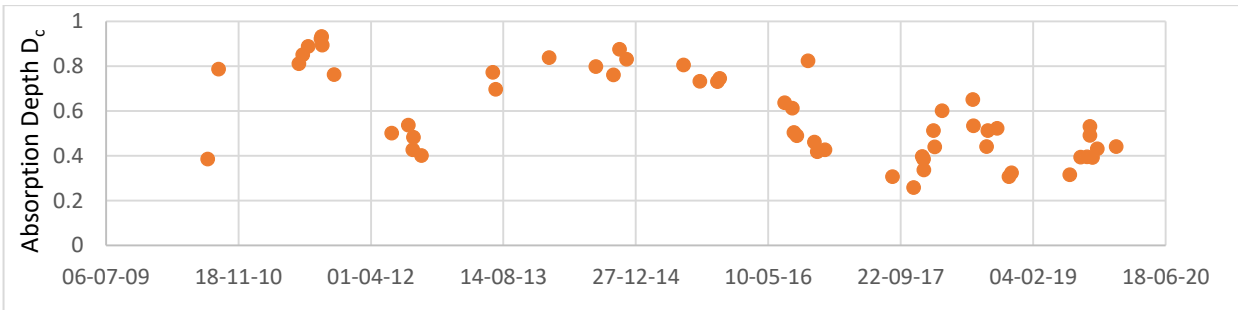


Figure 6. Long term variation of Absorption Depth from 2010 until 2020 in EW Lac.

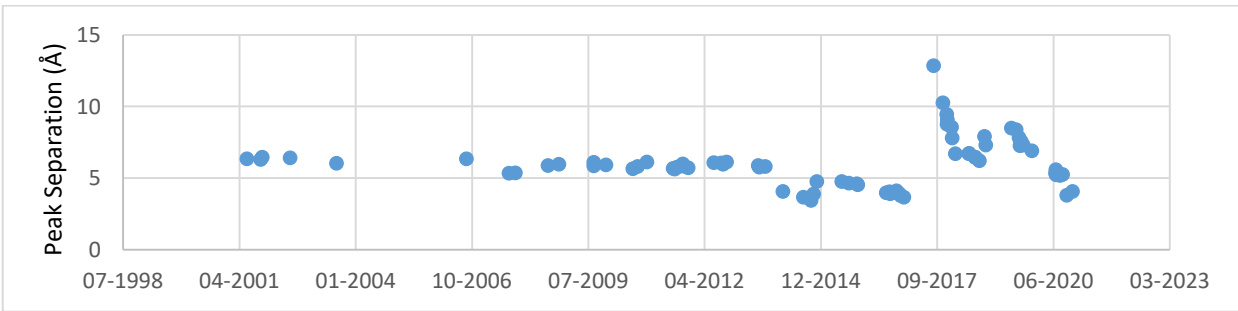


Figure 7. Long term variation of Peak Separation from 2001 until 2020 in EW Lac.

Maser Observations to Probe Massive Star Formation in G354.61+0.47

M. Hafieduddin^{1,2*}, T. Hirota^{3,4}, T. Hidayat^{1,2} and K. Sugiyama^{3,5}

¹Astronomy Research Group, FMIPA ITB, Bandung, Indonesia

²Bosscha Observatory, FMIPA ITB, Lembang, Indonesia

³Mizusawa VLBI Observatory, NAOJ, Tokyo, Japan

⁴The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, Hayama, Japan

⁵National Astronomical Research Institute Thailand, NARIT, Chiang Mai, Thailand

*E-mail: mhafieduddin@gmail.com

ABSTRACT

Massive stars, or stars with mass more than $8M_{\odot}$, have great impact both in local and cosmological scale. But the modelling of their formation is hindered by the rarity of data. The advance of *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) helps us overcome this problem by enabling us to observe structure tracer with high angular resolution. In this research, we use data taken with *KVN and VERA Array* (KaVA), *East-Asian VLBI Network* (EAVN), and *Atacama Large Millimeter/submillimeter Array* (ALMA) to probe structures in massive star formation region G354.61+0.47. We combine the 22 GHz H_2O maser data taken with KaVA with the 6.7 GHz CH_3OH maser data taken with EAVN and then compare them with continuum and CO ($J=3-2$) emission line data taken with ALMA. Calibrations, data processing, and imaging are conducted using AIPS and CASA software. Proper motions are then measured accordingly. We found that H_2O maser distribution is approximately perpendicular in the east side of elliptical distribution of CH_3OH maser and its position and proper motion agree with outflow structure traced by CO ($J=3-2$) line. Comparison with ALMA continuum map leads us to conclude so far that CH_3OH maser distribution traces circumstellar disk structure and H_2O maser distribution shows us a more general motion of the gases, such as outflows, expansion or turbulence.

Keywords: *Star Formation: Massive – Maser – VLBI*

1 INTRODUCTION

Massive stars, or stars with mass more than $8M_{\odot}$, have important impacts in the history of the universe. Other than being a main luminosity sources in galaxies, they also impact their host galaxies evolution. Stellar wind from these stars affects the turbulence in its environments. Their UV radiation ionizes gases and evaporates dust around them and drives flows and expansion motions of materials. Their death in the form of supernova explosion disturbs their neighbours but also enriches them with elements and compounds that could not be formed in other places and conditions. More processes influenced by this change in metallicity ranges from star formations to planet formation (Tan et al., 2014). In more general schemes, this will also affect the physical, chemical, and morphological structure of their host galaxies (Kennicutt et al., 1998, Kennicutt et al. 2005).

Even though this class of star is important for understanding the evolution of the universe, very much remains to be known about its formation and early evolution. Observation to these objects is hindered by their short evolution timescale, heavy interstellar absorption, clustering with other objects, and their very far distance (Tan et al., 2014). They are also rare according to stellar initial mass function (IMF) and spend about 15% of their entire lifetime in pre-main sequence (PMS) phase and then only a

part of that in possible collapse and active accretion phase (Churchwell, 2002). These factors make observation very hard to be done, especially in their early phases.

The advance of interferometry techniques helps much to alleviate angular resolution problems caused by distance and close proximity to other objects. Tracers such as masers and emission lines are then used to circumvent extinction caused by dust and gases that shroud massive star formation region. Methanol masers are specifically used to trace massive star formation process (e.g., Fujisawa et al., 2014) and water masers are used to trace more general gas flow process such as outflow or expansion (e.g., Burns et al., 2017; Moscadelli et al., 2007). The problem of rarity as a consequence of massive stars short timescale and small portion in IMF distribution is overcome by the existence of large survey programs.

Maser object G354.61+0.47 is located at the Scorpius constellation with approximate ICRS coordinate of RA(J2000) $17^h 30^m 17.15^s$ and Dec.(J2000) $-33^{\circ} 13' 54.8''$ (Csengeri et al., 2017a). It is located at the distance of 3.8 kpc (Green & McClure-Griffiths, 2011). Multiple masers have been observed in this object, such as OH maser (e.g. Caswell, 1998); and also CH_3OH for both Class I (e.g. Yang et al., 2017), and Class II (e.g. Fujisawa et al., 2014) using single-dish and interferometric observations. CH_3OH maser variability also was observed by Goedhart et al. (2004). Faúndez et al.

(2004) managed to detect infrared peak in the position of this object. ATLASGAL survey data is used to identifies a massive clump corresponding to this object that has high probability of being associated with a massive formation process (Csengeri et al., 2017b). Further analysis of ATLASGAL data by Urquhart et al. (2018) resulted in the parameters of this massive clump. Two massive cores are also identified and detected (Csengeri et al., 2017a) with one of them, core MM1, is associated with the maser distributions presented in this paper.

In this paper, we use KaVA observation to determine the proper motion and distribution of H₂O maser in G354.61+0.47. This data will then be compared to CH₃OH maser distribution taken with EAVN (Fujisawa et al., 2014). ALMA follow-up of ATLASGAL survey (Csengeri et al., 2017a) is also used to make dust continuum map and zeroth moment map of CO ($J=3-2$) emission line. In Section 2, we briefly explain the data source, instrumental configuration and data analysis process done. In Section 3, we present the proper motion and absolute motion measurements for H₂O maser. Comparison between H₂O and CH₃OH maser distribution is displayed. An additional comparison with ALMA data is also performed. Lastly, we discuss the possible interpretation of the available data and future prospects in Section 4.

2 OBSERVATIONS AND DATA ANALYSIS

2.1 H₂O Maser

Using the KaVA Array, the 6₁₆-5₂₃ H₂O maser line (rest frequency 22,235.080 MHz) was observed at 7 epochs (17 January, 13 March, 8 May, 11 September, 13 October, 21 November 2019 and 7 January 2020). The continuum source NRAO530 was used as a bandpass calibrator.

The scan length for each object observed is around 5 minutes. Total integration time for G354.61+0.47 is around 1 hour. The data were correlated with Korea-Japan Joint VLBI Correlator (KJVC).

The data were reduced using AIPS software. Digital sampling error were corrected. Calibration of clock and bandpass calibration were done by using NRAO530 as calibrator. After that, Doppler correction was performed for the maser line. Delay-rate calibration was performed by using spectral channel with the strongest maser channel. Maser spots are considered real if they have SNR (signal-to-noise ration) equal to or greater than 5 in two or more consecutive channels within FWHM (full-width at half-maximum) of the beam size around 3

milli-arcseconds (mas). Each collection of maser spots was then fitted using elliptical Gaussian and then collected as maser features with positions determined by the average of corresponding maser spots position. Data processing yielded a velocity coverage of 431 km s⁻¹ and a channel spacing of 0.421 km s⁻¹. Absolute positions of maser features in this data have accuracy of roughly 50 mas.

Table 1. Summary of maser features in each epoch.

Epoch No.	Date	Feature Number	
		Northern	Southern
1	17 Jan. 2019	11	5
2	13 Mar. 2019	11	5
3	8 May 2019	8	2
4	11 Sept. 2019	1	-
5	13 Oct. 2019	1	-
6	21 Nov. 2019	5	-
7	7 Jan. 2020	3	-

2.2 CH₃OH Maser

Class II 5₁ – 6₀ A⁺ CH₃OH maser data (rest frequency 6,668.518 MHz) used in this research is taken during 2010 to 2011 EAVN observing session by Fujisawa et al. (2014) and appended by the data taken in 2012. The continuum sources 3C454.3 and NRAO530 are respectively used as fringe finder and bandpass calibrator. Absolute positions of maser features in this data have accuracy of roughly 200 mas.

Each scan lasted 15 minutes and was repeated three or four times with an interval of 1 or 2 hours, yielding the total integration time of around 1 hour. Data are then correlated in Mitaka FX correlator. Data processing yielded a velocity of coverage of 180 km s⁻¹ and a channel spacing of 0.178 km s⁻¹. The typical size of the minor axis of the synthesized beam was 5 mas.

2.3 Dust Continuum and CO Line

Data used in this research is also taken from ALMA Archive with Project Code 2013.1.00960.S. This data is an end product of SPARKS project (Search for High-mass Protostars with ALMA up to

Table 2. Proper motion of seven features with detection in three or more epoch. Uncertainty is calculated from standard error of least-square fitting result. First column is feature code, the second is proper motion in right ascension and the last is proper motion in declination. All of proper motions are in mas yr⁻¹.

Code	$\mu_{\alpha} \cos \delta$	μ_{δ}
S1	-1.75 ± 0.96	1.79 ± 3.41
N1	-1.62 ± 0.97	7.39 ± 4.00
N2	-1.04 ± 0.94	-1.72 ± 1.96
N3	4.55 ± 3.36	0.72 ± 1.83
N6	-0.55 ± 0.94	-3.12 ± 1.64
N10	2.35 ± 4.13	-5.62 ± 8.33
N11	-1.94 ± 0.96	0.56 ± 1.71

kilo-parsec scales; e.g. Csengeri et al., 2018). Sources targeted in this project are mid-IR quiet massive clumps which are detected in APEX Telescope Large Survey of the Galaxy (ATLASGAL; Schuller et al., 2009, Csengeri et al., 2017a). Observations are conducted in Band 7 using 7 m and 12 m antennas. ALMA 12 m array observation whose result we use in this research has baselines ranged from 15 m ($17\text{ k}\lambda$) to 1574 m ($1809\text{ k}\lambda$). The four basebands used are centred in 347.331, 345.796, 337.061, and 333.900 GHz with spectral resolution of 0.977 MHz that corresponds to $\sim 0.9\text{ km s}^{-1}$ in velocity resolution. Synthesized beam for the 12 m array is $0.70'' \times 0.45''$, with a geometric mean of $0.56''$ resolution ($\sim 2100\text{ au}$). For CO ($J=3-2$) data cube, resulting synthesized beam is $0.89'' \times 0.60''$, with a geometric mean of $0.73''$ resolution ($\sim 2800\text{ au}$).

3 RESULTS

Analysis of H_2O maser data gives us maser features that are distributed roughly in two groups in intensity map. Those located near the brightest maser feature, whose channel used as fringe-fitting reference, is called Northern distribution and given code N. Other distribution located below the previous distribution in southwestern direction is called Southern distribution and given code S. The summary of detected maser features in each epoch is given in Table 1.

3.1 Proper Motion

Proper motion measurements were done for maser features detected in three or more epochs. Corresponding features in each epoch was matched by spatial and LSR velocity proximity criteria. Measurement was done using relative position data

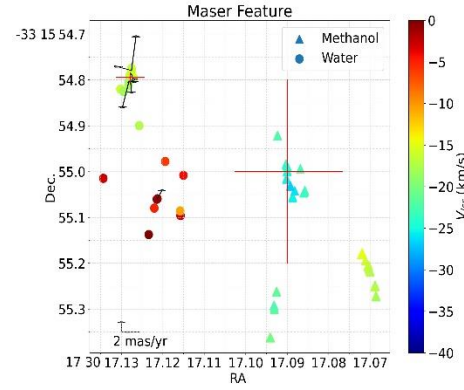


Figure 1. Map of H_2O (circle) and CH_3OH (triangle) maser distributions. Color code shows the LSR velocity values of the maser features. Arrows show proper motion values shown in Table 2. Red cross illustrates uncertainty in absolute position determinations.

before absolute position was determined. Reference position chosen was the brightest maser spot used in fringe-fitting calibration. Proper motion value was then obtained using ordinary least square fitting and its uncertainty is the standard error of the parameter. An average value of 0.43 ± 0.94 in right ascension and 4.13 ± 1.57 in declination were found from this initial data and then assumed as the systemic proper motion of all the maser features. Internal proper motion result was then found by subtracting this value from the initial result. Its values can be seen in Table 2.

3.2 Absolute Position

Fringe-rate mapping was utilized to determine the absolute coordinate of the H_2O maser features. Spectral channels used were corresponded to three peaks detected in autocorrelation spectrum of the first epoch data. Corresponding maser features offset from phase tracking centre were determined and

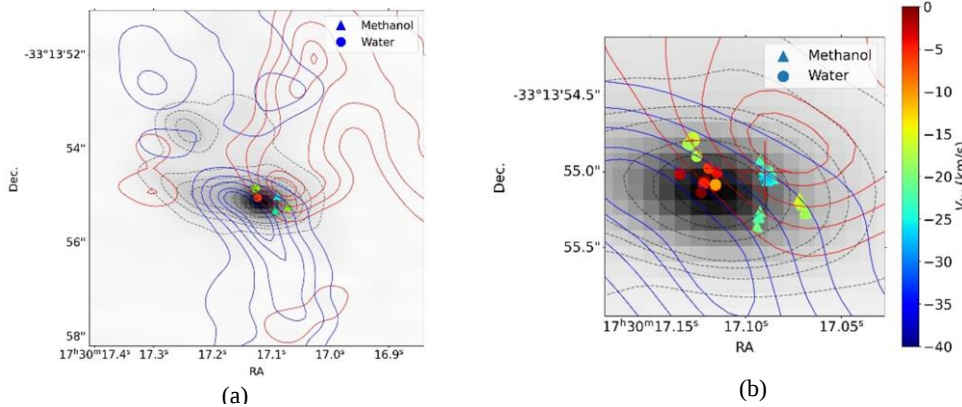


Figure 2. (a) Map of ALMA Band 7 continuum taken by 12 m array (grayscale, dashed contour) overlaid by CO ($J=3-2$) integrated emission line in red-wing (red) and blue-wing (blue). Also in the map is H_2O (circle) and CH_3OH (triangle) maser features. Contour of $870\text{ }\mu\text{m}$ continuum and CO emission line respectively shows (5, 10, 15, 20, 40, 60, 80, 90) and (20, 40, 60, 80, 90) percent of the peak value. Close-up version showing maser distributions in great detail could be seen in (b). Details for maser features are the same with Figure 1.

used to get absolute position of maser features. Different results from each run of fringe-rate mapping were averaged to get the final result. Using maser features S1, N1 and N6 to determine the absolute positions, H₂O maser features distribution and its comparison with CH₃OH maser distribution can be seen in Figure 1.

3.3 Comparison with ALMA Data

Continuum imaging of ALMA 12 m array data was done using CASA. Zeroth moment map of CO ($J=3-2$) emission line was also produced. Using reference LSR velocity of -20.08 km s^{-1} from Wienen et al. (2015), we separated the line into blue- and red-shifted part and produced contour plots for both of them. This emission line describes bipolar outflow structures along the NW-SE direction in the object. A composite image containing the continuum map, the contour plots and maser distributions can be seen in Figure 2. It can be seen that the water masers are situated in red-wing contour and the methanol masers are located near the peak of the continuum map.

4 DISCUSSION AND CONCLUSION

The preceding results show a dynamical structure in G354.61+0.47. Owing the fact that 6.7 GHz CH₃OH masers trace massive star formations (Breen et al., 2013), comparison between dust continuum shown by ALMA 12 m array Band 7 continuum with methanol maser distribution and its roughly elliptical shape leads to the conclusion that this object harbour massive star formation. Its elliptical shape and LSR velocity distribution would lend credence to conclusion that this maser distribution traces circumstellar disk structure. Its shape and velocity show us the possibility that it could have some inclination relative to the line of sight.

The H₂O maser distribution result poses a very interesting problem. Its positions relative to CH₃OH distribution leads us to some interesting questions. Although its LSR velocity is in the range of those of a red-shifted outflow lobe, their positions and proper motions need some explanation. Scenario that agrees with available data is the possibility that it shows outflow launched from the edge of the disk (e.g., Hirota et al., 2017). The other conservative scenario is the possibility that the disk pole inclination gives us some geometric configuration that results in such distribution. A possible interpretation of the proper motion result in this scenario is that it shows decollimation process of the outflow/jet. The fact that there are two groups of H₂O masers with different LSR velocity also indicates possibility of

episodic outflow (e.g., Burns et al., 2017). It is also possible that the H₂O maser distribution traces expansion or turbulent motion of the gases.

Similar analysis could be done to C¹⁷O, SiO, SO₂ and CH₃OH spectral line emission data available in the ALMA data. A phase referencing observation to improve CH₃OH maser absolute position has also been proposed and awaiting approval. Further modelling and measurement will be done in future publication. In the future, Indonesia can participate in similar maser observations when Southeast Asian VLBI Network is operational.

7 REFERENCES

- Breen, S. L., Ellingsen, S. P., Contreras, Y., Green, J. A., Caswell, J. L., Stevens, J. B., Dawson, J. R., et al., 2013, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, 435, 524-530.
- Burns, R. A., Handa, T., Imai, H., Nagayama, T., Omodaka, T., Hirota, T., Motogi, K., et al. 2017, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, 467, 2367-2376.
- Caswell, J. L. 1998, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, 297, 215-235.
- Churchwell, E. 2002, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 40, 27-62.
- Csengeri, T., Bontemps, S., Wyrowski, F., Motte, F., Menten, K. M., Beuther, H., Bronfman, L., et al. 2017a, *A&A*, 600, L10, 9pp.
- Csengeri T., Bontemps, S., Wyrowski, F., Belloche, A., Menten, K. M., Leurini, S., Beuther, H., et al. 2018. *A&A*, 617, A89, 17pp.
- Faúndez, S., Bronfman, L., Garay, G., Chini, R., Nyman L.-Å. 2004, *A&A*, 426, 97-103.
- Fujisawa, K., Sugiyama, K., Motogi, K., Hachisuka, K., Yonekura, Y., Sawada-Satoh, S., Matsumoto, N., et al. 2014, *PASJ*, 66, 31, 77pp.
- Goedhart, S., Gaylard, M. J., van der Walt, D. J. 2004, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, 355, 553-584.
- Green, J. A., & McClure-Griffiths, N. M. 2011, *Mon. Notices Royal Astron. Soc.*, 417, 2500-2553.
- Hirota, T., Machida, M. N., Matsushita, Y., Motogi, K., Matsumoto, N., Kim, M. K., Burns, R. A., et al., 2017, *Nat. As.*, 1, 0146, 16pp.
- Kennicutt, R. C. 1998, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 36, 189-232.
- Kennicutt, R. C. 2005, in *Massive Star Birth: A Crossroads of Astrophysics* (eds. R. Cesaroni, M. Felli, E. Churchwell, M. Walmsley), Cambridge University Press, Cambridge, 3-11.
- Moscadelli, L., Goddi, C., Cesaroni, R., Beltrán, M. T., Furuya, R. S., et al. 2007, *A&A*, 472, 867-879.
- Schuller, F., Menten, K. M., Contreras, Y., Wyrowski, F., Schilke, P., Bronfman, L., Henning, T., et al. 2009, *Astron. Astrophys.* 504, 415-427.
- Tan, J. C., Beltrán M. T., Caselli, P., Fontani, F., Fuente, A., Krumholz, M. R., McKee, C. F., et al., 2014, in *Protostars and Planets VI* (eds. H. Beuther, R. Klessen, C. Dullemond, Th. Henning), University of Arizona Press, Tucson, 149-172.
- Wienen, M., Wyrowski, F., Menten, K. M., Urquhart, J. S., Csengeri, T., Walmsley, C. M., Bontemps, S., et al. 2015. *A&A*, 579, A91, 35pp.
- Yang, W., Xu, Y., Chen, X., Ellingsen, S. P., Lu, D., Ju, B., et al. 2017, *Astrophys. J., Suppl. Ser.* 231, 20, 12pp.

Project BEACON: Program Pengamatan Okultasi di Observatorium Bosscha

A. T. P. Jatmiko^{1*}

¹Observatorium Bosscha, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung

*E-mail: agustriono.pj@gmail.com

ABSTRAK

Okultasi merupakan peristiwa tertutupnya suatu obyek langit oleh obyek langit lain yang memiliki ukuran sudut lebih besar. Peristiwa okultasi memungkinkan astronom untuk mendapatkan resolusi sudut tinggi, yang biasanya diperoleh dengan teknik interferometri, sehingga astronom dengan instrumen yang *modest* bisa melakukan pengukuran separasi sudut yang sangat kecil, bahkan lebih kecil dari nilai *seeing* sebuah tempat pengamatan, misalnya pengukuran diameter sudut dari suatu obyek langit, deteksi kegandaan atau multiplisitas sebuah bintang ataupun deteksi cincin atau satelit dari sebuah asteroid (lihat pekerjaan Braga-Ribas, 2014). Pada pekerjaan ini akan dipaparkan perkembangan metode pengamatan okultasi yang dilakukan oleh Observatorium Bosscha sejak 2011 sampai sekarang, yang dikemas dalam 'Project BEACON' (*Bosscha Eclipse and Occultation Observation*) beserta beberapa hasil terkini yang berhasil diperoleh, termasuk kampanye pengamatan okultasi di tahun 2020 dan 2021. Pekerjaan ini juga memaparkan hasil dari pengamatan okultasi dan transit dari satelit-satelit galilean Jupiter dalam program PHEMU21 (*Phenomenes Mutuels 2021*) yang diinisiasi oleh *Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides* (IMCCE), Perancis. (Pratt and Wunsche, 2021).

Kata Kunci: Okultasi – Bintang ganda – PHEMU21

1 PENDAHULUAN

Peristiwa okultasi merupakan salah satu fenomena astronomi tertua selain gerhana yang pernah direkam oleh manusia. Peristiwa ini terjadi saat benda langit yang memiliki ukuran sudut lebih besar menutupi benda langit dengan ukuran sudut lebih kecil, misalnya peristiwa tertutupnya bintang oleh piringan Bulan, planet, ataupun asteroid.

Pengamatan okultasi memiliki beberapa kelebihan, yaitu tahan terhadap polusi cahaya, sehingga pengamatan bisa dilakukan dari perkotaan, meskipun tempat yang minim polusi cahaya akan memperbesar kemungkinan obyek redup bisa diamati dengan kualitas data yang baik. Selain itu, pengamatan okultasi memberikan resolusi sudut yang tinggi dengan orde mili detik busur, jauh lebih kecil daripada resolusi sudut yang dibolehkan dengan adanya turbulensi udara.

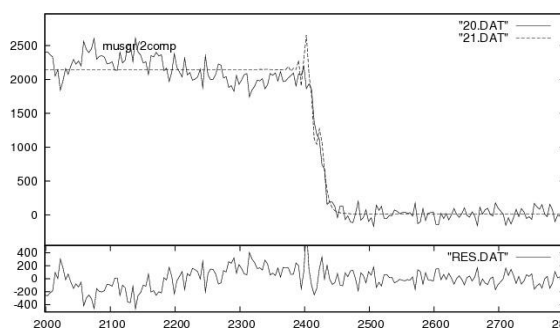
Beberapa batasan dari pengamatan okultasi di antaranya adalah bahwa peristiwa ini merupakan

peristiwa yang *fixed* dan obyek yang diokultasi akan berbeda pada setiap waktu. Selain itu, satu pengamatan okultasi dari sebuah tempat hanya memberikan informasi searah pergerakan benda penutupnya, misalnya separasi sudut bintang ganda, atau morfologi asteroid, sehingga diperlukan pengamatan simultan dari berbagai titik untuk mendapatkan informasi yang lebih komprehensif tentang separasi sudut benar dari sebuah bintang ganda maupun bentuk dari sebuah asteroid.

2 INSTRUMEN DAN PENGAMATAN

Instrumen yang digunakan untuk pengamatan okultasi di Observatorium Bosscha mengalami perkembangan yang cukup signifikan sejak 2011, terutama dari sisi detektor. Pada awalnya pengamatan dilakukan dengan kamera CCD SBIG ST – 9 XE dengan teknik *drift scanning* dipadukan dengan teleskop GOTO 45cm. Konfigurasi ini memberikan skala plat sekitar $0,76''/\text{pixel}$, oleh karena itu kami melakukan *binning* vertikal 3×4 sehingga skala plat yang dihasilkan mampu menampung bintang dalam satu pixel untuk mengatasi sintilasi. Saat itu, bintang μ Sgr berhasil diamati dan diperoleh proyeksi separasi antara kedua komponen adalah $9,5 \pm 5,6$ milidetikbusur (*milliarcseconds*, mas), seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1. (Jatmiko, 2012).

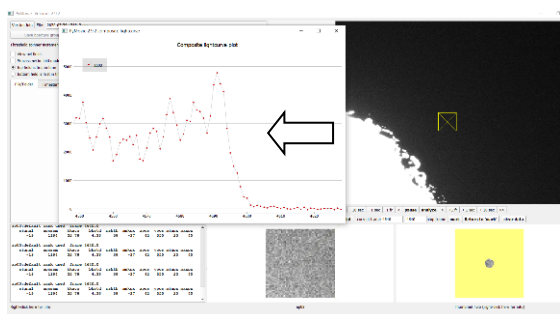
Masalah utama dari pengamatan okultasi adalah akurasi *timing* yang digunakan haruslah akurat sampai orde milidetik, bahkan mikrodetik. Penggunaan *Network Time Protocol*, atau NTP adalah cara termudah untuk menghasilkan resolusi waktu yang akurat. Namun hal tersebut bergantung pada kondisi jaringan internet yang digunakan serta



Gambar 1. Hasil *fitting* kurva cahaya μ Sgr. Bintang ini terdeteksi ganda dengan proyeksi separasi $9,5 \pm 5,6$ mas.

konfigurasi perangkat keras pada komputer. Secara umum, penggunaan NTP dengan *Windows Time* di sistem operasi Windows 10 menghasilkan galat yang cukup besar, yaitu 100 – 450 ms. Penggunaan perangkat lunak sinkronisasi waktu seperti *Dimension4* mengurangi galat ini menjadi sekitar 220 ms (Pavlov & Gault, 2020).

Tahun 2019, Observatorium Bosscha mendapatkan kamera CMOS dengan GPS terintegrasi, yaitu QHY 174M GPS, yang secara teoritis memiliki galat waktu sampai di bawah 1 ms. Namun, dari hasil penggunaan di Observatorium Bosscha, galat waktu tipikal yang dihasilkan sekitar 10 – 20 ms. Ada dugaan bahwa konfigurasi perangkat keras yang digunakan, yaitu komputer/laptop yang digunakan, memberikan andil dalam galat waktu saat perekaman. Penggunaan *hard disk* bertipe SSD sangat direkomendasikan untuk memastikan proses perekaman yang lebih lancar. Salah satu hasil pengamatan okultasi pada kampanye pengamatan tahun 2020, yaitu bintang HD 159731, ditampilkan pada Gambar 2. Tampak ada kemungkinan terdeteksi salah satu komponen ganda (ditunjukkan oleh tanda panah).



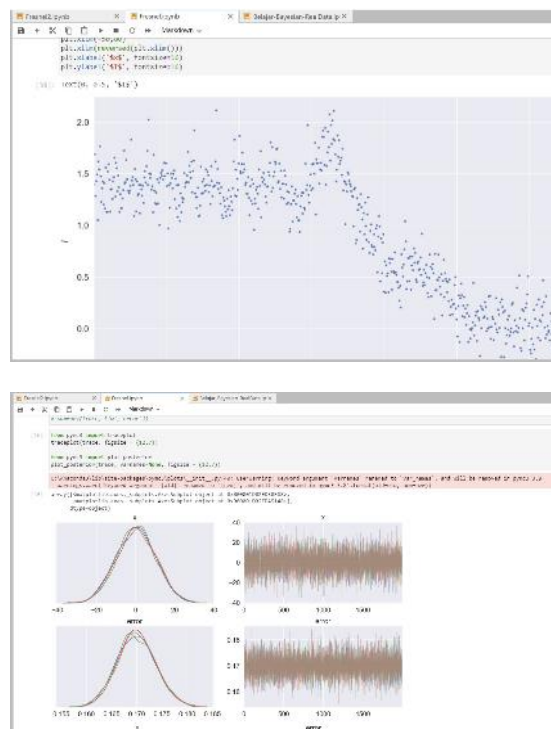
Gambar 2. Okultasi bintang HD 159731 oleh Bulan tanggal 29 Juli 2020.

Pada tahun 2021 Observatorium Bosscha menjadwalkan turut melakukan pengamatan simultan okultasi dan transit satelit galilean Jupiter, yang diinisiasi oleh *Institut de Mécanique Céleste et de Calcul des Ephémérides* (IMCCE), Perancis dalam kampanye pengamatan PHEMU21. Sampai saat tulisan ini dibuat, data masih dalam proses pengecekan.

3 PENGEMBANGAN CODE UNTUK FITTING KURVA CAHAYA

Bersamaan dengan kampanye pengamatan okultasi, Observatorium Bosscha juga mengembangkan kode pemrograman untuk *fitting*

kurva cahaya okultasi dengan menggunakan Python dan MCMC. Langkah – langkah yang dilakukan adalah membuat data sintetik berdasarkan parameter yang sudah ditentukan sebelumnya, kemudian di-*fit* ulang untuk mendapatkan kembali parameter yang ditentukan tersebut. Setelah hasilnya konsisten, barulah program ini diaplikasikan ke data sebenarnya. Saat ini kode masih dalam tahap awal pengembangan (lihat Gambar 3).



Gambar 3. Snapshot kode untuk *fitting* kurva cahaya okultasi yang sedang dikembangkan Observatorium Bosscha

Ucapan Terima Kasih

Kamera QHY 174M GPS berhasil diadakan menggunakan dana Lab ASIIN. Kami juga menyampaikan terima kasih kepada Ibu Premana W. Premadi, Ph.D selaku Kepala Observatorium Bosscha FMIPA ITB yang telah mendukung keikutsertaan kami dalam kegiatan Seminar Panorama Antariksa 2021.

4 PUSTAKA

- Braga-Ribas, F. et al. 2014, *Nature*, 508, 72-75
 Pratt, A. & Wunsche, N., 2021, *JOA* Vol. 11 no. 1, 3-9
 Jatmiko, A. T. P. 2012, 2nd SEAYAC Meeting
 Pavlov, H. & Gault, D., 2020, *JOA* Vol. 10 no. 2, 10-19

Pengamatan Survei Variabilitas Pada Gugus Bintang Terbuka di Observatorium Bosscha

D. Mandey

Observatorium Bosscha – FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: mandey.de@as.itb.ac.id

ABSTRAK

Survei variabilitas di gugus bintang terbuka merupakan salah satu program pengamatan di Observatorium Bosscha. Tujuannya adalah mencari kandidat bintang variabel dan eksoplanet baru di gugus bintang terbuka. Pengamatan menggunakan teleskop berdiameter 28 cm yang dilengkapi dengan kamera CCD. Metode fotometri diferensial digunakan untuk mendeteksi perubahan cahaya pada bintang yang berada pada medan pengamatan. Pengamatan ini menargetkan dapat mendeteksi perubahan cahaya sampai 10 mmag. Pada makalah ini, kami akan memaparkan perkembangan program pengamatan survei variabilitas pada gugus bintang terbuka yang berlangsung sejak tahun 2016 hingga tahun 2021.

Kata Kunci: gugus bintang terbuka – bintang variabel - eksoplanet

1 PENDAHULUAN

Gugus bintang terbuka merupakan salah satu objek pengamatan yang menarik untuk dipelajari. 90% bintang diketahui pada masa awal hidupnya berada dalam gugus bintang. Banyak gugus bintang terbuka yang mencapai umur beberapa ratus juta tahun sampai beberapa milyar tahun. Bintang bermassa besar mungkin menghabiskan masa hidupnya berada di dalam gugus. Dalam suatu gugus bintang, kita dapat menemukan bintang-bintang dalam berbagai fase evolusi.

Banyak pekerjaan pengamatan yang telah dilakukan pada gugus bintang terbuka. Tapi tidak banyak pekerjaan pengamatan yang bersifat survei variabilitas. Bintang variabel merupakan salah satu fase dalam evolusi bintang. Bintang ganda dekat lebih mudah terbentuk dalam suatu gugus. Eksoplanet hadir dalam waktu 5 – 10 juta tahun sejak bintang induknya terbentuk (Boss, 2001) (Haisch et al., 2001). Sayangnya, ketiga objek tersebut sedikit sekali yang telah ditemukan merupakan anggota dari gugus bintang terbuka. Rapatnya sebaran bintang di dalam gugus menyebabkan diperlukannya metode tertentu untuk dapat mengukur perubahan cahaya satu bintang tanpa terkontaminasi oleh cahaya bintang lain di dekatnya.

Oleh sebab itu, survei variabilitas pada gugus bintang terbuka menjadi suatu pekerjaan pengamatan yang menarik untuk dilakukan karena masih terdapat peluang besar ditemukannya objek-objek variabel baru. Mengingat cukup banyak gugus bintang terbuka yang cukup terang maka pengamatan variabilitas dapat dilakukan menggunakan teleskop berukuran relatif kecil. Pengamatan survei variabilitas pada gugus bintang terbuka yang dilakukan di Observatorium Bosscha ini bertujuan mencari bintang variabel baru, bintang



Spesifikasi sistem teleskop STEVia	
Tipe optik	Schmidt-Cassegrain
Diameter	279 mm
Panjang fokus	1764 mm
Detektor	CCD Sbig ST-8XME
Filter	Bessel BVRI
Luas medan pandang	26,3 x 17,5 menit busur

Gambar 1. Foto dan spesifikasi teleskop STEVia.

ganda dekat baru, dan kandidat eksoplanet baru yang menjadi anggota suatu gugus terbuka. Kami akan memaparkan perkembangan pekerjaan ini yang telah dilakukan sejak tahun 2016.

2 PENGAMATAN

2.1 Instrumen Pengamatan

Dalam pengamatan survei ini, kami menggunakan salah satu teleskop di Observatorium Bosscha, yaitu teleskop STEVia (Survey Telescope for Exoplanet and Variable star). Kombinasi sistem optik dan detektor yang digunakan menghasilkan luas medan pandang yang cukup untuk pengamatan

survei pada gugus bintang terbuka. Selama pengamatan, kami tidak menggunakan filter untuk mendapatkan fluks cahaya bintang sebanyak mungkin. Spesifikasi teknis peralatan yang kami gunakan dapat dilihat pada gambar 1.

2.2 Objek Pengamatan

Gugus bintang terbuka yang menjadi target pengamatan survei dipilih berdasarkan beberapa syarat: 1. Ukuran gugus tidak lebih besar dari medan pandang teleskop STEVia. 2. Kerapatan bintang tidak terlalu tinggi untuk memudahkan proses reduksi dan analisis fotometri bukaan. 3. Posisi gugus bintang di langit lebih dari 30 derajat dari horizon.

Dalam satu malam, setiap gugus diamati selama 6 jam pengamatan. Hingga saat ini terdapat 12 gugus bintang terbuka yang telah berhasil kami amati (tabel 1). Mengingat kondisi cuaca cerah di Observatorium Bosscha tidak cukup banyak, sebagian besar gugus diamati kurang dari 10 malam.

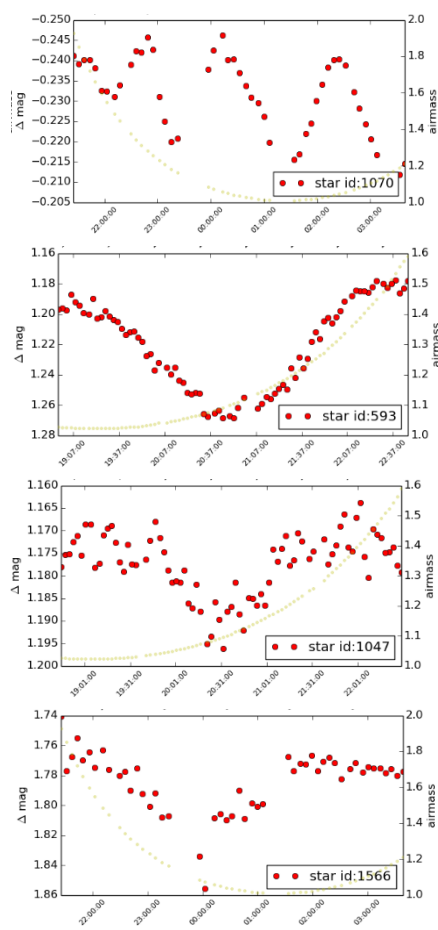
Tabel 1. Daftar gugus bintang terbuka yang telah diamati di Observatorium Bosscha.

No.	Nama Gugus Bintang	Jumlah Pengamatan
1	CL 394	2
2	NGC 2112	1
3	NGC 2437	1
4	NGC 5460	3
5	NGC 6494	8
6	NGC 6633	19
7	NGC 6709	1
8	NGC 6738	1
9	NGC 6755	2
10	NGC 6823	1
11	NGC 6830	2
12	NGC 6940	1

3 HASIL

Sebagian data pengamatan gugus bintang terbuka telah dianalisis. Kami menggunakan program analisis data fotometri diferensial LEMON. Kurva cahaya yang dihasilkan menunjukkan bahwa pada beberapa bintang terlihat adanya perubahan cahaya dengan pola teratur. Pada gambar 2 terlihat adanya pola yang mirip dengan kurva cahaya bintang variabel periode pendek dan bintang ganda gerhana. Beberapa kurva cahaya juga memperlihatkan adanya perubahan cahaya yang mirip dengan peristiwa transit eksoplanet dengan dengan amplitudo kurang dari 30 mmag.

Saat ini, kami masih berada di fase awal pengamatan survei variabilitas, yaitu mengidentifikasi bintang-bintang yang berpotensi merupakan kandidat bintang variabel, bintang ganda gerhana, atau eksoplanet baru. Diperlukan lebih



Gambar 2. Contoh kurva cahaya yang menunjukkan adanya variabilitas pada beberapa bintang.

banyak data pengamatan pada masing-masing gugus untuk mengetahui apakah variabilitas yang terdeteksi bersifat periodik atau tidak. Dalam rencana pengamatan selanjutnya, kami juga akan melakukan pengamatan untuk menentukan keanggotaan bintang-bintang tersebut terhadap gugus terbuka dan tipe variabilitas dari kurva cahaya tersebut.

Ucapan Terima Kasih

Kami menyampaikan terima kasih kepada Ibu Premana W. Premadi, Ph.D selaku Kepala Observatorium Bosscha FMIPA ITB yang telah mendukung riset ini dalam pengadaan filter Bessel Biru melalui program P2MI tahun 2021.

4 PUSTAKA

- Boss, A. P. 2001, *Astrophysical Journal*, 563, 376.
 Brucalassi, et al. 2014, *A&A*, 561, L9
 Haisch, K. E. Jr., Lada, E. A., & Lada, C. J. 2001, *Astrophysical Journal*, 553, 153
 Terron, V. & Fernandez, M. 2011, *Highlights of Spanish Astrophysics VI Proceedings*, 755



TEMA 2: **Astrofisika Teoretik, Galaksi, & Kosmologi**

Rekonstruksi Nonparametrik *Dynamical Dark Energy* Menggunakan Data *Cosmic Chronometer* dan Supernova Tipe Ia

V. J. Purwanto^{1*} dan H. Wulandari¹

¹Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: vaneissyajp@outlook.com

ABSTRAK

Konstanta kosmologi (Λ) merupakan usulan model *dark energy* yang paling sederhana dengan parameter persamaan keadaan (w) yang konstan, $w = -1$. Meskipun didukung oleh banyak pengamatan, terdapat masalah yang melekat pada Λ , yaitu masalah *fine tuning* dan masalah *coincidence*. Untuk mengatasi masalah tersebut diperkenalkanlah model *dynamical dark energy* (DDE) dengan rapat energi yang bergantung waktu. Salah satu usulan model DDE adalah model fenomenologis nonparametrik yang didasarkan langsung pada rekonstruksi dari pengamatan kosmologis, tanpa pengetahuan awal mengenai bentuk fungsi w yang umum pada model parametrik. Penelitian ini bertujuan untuk merekonstruksi w secara nonparametrik berdasarkan hasil pengamatan *cosmic chronometer* dan supernova tipe Ia Pantheon. Rekonstruksi nonparametrik dilakukan dengan menggunakan *gaussian process*. Hasil rekonstruksi parameter persamaan keadaan dari data pengamatan *cosmic chronometer* dan supernova tipe Ia Pantheon menunjukkan bahwa keduanya dapat merekonstruksi fungsi w hingga $z \leq 1$, sebelum galat keduanya membesar. Rekonstruksi menggunakan data supernova tipe Ia Pantheon memberikan galat yang lebih kecil daripada yang diperoleh dengan data *cosmic chronometer*.

Kata Kunci: *dynamical dark energy* – nonparametrik – *cosmic chronometer*

1 PENDAHULUAN

Pengamatan supernova tipe Ia pada akhir tahun 1990-an menunjukkan bahwa alam semesta mengembang dipercepat (Ries et al., 1998; Perlmutter et al., 1999). Berbagai upaya dilakukan untuk menjelaskan fenomena tersebut, salah satunya adalah memperkenalkan komponen alam semesta bertekanan negatif yang melawan gravitasi, yang kemudian dikenal sebagai *dark energy*. Model *dark energy* yang paling sederhana adalah konstanta kosmologi (Λ) yang memiliki parameter persamaan konstan, yaitu $w = -1$.

Meskipun konstanta kosmologi didukung oleh banyak pengamatan, masih terdapat masalah besar terkait skala energi yang melekat pada konstanta kosmologi, yaitu masalah *fine tuning* dan masalah *coincidence*. Masalah *fine tuning* adalah perbedaan densitas energi konstanta kosmologi sebesar 121 orde antara nilai berdasar pengamatan dan nilai teori yang mengasumsikan bahwa konstanta kosmologi berupa energi vakum. Masih terkait dengan skala energi juga, masalah *coincidence* mempertanyakan mengapa kesetaraan orde rapat energi materi dan konstanta kosmologi baru terjadi di dekat saat ini ($z \approx 0$), sementara keduanya berevolusi dengan cara yang sangat berbeda terhadap waktu.

Salah satu cara untuk mengatasi masalah terkait skala densitas energi konstanta kosmologi yang diusulkan adalah model *dark energy* dinamis (DDE) dengan parameter persamaan keadaan (w) yang

bergantung pada waktu. Model DDE dapat dibangun berlandaskan teori, namun karena sedikitnya pemahaman tentang *dark energy*, dibangun pula model DDE fenomenologis berdasarkan data pengamatan. Untuk merekonstruksi model DDE fenomenologis, dapat dilakukan pendekatan parametrik dengan mengambil suatu persamaan tertentu terlebih dahulu, seperti pada model CPL (Chevallier dan Polarski, 2001; Linder, 2003). Cara lain adalah melalui pendekatan nonparametrik, yaitu merekonstruksi model DDE langsung dari data pengamatan, seperti pada *gaussian process* (GP).

Penelitian ini bertujuan merekonstruksi parameter persamaan keadaan *dark energy* dari data *cosmic chronometer* (CC) dan SN Ia secara nonparametrik menggunakan GP, serta menguji data mana yang menghasilkan rekonstruksi yang lebih baik dengan metode ini, apakah CC atau SN Ia. Pembahasan akan dilakukan sebagai berikut, pada bagian 2 akan dijelaskan mengenai data dan metode yang digunakan untuk rekonstruksi. Kemudian pada bagian 3 dipaparkan hasil rekonstruksi parameter persamaan DDE beserta analisisnya. Terakhir, bagian 4 memuat kesimpulan yang diperoleh.

2 METODOLOGI

2.1 Rekonstruksi $w(z)$

Parameter Hubble untuk alam semesta datar dengan metrik FLRW berisi komponen materi dan *dark energy* diberikan oleh,

$$H^2(z) = H_0^2 \left[\Omega_{m,0}(1+z)^3 + \tilde{\Omega}_{DE}(z) \right], \quad (1)$$

dengan H parameter Hubble, H_0 konstanta Hubble, $\Omega_{m,0}$ parameter densitas materi saat ini dan $\tilde{\Omega}_{DE}(z)$ adalah parameter densitas *dark energy* sebagai fungsi dari *redshift*, yaitu

$$\tilde{\Omega}_{DE}(z) = \Omega_{DE,0} \times \exp\left(3 \int_0^z \frac{1+w(z)}{(1+z)} dz\right). \quad (2)$$

Substitusikan persamaan (2) ke persamaan (1), diperoleh

$$H^2(z) = H_0^2 \left[\Omega_{m,0}(1+z)^3 + \Omega_{DE,0} \times \exp\left(3 \int_0^z \frac{1+w(z)}{(1+z)} dz\right) \right]. \quad (3)$$

Untuk mendapatkan persamaan untuk $w(z)$ dari persamaan (3), dilakukan modifikasi matematis sehingga diperoleh

$$w(z) = \left[\frac{1}{3} \frac{H_0^2(1+z)}{H^2 - H_0^2 \Omega_{m,0}(1+z)^3} \left(\frac{2HH'}{H_0^2} - 3\Omega_{m,0}(1+z)^2 \right) \right] - 1. \quad (4)$$

Persamaan (4) digunakan untuk merekonstruksi $w(z)$ berdasarkan data CC.

Pada data pengamatan SN Ia, modulus jarak (μ) diberikan oleh persamaan

$$\mu = m - M = 5 \log \frac{d_L}{1 \text{ Mpc}} + 25, \quad (5)$$

dengan d_L jarak luminositas. Rekonstruksi $w(z)$ dengan data SN Ia pada penelitian ini dilakukan menggunakan jarak *comoving* ternormalisasi, seperti yang dilakukan oleh Seikel et al. (2012), Wang dan Meng (2017), serta Zhang dan Liu (2018), yang diberikan oleh

$$D(z) = \left(\frac{H_0}{c} \right) (1+z)^{-1} d_L(z). \quad (6)$$

Dalam penelitian ini μ ditransformasikan ke D dengan mengikuti langkah Wang dan Meng (2017) sebagai berikut,

$$\mu - 25 + 5 \log \left(\frac{H_0}{c} \right) = 5 \log[(1+z)] D. \quad (7)$$

Lakukan modifikasi matematika untuk memperoleh

$$D(z) = \frac{H_0}{c} (1+z)^{-1} \left(10^{\frac{\mu}{5}-5} \right). \quad (8)$$

Dalam penelitian ini dipilih konstanta Hubble sebesar $H_0 = 73,24 \pm 1,74 \text{ kms}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (Riess et al., 2016). Untuk alam semesta datar, turunan D ($D'(z)$) diberikan oleh

$$D'(z) = \frac{H_0}{H(z)}. \quad (9)$$

Dengan menggunakan persamaan (6), dapat diturunkan parameter persamaan keadaan *dark energy* untuk alam semesta datar sebagai berikut

$$w(z) = \frac{1}{3} \frac{-2(1+z)D'' - 3D'}{D' - \Omega_{m,0}(1+z)^3 D'^3}. \quad (10)$$

Berdasarkan data modulus jarak, persamaan (10) digunakan untuk merekonstruksi $w(z)$.

2.2 Gaussian process (GP)

Berbeda dari pendekatan parametrik, algoritma GP dapat menjalankan proses rekonstruksi sebuah fungsi dari data tanpa mengasumsikan parameterisasi dari fungsi tersebut. Dalam penelitian ini, GP dijalankan menggunakan *package* GaPP (*Gaussian Processes in Python*) yang dikembangkan oleh Seikel et al. (2012). GP merupakan generalisasi dari distribusi gaussian. Distribusi gaussian merupakan distribusi dari variabel acak, sedangkan GP mendeskripsikan distribusi dari fungsi. GP dikarakterisasi oleh fungsi rerata dan fungsi kovarian (kernel). Fungsi rerata menunjukkan rerata titik pada input, sedangkan kernel bertugas untuk mendefinisikan kedekatan atau *similarity* antar titik data. Misalkan fungsi f dibentuk dengan GP. Nilai f ketika dievaluasi pada titik x adalah variabel acak gaussian dengan rerata $\mu(x)$ dan variansi $\text{Var}(x)$. Nilai fungsi f tidak independen terhadap nilai fungsi pada titik berbeda $\tilde{x}$, khususnya jika x dan $\tilde{x}$ berdekatan, tetapi nilai kedua fungsi tersebut dihubungkan oleh fungsi kovarian ($k(x, \tilde{x})$).

Fungsi kovarian memiliki berbagai macam bentuk. Dalam penelitian ini digunakan fungsi kovarian eksponensial kuadrat dan fungsi kovarian Matérn ($\nu = 5/2, 7/2, 9/2$) untuk merekonstruksi $H(z), H'(z), D(z), D'(z)$, dan $D''(z)$. Fungsi kovarian eksponensial kuadrat dan Matérn bergantung pada dua *hyperparameter*, σ_f dan l , yang berfungsi untuk mengkarakterisasi ketidakteraturan fungsi.

2.3 Data Pengamatan

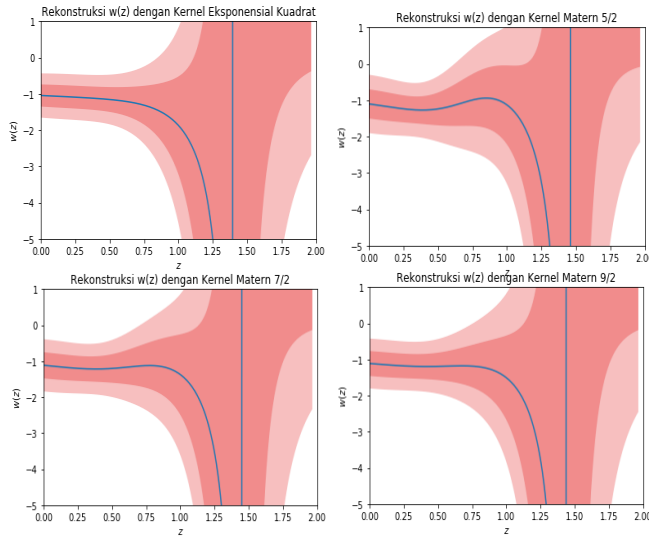
(1) *Data pengamatan Cosmic Chronometer (CC)*. Dalam penelitian ini digunakan 31 titik data parameter Hubble $H(z)$ dari berbagai pengamatan CC pada tahun 2003 – 2017 di rentang *redshift* $0,07 \leq z \leq 1$ (Vagnozzi et al., 2021), dengan metode penentuan usia *full-spectrum fitting* (Jimenez et al., 2003; Simon et al., 2005; Stern et al., 2010; Zhang et al., 2014; Ratsimbazafy et al., 2017) dan fitur D4000 *break* (Moresco et al., 2012; 2015; 2016).

(2) *Data pengamatan Supernova tipe Ia*. Data SN Ia yang digunakan adalah set data Pantheon

(Scolnic et al., 2018), terdiri dari 1048 titik data dengan rentang *redshift* $0,01 \leq z \leq 2,3$. Untuk rekonstruksi $w(z)$ digunakan data *redshift*, modulus jarak dan galat modulus jarak. Digunakan nilai $\Omega_{m,0} = 0,315 \pm 0,0007$ dari Planck Collaboration (2020) dan nilai konstanta Hubble menurut Riess et al. (2016), yaitu $H_0 = 73,24 \pm 1,74$ km/s/Mpc.

3 HASIL

3.1 Menggunakan data CC



Gambar 1. Hasil rekonstruksi $w(z)$ dari data *cosmic chronometer* dengan fungsi kovarian yang berbeda.

Rekonstruksi $w(z)$ menggunakan data CC diawali dengan rekonstruksi $H(z)$ dan $H'(z)$ menurut persamaan (4). Rekonstruksi dilakukan menggunakan *package* GaPP dengan optimasi *hyperparameter* untuk setiap fungsi kovarian yang ditinjau (Seikel et al., 2013). Dari data CC, pertama-tama direkonstruksi $H(z)$ kemudian $H'(z)$. Keduanya direkonstruksi dari $0,00 \leq z \leq 1,965$ dengan 200 titik data untuk setiap kernel yang ditinjau. Dari hasil rekonstruksi $H(z)$ dapat diperoleh konstanta Hubble H_0 , yaitu nilai hasil rekonstruksi pada $z = 0$, yang disajikan pada Tabel 1. H_0 hasil rekonstruksi tersebut kemudian digunakan untuk merekonstruksi $w(z)$ sesuai persamaan (4). Hasil rekonstruksi $w(z)$ disajikan pada Gambar 1.

Gambar 1 menunjukkan bahwa pada $z \leq 1$ sebagian besar nilai $w(z)$ relatif konstan di sekitar -1 , kemudian turun dan naik kembali pada $z \approx 1,75 - 1,8$. Ini berarti $w(z)$ tidak konstan seperti yang diprediksi model Λ CDM, tetapi pada masa lampau $w(z) \neq -1$ kemudian menjadi bernilai -1 saat ini. Hasil rekonstruksi $w(z)$ dari data CC

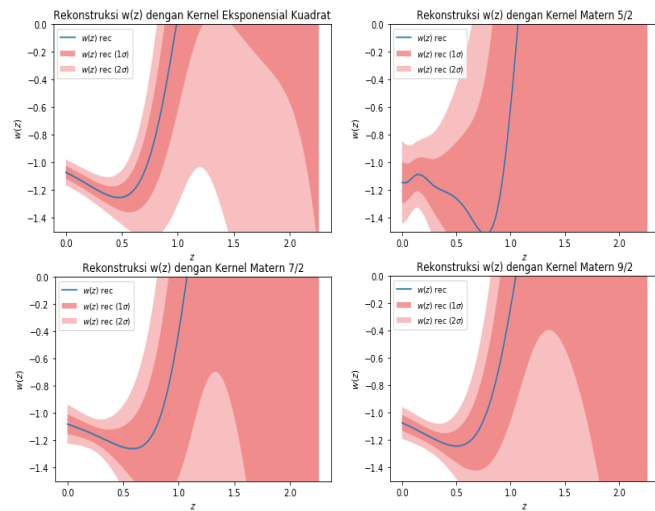
memiliki galat yang besar, sehingga kurang dapat memberikan kendala yang baik. Galat yang besar tersebut akibat data yang tersedia kurang banyak dan cenderung menyebar. Selain itu, galat data pengamatan yang besar menjalar kepada galat hasil rekonstruksi.

Tabel 1. Hasil rekonstruksi H_0 dari data CC

Kernel	H_0 km/s/Mpc	# σ dari Planck	# σ dari SN Ia
Eksp. Kuad.	$67,47 \pm 4,75$	0,61	1,73
Matern 5/2	$68,88 \pm 5,42$	0,28	0,77
Matern 7/2	$68,72 \pm 5,17$	0,26	0,83
Matern 9/2	$68,52 \pm 5,05$	0,23	0,88

3.2 Menggunakan data Pantheon

Data pengamatan yang digunakan untuk rekonstruksi bukanlah data modulus jarak (μ), melainkan jarak *comoving* ternormalisasi D beserta kesalahannya, yang diperoleh dengan melakukan transformasi menurut persamaan (8). Dari data z , D , dan *error* D data Pantheon, dilakukan rekonstruksi D , D' , dan D'' untuk setiap kernel. Rekonstruksi dilakukan pada rentang $0,00 \leq z \leq 2,30$ untuk 200 titik data untuk masing-masing kernel. Hasil rekonstruksi D , D' , D'' dan nilai H_0 dari Riess et al. (2016) kemudian disubstitusikan pada persamaan (10), sehingga diperoleh hasil rekonstruksi $w(z)$ seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil rekonstruksi $w(z)$ dari data Pantheon dengan fungsi kovarian yang berbeda.

Hasil rekonstruksi memperlihatkan $w(z)$ merupakan fungsi dinamis kontinu dengan galat yang membesar pada $z > 0,5$, namun tidak sebesar galat $w(z)$ dari CC. Dapat dilihat pula pada Gambar 2 bahwa pada masa lampau $w \neq -1$, tetapi pada akhirnya berevolusi hingga bernilai -1 saat ini.

Dari hasil rekonstruksi dengan data CC maupun SN Ia Pantheon diperoleh nilai $w(z)$ saat ini yang

Tabel 2. Hasil rekonstruksi $w(0)$ dari data CC dan Pantheon

Kernel	$w(0)$ dari CC	$w(0)$ dari Pantheon
Eksp. Kuad.	$-1,04 \pm 0,30$	$-1,07 \pm 0,05$
Matern 5/2	$-1,10 \pm 0,40$	$-1,15 \pm 0,15$
Matern 7/2	$-1,11 \pm 0,36$	$-1,08 \pm 0,07$
Matern 9/2	$-1,11 \pm 0,34$	$-1,07 \pm 0,06$

disajikan pada Tabel 2. Dapat dilihat bahwa nilai $w(0)$ kedua hasil rekonstruksi konsisten dengan model Λ CDM $w = -1$. Tetapi galat $w(0)$ yang dihasilkan dari data CC lebih besar dari data Pantheon.

4 KESIMPULAN

Dalam penelitian ini telah direkonstruksi $w(z)$ dari set data *cosmic chronometer* (CC) dan set data SN Ia Pantheon. Data CC saja atau data SN Ia Pantheon saja dapat digunakan untuk merekonstruksi $w(z)$ hingga $z \leq 1,00$, sebelum galat keduanya membesar. Hasil rekonstruksi dari data CC menghasilkan galat yang lebih besar daripada yang dihasilkan dari data SN Ia Pantheon karena data CC kurang banyak dan cenderung menyebar, di mana data pengamatan pada *redshift* kecil lebih banyak daripada data di *redshift* besar. Akibatnya, hasil rekonstruksi di daerah dengan titik data yang jarang memiliki galat yang lebih besar, karena fungsi tidak terkendala dengan baik (masih terdapat banyak kemungkinan fungsi yang dapat menghubungkan kedua titik yang berjauhan). Selain itu data $H(z)$ dari pengamatan CC memiliki galat yang cukup besar, sehingga perambatan galat menghasilkan nilai ketidakpastian yang makin besar pada hasil rekonstruksi.

Rekonstruksi nilai $w(0)$ berdasarkan data CC maupun data SN Ia Pantheon memberikan nilai

$w(0) \approx -1$, konsisten dengan model Λ CDM yang konstan bernilai $w = -1$. Namun, rekonstruksi menggunakan data CC menghasilkan galat sebesar $\sim 30\%$, dengan galat terbesar pada rekonstruksi dengan kernel Matern 5/2, sehingga kurang dapat memberikan kendala yang baik untuk nilai $w(0)$. Hasil rekonstruksi $w(0)$ menggunakan data SN Ia Pantheon memberikan kendala yang lebih baik daripada data CC, dengan persentase galat yang kurang dari 10%.

5 REFERENSI

- Chevallier, M. & Polarski, D. 2001, *Int. J. Mod. Phys. D* 10, 213-223.
- Jimenez, R. & Loeb, A. 2002, *ApJ* 573, 37.
- Jimenez, R., Verde, L., Treu, T., dan Stern, D. 2003, *ApJ* 593, 622.
- Linder, E. V. 2003, *Phys. Rev. Lett.* 90, 091301.
- Moresco, M., Verde, L., Pozzetti, L., Jimenez, R., dan Cimatti, A. 2012, *JCAP* 2012, 053.
- Moresco, M. 2015, *Mon. Not. Royal Soc. Lett* 450, L16-20.
- Moresco, M., Pozzetti, L., Cimatti, A., Jimenez, R., Maraston, C., Verde, L., Thomas, D., Citro, A., Tojeiro, R., dan Wilkinson, D. 2016, *JCAP* 2016, 014.
- Perlmutter, S. et al. 1999, *ApJ* 517, 565.
- Planck Collaboration 2020, *Astronomy & Astrophysics* 641, A6.
- Ratsimbazafy, A. L. et al. 2017, *Mon. Not. Royal Astron. Soc.* 467, 3239-3254.
- Riess, A. G. et al. 1998, *American Astron. Soc.* 116, 1009-1038.
- Riess, et al. 2016, *ApJ* 826, 56.
- Scolnic, et al. 2018, *ApJ* 859, 101.
- Seikel, M. et al. 2012, *JCAP* 2012, 036.
- Seikel, M. & Clarkson, C. 2013, arXiv: 1311.6678.
- Simon, J. et al. 2005, *Phys. Rev. D.* 71, 123001.
- Stern, D. et al. 2010, *Astrophys. J. Supp. S.* 188, 280.
- Vagnozzi, S. et al. 2021, *ApJ* 908, 84.
- Wang, D. & Meng, X. 2017, *Phys. Rev. D.* 95, 023508.
- Zhang, et al. 2014, *Res. Astron. Astrophys* 14, 1221.
- Zhang, M. & Li, H. 2018, *Eu. Phys. J. C.* 78, 460(2018).

Efek Anisotropi Teori *Generalized Uncertainty Principle* pada Persamaan Keadaan Bintang Neutron

A. B. Wahidin^{1,2*}, I. Husin^{3,4}, dan A. Sulaksono⁵

¹Program Studi Sains Atmosfer dan Keplanetan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia

²Observatorium Astronomi ITERA Lampung, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Indonesia

³Department of General Education, Faculty of Art and Science, Sampoerna University, Jakarta Indonesia

⁴IoT and Physics Lab, Sampoerna University, Jakarta, Indonesia

⁵Departemen Fisika, FMIPA, Universitas Indonesia, Depok, Indonesia

*E-mail: alka.wahidin@sap.itera.ac.id

ABSTRAK

'Generalized Uncertainty Principle' (GUP) merupakan modifikasi relasi komutasi Heisenberg dengan tujuan memasukan efek panjang minimum dan menjadi jalan untuk mengkuantisasi gravitasi. Modifikasinya memberikan deformasi pada besaran observabel kuantum pada skala Planckian yang diparametrisasi oleh parameter β . Disini kami meninjau efek GUP anisotropi terhadap persamaan keadaan bintang neutron dengan model RMF dan parameter BSP. Dimana kami mengkonstrain parameter β dengan data eksperimen ion berat. Kami mendapati data eksperimen masih cocok hingga faktor GUP $\beta \approx 2,5 \times 10^{-7} \text{ MeV}^{-2}$, tambahan efek anisotropi tidak signifikan sehingga dapat diabaikan. Selain itu dengan memperhitungkan efek GUP dapat menyebabkan prediksi massa maksimum bintang neutron menjadi lebih kecil.

Kata Kunci: GUP - Bintang Neutron - Nuclear Matter

1 PENDAHULUAN

Prinsip Ketidakpastian Heisenberg (*Heisenberg Uncertainty Principles*) atau HUP menyatakan bahwa kita tidak bisa mengukur posisi dan momentum bersama-sama dengan presisi. Bentuk relasi komutasi dari HUP dinyatakan dengan

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar. \quad (1)$$

Dimana HUP tidak memberikan batas ketidakpastian dari suatu besaran saat kita ingin mengukur salah satunya secara presisi. Untuk mencapai ketidakpastian posisi secara akurat, maka kita perlu membuat momentum (dan juga energi) menjadi sangat besar. Energi berkontribusi melengkungkan ruang dan waktu sama seperti massa dan membentuk lubang hitam dengan radius $R \sim GM/c^2$. Energi yang terlalu besar akan menyebabkan informasi mengenai partikel akan tersembunyi di dalam horizon kejadian. Sehingga tidak mungkin untuk melokalisasi apapun dengan kepastian lebih kecil dari panjang Planck yaitu $L_{\text{planck}} = \sqrt{\hbar G/c^3} \sim 10^{-33} \text{ cm}$. Penulis pada Kempf, et al. (1995) mengusulkan model relasi komutasi dengan bentuk

$$[\hat{x}, \hat{p}] = i\hbar (1 + \beta \hat{p}^2), \quad (2)$$

Dimana $\beta > 0$. Dengan ini ketidakpastian posisi memiliki nilai minimum yaitu $\Delta x_0 = \hbar \sqrt{\beta}$. Modifikasi terhadap HUP selanjutnya disebut *Generalized Uncertainty Principle* (GUP).

Model tersebut mengubah operator $\hat{x}$ dan $\hat{p}$ menjadi tidak simetri. Untuk mengatasinya diperkenalkan suatu faktor normalisasi pada integral seluruh ruang momentum yaitu

$$\int_{-\infty}^{\infty} d^3p \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d^3p}{(1 + \beta_k p_k^2)^3} \quad (3)$$

dimana $k=1,2,3$. Transformasi ini akan memodifikasi harga ekspektasi besaran-besaran mekanika kuantum. Kami mengusulkan efek anisotropi muncul pada faktor GUP dan melihat bagaimana dampaknya pada prediksi massa maksimum bintang neutron dari analisis persamaan keadaannya. Asumsikan simetri pada faktor GUP dan momentumnya adalah $\beta_x = \beta_y = \beta_r$ dan $p_x^2 + p_y^2 = p_r^2$, sehingga

$$\begin{aligned} \beta_k p_k^2 &= \beta_x p_x^2 + \beta_y p_y^2 + \beta_z p_z^2 \\ &= \beta_r p^2 [1 + \alpha \cos^2 \theta], \end{aligned} \quad (4)$$

dimana $\alpha \equiv (\beta_z - \beta_r)/\beta_r$, dan θ adalah sudut yang dihitung dari sumbu-z positif ke vektor p . Sehingga integral terhadap seluruh ruang momentum menjadi

$$\int_{-\infty}^{\infty} d^3p \rightarrow \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d^3p}{(1 + \beta_r p^2 [1 + \alpha \cos^2 \theta])^3}. \quad (5)$$

Untuk mempelajari GUP lebih lanjut pembaca bisa melihat Ökcü & Aydinler (2021), Perdam (2012), Maggiore (1993) dan referensi terkait.

1.1 Materi Bintang Neutron

Kami menggunakan model *Relativistic Mean Field* (RMF) (Diener, 2010) dan parameter set BSP (singkatan yang diambil dari inisial nama pengusulnya) (Agrawal, et. al., 2012), untuk mendeskripsikan materi dari bintang neutron. Model ini merupakan optimalisasi model RMF agar konsisten pada *finite nuclear matter* (inti berat) hingga *infinite nuclear matter* (bintang neutron).

Untuk menghitung nilai ekspektasi persamaan keadaan dari model RMF. Kita perlu mengevaluasi integral berikut.

$$\begin{aligned}\rho_0 &= \frac{2}{(2\pi)^3} \int_0^{k_f} d^3k \\ \rho_s &= \frac{2}{(2\pi)^3} \int_0^{k_f} d^3k \frac{m^*}{\sqrt{k^2 + m^{*2}}} \\ \varepsilon_{kin} &= \frac{2}{(2\pi)^3} \int_0^{k_f} d^3k \sqrt{k^2 + m^{*2}} \\ P_{kin} &= \frac{1}{3} \left(\frac{2}{(2\pi)^3} \int_0^{k_f} d^3k \frac{k^2}{\sqrt{k^2 + m^{*2}}} \right), \quad (6)\end{aligned}$$

yang masing-masing merupakan *number density*, *scalar density*, suku kinetik dari rapat energi dan suku kinetik dari tekanan. Dimana pada model yang kami gunakan, keempat integral tersebut muncul dan perlu dievaluasi kembali dengan memperhitungkan efek GUP.

1.2 Transformasi Persamaan Keadaan

Hasil dari transformasi persamaan keadaan menghasilkan suku koreksi yang mengandung faktor GUP arah radial β_r yang selanjutnya hanya ditulis sebagai β . Hasil perhitungannya adalah:

1. Number Density

$$\rho_0 \approx \frac{k_F^3}{3\pi^2} - \beta \frac{k_F^5(3 + \alpha)}{5\pi^2} \quad (8)$$

2. Scalar Density

$$\rho_s = \rho_s^{(0)} + \Delta\rho_s \quad (9)$$

dimana

$$\begin{aligned}\rho_s^{(0)} &= \frac{1}{2\pi} \left[k_f m^* \sqrt{k_f^2 + m^{*2}} - m^{*3} \right. \\ &\quad \left. \times \ln \left(\frac{k_f + \sqrt{k_f^2 + m^{*2}}}{m^*} \right) \right] \\ \Delta\rho_s &= -\frac{m(3 + \alpha)\beta}{3\pi^2} \left[\frac{k_f(k_f^4 - k_f^2 m^{*2} - 3m^{*4})}{\sqrt{k_f^2 + m^{*2}}} \right. \\ &\quad \left. + 3m^{*4} \ln \left(\frac{k_f + \sqrt{k_f^2 + m^{*2}}}{m^*} \right) \right]\end{aligned}$$

3. Suku Kinetik dari Rapat Energi

$$\varepsilon_{kin} = \varepsilon^{(0)} + \Delta\varepsilon \quad (10)$$

dimana

$$\varepsilon^{(0)} = \frac{1}{8\pi} \left[k_f \sqrt{k_f^2 + m^{*2}} (2k_f^2 + m^{*2}) - m^{*4} \ln \left(\frac{k_f + \sqrt{k_f^2 + m^{*2}}}{m^*} \right) \right]$$

$$\begin{aligned}\Delta\varepsilon &= -\frac{(3 + \alpha)\beta}{18\pi^2} \left[k_f \sqrt{k_f^2 + m^{*2}} \right. \\ &\quad \times (2k_f^4 + 2k_f^2 m^{*2} - 3m^{*4}) \\ &\quad \left. + 3m^{*6} \ln \left(\frac{k_f + \sqrt{k_f^2 + m^{*2}}}{m^*} \right) \right]\end{aligned}$$

4. Suku Kinetik dari Tekanan

$$P_{kin} = P^{(0)} + \Delta P \quad (11)$$

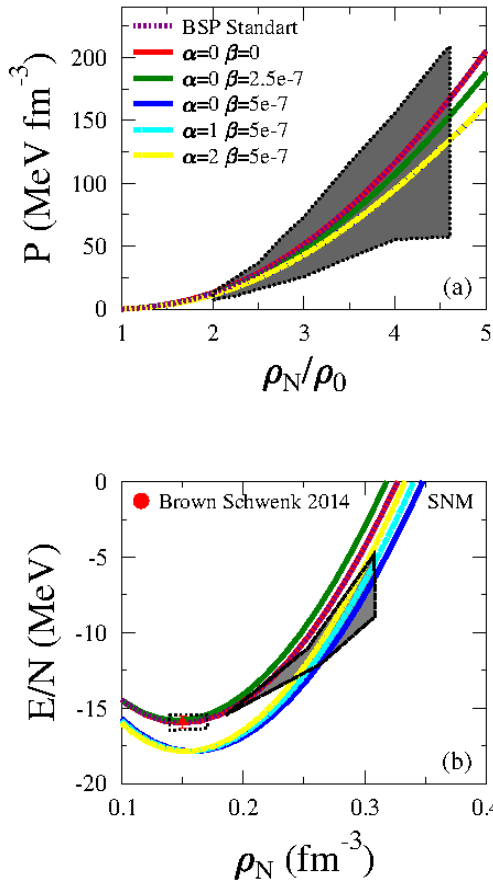
dimana

$$\begin{aligned}P^{(0)} &= \frac{1}{3} \frac{1}{8\pi^2} \left[k_f \sqrt{k_f^2 + m^{*2}} (2k_f^2 - 3m^{*2}) \right. \\ &\quad \left. + 3m^{*4} \ln \left(\frac{k_f + \sqrt{k_f^2 + m^{*2}}}{m^*} \right) \right] \\ \Delta P &= -\frac{1}{3} \frac{(3 + \alpha)\beta}{72\pi^2} \left[\frac{k_f}{\sqrt{k_f^2 + m^{*2}}} \right. \\ &\quad \times (-16k_f^6 + 10k_f^4 m^{*2} - 25k_f^2 m^{*4} - 75m^{*6}) \\ &\quad \left. + 75m^{*6} \ln \left(\frac{k_f + \sqrt{k_f^2 + m^{*2}}}{m^*} \right) \right]\end{aligned}$$

Dapat dilihat faktor anisotropi α dan faktor GUP β muncul sebagai koefisien yang tidak bebas linear. Sehingga variasi dari faktor anisotropi akan signifikan ketika faktor GUP yang cukup besar.

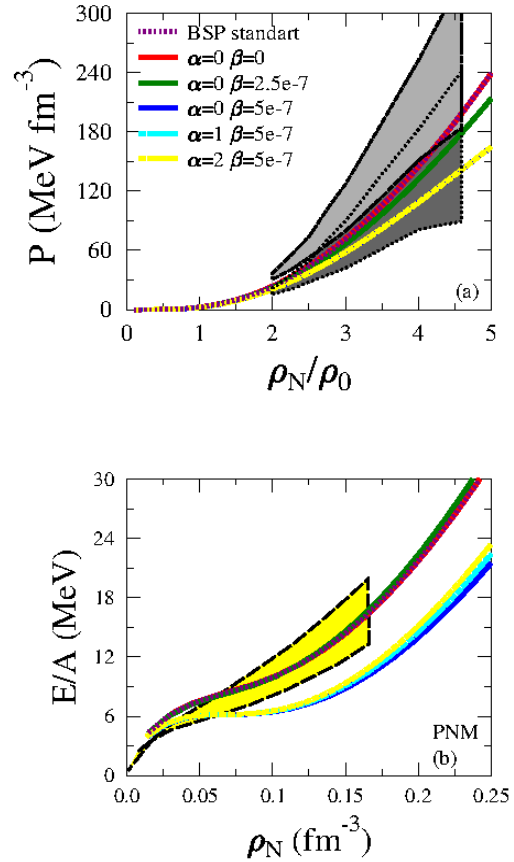
2 HASIL

Kami memodifikasi *source-code* model RMF dengan parameter BSP (Agrawal, et. al., 2012) dalam Fortran 77 yang di miliki oleh A. Sulaksono (penulis ke-3). Kami memvariasikan 2 buah parameter, yaitu faktor anisotropi α dan faktor GUP arah radial β untuk melihat pengaruhnya pada persamaan keadaan materi nuklir. Variasi parameter GUP dilakukan di sekitar $\beta \sim 10^{-7} \text{ MeV}^{-2}$ karena dampaknya lebih signifikan di rentang tersebut tanpa menyimpang terlalu jauh dari data eksperimen ion berat. Kami hanya memvariasikan parameter α di $\beta = 5 \times 10^{-7} \text{ MeV}^{-2}$ disebabkan efek dari



Gambar 1. Cek hasil perhitungan dengan data Symmetric Nuclear Matter (SNM). (Atas) Tekanan sebagai fungsi rapat jumlah nukleon dalam satuan kerapatan pada saturasi nuklir. Daerah diarsir berwarna abu-abu adalah data eksperimen ion berat (Danielewicz, et. al., 2002). (Bawah) Energi ikat sebagai fungsi kerapatan jumlah nukleon. Daerah abu-abu merupakan energi ikat di sekitar 2 kali rapat saturasi nuklir dari data eksperimen FOPI (La Fefre, et. al., 2016). Daerah di dalam kotak garis putus-putus merupakan rentang energi ikat SNM yang diizinkan di sekitar kerapatan saturasi nuklir yang didapat dari persamaan massa Bethe-Weizacker. Juga ditampilkan hasil dari Brown & Schwenk (2014).

anisotropi tidak signifikan untuk parameter GUP $\beta = 2,5 \times 10^{-7} \text{ MeV}^{-2}$ namun kami tampilkan untuk melihat karakteristik dari pengaruh anisotropi. Kami juga membandingkan pada 2 kasus yaitu *Symmetric Nuclear Matter* (SNM) dan *Pure Neutron Matter* (PNM). Seluruh variasi parameter yang diberikan masih masuk kedalam konstrain data. Untuk mempelajari lebih lanjut mengenai data eksperimen yang digunakan di gambar 1 dan 2, pembaca dapat meninjau Rahmansyah, et. al. (2020) dan referensi yang menyertainya.



Gambar 2. Sama seperti gambar 1, namun untuk kasus *Pure Neutron Matter* (PNM). (Atas) Daerah abu-abu menunjukkan data dari eksperimen ion berat (Danielewicz, et. al., 2002). (Bawah) Daerah kuning merupakan energi ikat teoritis yang didapat dari perhitungan *chiral effective field theory* (Kruger, et. al., 2013; Holt & Kaiser. 2017).

Persamaan keadaan ditunjukkan pada panel atas gambar 1 dan 2. Terlihat bahwa efek dari faktor GUP β akan cenderung membuat penurunan gradien tekanan dari materi nuklir (melunak). Sedangkan efek anisotropi α tidak memberikan dampak pada gradien tekanan materi nuklir. Efek turunnya kemiringan persamaan keadaan ini mirip seperti kasus materi bintang neutron dengan hyperon, akibatnya adalah prediksi massa maksimum dari bintang neutron (statik) akan menurun (Agrawal, et. al., 2012; Sulaksono & Agrawal, 2021). Dimana dijelaskan bahwa solusi persamaan Tolman-Volkoff-Oppenheimer (TOV) dengan persamaan keadaan BSP akan menghasilkan massa maksimum di kisaran $2,0 M_{\odot}$, sedangkan dengan hyperon akan menghasilkan massa maksimum sekitar $1,7 M_{\odot}$.

Panel bawah dari Gambar 1 dan Gambar 2 menunjukkan perbandingan hasil prediksi energi ikat dengan data. Terlihat bahwa hanya untuk $\beta =$

$2,5 \times 10^{-7} \text{MeV}^{-2}$ yang masuk kedalam konstrain energi ikat SNM yang diperbolehkan. Namun prediksi energi ikat di sekitar 2 kali kerapatan saturasi nuklir ρ_0 terlihat semakin besar dan menjauhi data eksperimen. Sedangkan pada kasus PNM, prediksi model BSP baik dengan dan tanpa memperhitungkan efek GUP cukup representatif dengan data eksperimen. Namun kurang akurat pada kerapatan rendah (permukaan bintang neutron). Dari sini kita dapat menetapkan bahwa sejauh ini $\beta = 2,5 \times 10^{-7} \text{MeV}^{-2}$ masih cocok dengan data eksperimen.

Efek anisotropi pada tekanan yang signifikan meningkatkan prediksi massa maksimum (Rahmansyah, et.al, 2020; Sulaksono & Agrawal, 2021; Setiawan & Sulaksono, 2019) tidak ditemui pada efek anisotropi GUP. Hal tersebut disebabkan karena dampaknya yang tidak signifikan terhadap gradien persamaan keadaan. Walaupun terdapat variasi energi ikat, ia dapat menentukan konstrain tapi tidak mempengaruhi prediksi massa maksimum. Walaupun perhitungan massa maksimum dengan persamaan TOV belum kami lakukan, karena efek pelunakan GUP tidak sebesar kasus bintang neutron dengan Hyperon (Agrawal, et. al., 2012; Sulaksono & Agrawal, 2021), prediksi massa maksimum bintang neutron statik model BSP diduga akan turun sedikit dari $2,0 M_{\odot}$.

3 KESIMPULAN

Kami mendapati eksperimen ion berat berpotensi mengkonstrain faktor GUP hingga $\beta \lesssim 2,5 \times 10^{-7} \text{MeV}^{-2}$. Selain itu efek dari panjang

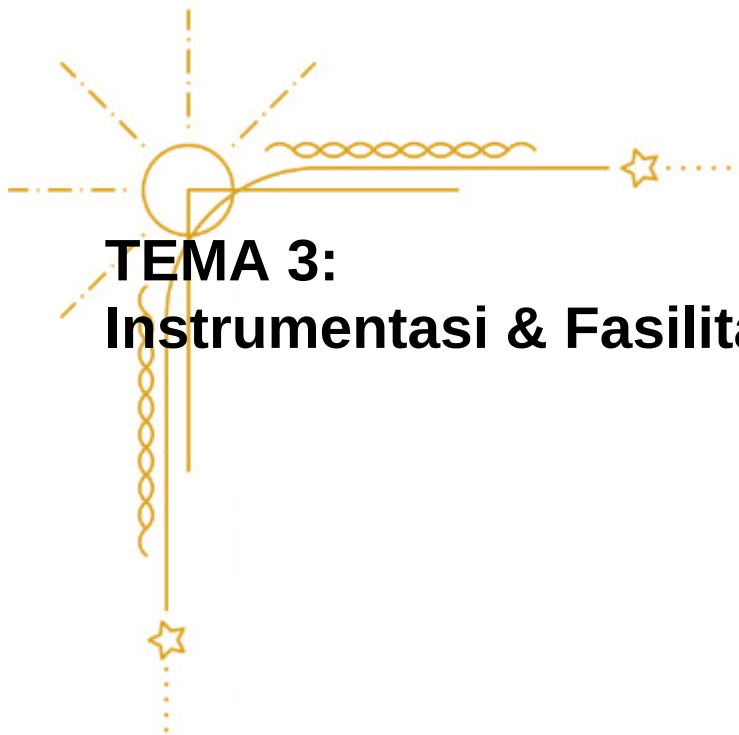
minimum (GUP) akan menyebabkan prediksi tekanan yang mampu ditahan materi bintang neutron turun dan menurunkan massa maksimum bintang neutron. Selain itu jika efek anisotropi dimasukkan di parameter GUP, hasilnya tidak signifikan di bintang neutron sehingga selanjutnya dapat diabaikan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada panitia Seminar Panorama Antariksa 2021 atas bantuan penuh terhadap biaya pendaftaran.

4 PUSTAKA

- Kempf, A., Mangano, G. & Mann, R. B., 1995, *Phys.Rev.D* **52**:1108
 Agrawal, B.K., Sulaksono, A., & Reinhard, P.G. 2012, *Nucl.Phys.A* **882** 1-20
 Diener, J. W. P. 2010, *arXiv*: 0806.0747
 Ökcü, Ö., & Aydiner, E. 2021, *Nucl.Phys.B* **964**,115324
 Perdam, P. 2012, *Phys.Lett.B* **714** 317-323
 Maggiore, M. 1993 . *Phys.Lett.B* **319** 83-86
 Danielewicz, P., Lacey, R., & Lynch, W. G. 2002, *Science* **298**,1592
 La Fefre, A., Leifels, Y., Reisdorf, W., Aichelin, J., & Hartnack, Ch. 2016, *Nucl. Phys. A* **945**,112
 Brown, B.A. & Schwenk, A. 2014. *Phys. Rev. C* **89**, 011307. Erratum: 2015, *Phys. Rev. C* **91**, 049902
 Krüger, T., Tews, I., Hebeler, K., & Schwenk, A. 2013, *Phys. Rev. C* **88**, 025802
 Rahmansyah, A., Sulaksono. A., Wahidin, A. B., & Setiawan, A. M.(2020) *Eur. Phys. J. C* **80**, no.8, 769
 Holt, J.W., & Kaiser, N. 2017, *Phys. Rev. C* **95**, 034326
 Sulaksono, A. & Agrawal,B.K. 2012. *Nucl.Phys.A* **895** 44-58
 Setiawan, A.M. & Sulaksono, A. 2019, *Eur. Phys. J. C* **79**:755



TEMA 3:

Instrumentasi & Fasilitas Astronomi

Pemanfaatan Kamera DSLR Canon 1200D untuk Pengamatan Fotometri Bintang Variabel

A. Wibowo^{1*} dan M. Putra²

¹Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Subang

²Program Studi Magister Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung

*E-mail: ariwibowo@unsub.ac.id

ABSTRAK

Pada umumnya sensor yang digunakan pada pekerjaan fotometri adalah sensor kamera yang berbasis CCD yang dilengkapi dengan filter pita sempit yang telah terbakukan. Seperti sistem Johnson-Cousins UBVRI. Namun dalam fotometri tidak terbatas hanya menggunakan kamera CCD saja, melainkan dapat juga menggunakan kamera DSLR. Adapun sensitivitas spektral cahaya pada sensor memiliki filter warna yang terdiri dari filter RGB. Hal ini dapat dilihat pada hasil penelitian yang menunjukkan tren kurva cahaya yang sama dengan tren kurva cahaya penelitian sebelumnya yaitu Whitney (1950), Smith (1955), dan Danzier (1966). Bintang Variabel pada penelitian ini difokuskan pada bintang variabel VZ Cnc. Sedangkan teknik fotometri yang digunakan adalah fotometri diferensial.

Kata Kunci: DSLR – Fotometri diferensial – VZ Cnc

1 PENDAHULUAN

Pengamatan bintang variabel merupakan bidang yang paling memungkinkan bagi astronom amatir untuk berkontribusi dalam penelitian astronomi. Menurut AAVSO (*America Association of Variable Star Observers*), karena keterbatasan waktu dan alat yang dimiliki oleh astronom profesional sehingga tidak mampu meneliti semua bintang variabel. Oleh karena itu, disinilah kesempatan bagi astronom amatir untuk memberikan sumbangsih dalam perkembangan astronomi khususnya perkembangan fotometri bintang variabel. Selain itu pengamatan bintang variabel, dapat dimanfaatkan observatorium maupun astronom amatir sebagai kegiatan untuk membangun jiwa keingintahuan dalam melakukan suatu penelitian. Melakukan pengamatan dan pengolahan data secara mandiri tentunya akan melatih keterampilan dalam melakukan penelitian sesuai yang diharapkan. Bintang variabel juga dapat menjadi obyek yang bagus untuk kalangan siswa, sebab kegiatan ini nantinya dapat dijadikan proyek sains yang lebih lanjut.

Dengan melihat pertimbangan di atas, maka penulis bermaksud untuk melakukan penelitian fotometri bintang variabel dengan menggunakan instrumen yang umum dan terjangkau adalah menggunakan kamera DSLR (*Digital Single Lens Reflex*). Adapun penggunaan kamera DSLR untuk kegiatan fotometri, memiliki keunggulan yaitu lebih familiar dibandingkan dengan kamera CCD (*Charge-Coupled Device*), lebih mudah dalam penggunaannya. Selain instrumen yang digunakan, dalam pengamatan bintang variabel ini juga digunakan beberapa perangkat lunak (*software*) seperti IRIS berbasis windows operating system. Selain dari instrumen dan perangkat tersebut, kami

juga mempertimbangkan pemilihan obyek bintang variabel yang memungkinkan untuk diamati, diteliti dan dianalisis. Sehingga hasil yang didapatkan dari penelitian ini diharapkan dapat dijadikan rujukan dalam usaha untuk memperkaya *khazanah* pengetahuan dan penelitian oleh observatorium swasta di Indonesia.

2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kamera DSLR (*Digital Singel Lens Reflex*)

Secara teknis kamera DSLR memiliki kemiripan dengan CCD dalam penggunaan fotometri (Mulyanto, 2007). Penggunaan DSLR dalam pengamatan, memungkinkan para astronom amatir untuk melakukan kompensasi efek tertentu seperti warna bintang. Adapun warna bintang adalah faktor penghambat dalam memperkirakan keakuratan pengamatan visual dari suatu bintang. Penggunaan kamera DSLR juga dapat digunakan dalam pendeteksian variasi kecerahan suatu obyek. Juga efektif untuk melakukan perbandingan pengamatan terhadap detektor lain (Tjin, 2011).

2.2 Fotometri diferensial

Fotometri diferensial adalah mengukur perbesaran magnitudo dari bintang target dengan magnitudo sebuah bintang pembanding atau beberapa bintang. Keluaran dari tehnik ini dapat juga disebut sebagai delta magnitudo. Fotometri diferensial lebih mudah daripada fotometri absolut dan sangat akurat ketika digunakan untuk mengukur variasi yang kecil. Rasio kecerlangan bintang atau fluks pancaran bintang, E_1 dan E_2 dapat dihubungkan dengan magnitudonya seperti pada persamaan 1 dengan m_1 dan m_2 masing-masing adalah magnitudo bintang 1 dan magnitudo bintang 2 dengan ditunjukkan pada persamaan di bawah ini.

$$\frac{E_1}{E_2} = 2,512^{-(m_1-m_2)} \quad (1)$$

Persamaan ini dikenal sebagai persamaan Pogson. Dengan $(2,512)^5 \approx 100$ dan tanda negatif di depan tanda kurung memiliki arti bahwa nilai magnitudo akan membesar jika fluks pancaran mengecil. Dengan mengambil logaritma dari persamaan 2.6 maka didapatkan persamaan (Roy and Clark, 2003) seperti pada persamaan 2 yaitu;

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log \frac{E_1}{E_2} \quad (2)$$

Dengan m_1 menyatakan magnitudo bintang 1, m_2 menyatakan magnitudo bintang 2, E_1 adalah fluks pancaran bintang 1, dan E_2 adalah fluks pancaran bintang 2.

2.3 Bintang Variabel Vz Cnc (Vz Cancr)

Bintang Vz Cnc digolongkan bintang variable pulsasi yang disebabkan oleh faktor internal. Perubahan kecerlangan dari bintang variabel pulsasi dapat berupa perubahan ukuran dan atau bentuk (Strohmeier, 1972). Keseluruhan bagian bintang bervibrasi, osilasi atau sebagian besar dapat diartikan sebagai berdenyut. Sehingga dapat menyebabkan radius dan temperatur efektif bintang berubah-ubah. Tipe Delta Scuti (AAVSO). Koordinat Equatorial : 8h40m52,09s/9°49'26,8'' serta memiliki kelas spektrum = A7III-F2III (Sinbad) dan $m_v = 0,02 - 0,25$ mag, $P = 0,01-0,2$ hari = 0,24 jam-4,8 jam. Nama lain dari Vz Cnc adalah HD 73857 (AAVSO).

3 METODE PENELITIAN

Instrumen yang digunakan dalam pengamatan bintang variabel ini adalah teleskop refraktor Williams Optic dengan Panjang focus 477,9 mm (f/5,9) diameter 81 mm dan kamera DSLR Canon 1200D dengan ukuran citra 5196 x 3464 piksel atau 22,3 x 14,9 mm sedangkan ukuran pikselnya 4,29 x 4,29 micron dan medan pandang optik 160,41' x 107,18'.

Secara umum metode penelitian bintang variabel dikelompokkan ke dalam tiga tahap. Tahap pertama adalah pemilihan target bintang variabel yang akan diamati, tahap kedua adalah pengambilan data fotometri bintang variabel. Kemudian tahap ketiga adalah proses olah fotometri bintang variabel. Adapun penjelasan di masing-masing tahap adalah sebagai berikut:

1. Pemilihan obyek bintang variabel. Secara garis besar diambil dari katalog ASAS (*All Sky Automatic Survey*). Dalam pemilihan obyek pengamatan dari katalog ASAS kemudian di Sort di Microsoft Excel dan dipilih bintang variabel dengan mempertimbangkan beberapa aspek

diantaranya: a). Letak koordinat target pengamatan, b). Magnitudo bintang target, c). Medan pandang kamera yang terdiri dari bintang target, bintang cek dan bintang pembanding, dan d). Periode bintang target.

2. Pengambilan data fotometri. Adapun tahapan pengambilan data yang dimaksud dilakukan dengan beberapa tahapan seperti; a). Pengambilan citra obyek, b) Uji pola Bintang, c). Pengambilan citra Bias, d). pengambilan citra Obyek bagian dua, e). pengambilan citra Dark, f). pengambilan citra Flat, g). Pengambilan citra Dark-Flat
3. Prosedur pengolahan data. Secara garis besar pengolahan data mentah menjadi citra yang siap diolah (decoding) maupun dekomposisi citra menggunakan IRIS 5.30 dan Microsoft Excel 2013. Adapun secara garis besar, langkah metode ini terbagi menjadi beberapa bagian diantaranya ; a). Proses reduksi citra, b) *Aperture photometry* dan membangun kurva cahaya dengan menggunakan parameter waktu pengamatan dan intensitas atau fluks bintang hasil pengolahan data. Adapun nilai intensitas tersebut merupakan hasil penjumlahan dari *count* setiap piksel yang dilingkupi oleh cursor lingkaran *aperture photometry*. Intensitas yang dipakai adalah intensitas bintang target dengan intensitas bintang pembanding dan intensitas bintang cek guna mencari besarnya perbedaan magnitudo bintang (Δm) dengan persamaan sebagai berikut;

$$\Delta m = -2,5 \log \frac{\text{intensitas bintang obyek}}{\text{intensitas bintang pembanding}} \quad (3)$$

Kurva Cahaya Bintang yang dibuat dengan memplot Δm dengan skala waktu yang dapat berupa jam, JD (*Julian Date*) dan Fase. Adapun untuk menentukan fase menggunakan persamaan seperti berikut;

$$T = a + bE \quad (4)$$

Dengan T menyatakan waktu pengamatan dalam HJD, a adalah HJD saat kecerlangan bintang maksimum, E adalah banyaknya siklus yang terhitung dari JD.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian fotometri menggunakan kamera DSLR, dikelompokkan menjadi dua bagian hasil serta analisis diantaranya adalah

1. Uji Linieritas Kamera DSLR 1200D
Kurva Linieritas dapat menyatakan hubungan linieritas antara count citra dan waktu integrasi. Data untuk kurva ini diperoleh dari citra *flat-field* melalui penyetingan alat dan bahan. Kemudian langkah untuk mendapatkan data uji linieritas

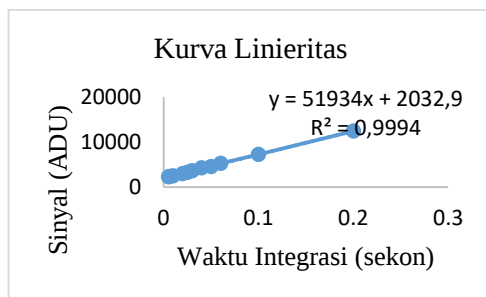
adalah dengan bervariasi waktu integrasi dari 1/200s, hingga 50s. Adapun untuk masing-masing waktu integrasi dilakukan 3 kali pengambilan citra. Selanjutnya ke tiga citra di masing-masing exposure time tersebut dijumlahkan dan dibuat sub-frame untuk dihitung rata-ratanya. Nilai rata-rata ini disebut sebagai sinyal. Kemudian dari data *exposure time* dan sinyal (dalam satuan ADU) dibuat grafik dengan waktu integrasi perekaman citra *flat-field* sebagai sumbu absis, sedangkan *count* rata-rata (sinyal) dari citra *flat-field* sebagai sumbu ordinatnya. Melalui kurva linieritas ini dapat dibuktikan respon linier kamera terhadap cahaya yang datang dan mengetahui batas saturasi dari kamera.

Berdasarkan data citra *flat-field* pada pembentukan kurva linieritas, maka hanya terdapat 11 data yang tidak mengalami saturasi sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data kurva linieritas sinyal terhadap waktu integrasi.

No	waktu integrasi (s)	Sinyal (ADU)
1	0.005	2284.91
2	0.00625	2361.76
3	0.01	2520.05
4	0.02	3012.65
5	0.025	3261.36
6	0.03	3600.52
7	0.04	4258.8
8	0.05	4553.81
9	0.06	5264.1
10	0.1	7220.09
11	0.2	12392.2

Sedangkan Hasil fitting garis lurus pada kurva linieritas memberikan nilai gradien $m=51934$ dan konstanta $c=2032,9$. Adapun kurva linieritas sebagaimana dijelaskan di atas dapat dilihat pada Gambar 1 di bawah ini.



Gambar 1. Kurva linieritas sinyal kamera DSLR Canon 1200D terhadap waktu integrasi.

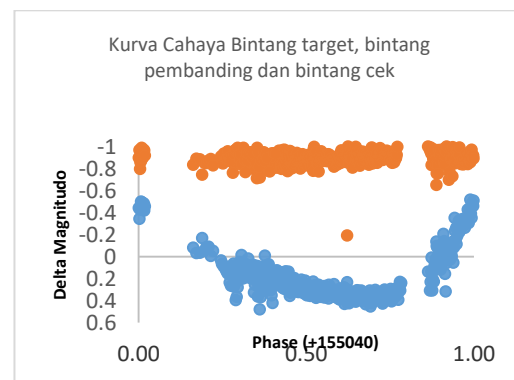
Informasi mengenai kurva linieritas ini dapat membantu pengguna dalam kesuksesan perekaman objek astronomi, khususnya fotometri bintang variabel. Oleh karena agar objek tidak

Tabel 2. Daftar Sebagian data pengamatan Vz Cnc dari waktu pengamatan dalam HJD, fase, siklus dan delta magnitudo.

HJD	Siklus	Fase	delta Mag
2458481.201	155040.2	0.24617	0.031
2458481.201	155040.2	0.249129	0.103
2458481.203	155040.3	0.257791	0.101
2458481.203	155040.3	0.260657	0.356
2458481.204	155040.3	0.263522	0.363
2458481.204	155040.3	0.266453	0.305
2458481.205	155040.3	0.269319	0.841
2458481.205	155040.3	0.272184	0.324
2458481.206	155040.3	0.275116	0.422
2458481.207	155040.3	0.280846	0.475
2458481.207	155040.3	0.283778	0.278
2458481.21	155040.3	0.298156	0.344
2458481.21	155040.3	0.29971	0.079
2458481.21	155040.3	0.301303	-0.153
2458481.211	155040.3	0.304434	0.142
2458481.211	155040.3	0.305967	0.415

mengalami saturasi dan supaya dapat meminimalisir tingkat derau dalam sebuah citra, disarankan perekaman suatu objek astronomi, sinyal maksimal sebesar 14228 ADU.

- Hasil pengamatan dan reduksi citra Setelah IRIS memproses *aperture photometry*, maka hasilnya akan muncul di Windows outputnya berupa JD, dan magnitudo bintang target dan bintang pembanding. Selanjutnya output tersebut disimpan dalam format text file. Untuk membuat kurva cahaya digunakan Ms. Excel dengan text file dibuka di excel dengan memilih opsi *space delimited* agar format data yang akan dimunculkan sesuai dengan satu cell untuk satu data dan tidak terpisah seperti pada Tabel 2.

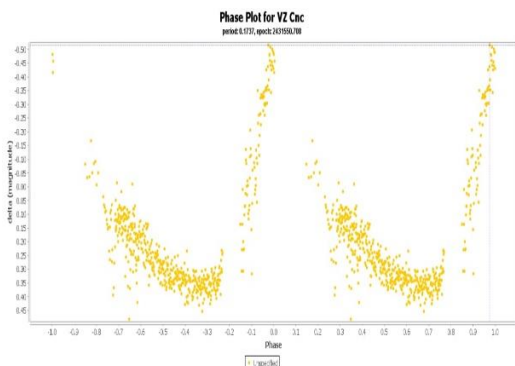


Gambar 2. Kurva cahaya dengan warna biru adalah Δm bintang target Vz Cnc dengan bintang pembanding sedangkan warna oranye bintang pembanding dengan bintang cek.

Setelah nilai E diperoleh, angka di belakang koma dari siklus tersebut adalah fase. Nilai fase dan delta magnitudo ini digunakan untuk membangun kurva cahaya seperti pada Gambar 2.

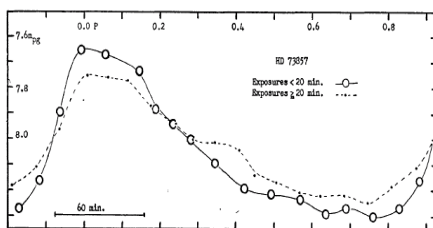
5 PENUTUP

Dalam pembentukan Kurva cahaya antara Δm dengan fase dapat juga digunakan tehnik lain yaitu dengan menggunakan software olah data bintang variabel yang disediakan oleh AAVSO yaitu *vstar*, akan terbentuk kurva hasil olah data menggunakan *vstar* seperti yang terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Kurva cahaya Vz Cnc yang dibuat dengan bantuan *vstar*.

Dari kurva cahaya Gambar 3 di atas, terlihat bahwa fase yang didapatkan pada saat pengamatan tidaklah lengkap. Hal ini menyebabkan bentuk kurva cahaya menjadi terputus. Namun bentuk kurva cahaya dari pengamatan bila dibandingkan dengan kurva cahaya yang diambil dari Whitney (1950) seperti pada gambar 4 memiliki kesamaan dan *trend* yang sama. Adapun kesamaannya di titik maksimumnya dan titik minimumnya. Walaupun secara keseluruhan kurva cahaya yang diperoleh dari data pengamatan terputus, namun dapat dipastikan sama dengan kurva cahaya dari Whitney (1950), dengan titik maksimumnya berada pada fase 0, sedangkan titik minimumnya berada tidak tepat pada fase 0,5 akan tetapi 0,7.



Gambar 4. Kurva cahaya Vz Cnc dari penelitian Whitney (1950)

Sehingga dapat disimpulkan pada pengamatan fotometri bintang variabel dengan menggunakan detektor berupa kamera DSLR Canon 1200D dapat dilakukan. Dari sebaran data delta magnitudo, untuk masing-masing pengamatan bintang cek dengan bintang pembanding, memiliki Deviasi Standar sebesar 0.08. Dengan demikian, kualitas data yang

diperoleh serta pengolahannya cukup baik, dan bisa menjadi rujukan untuk dilakukan penelitian yang sama. Hal ini dapat dilihat dari penyebaran magnitudo kurva cahaya yang diperoleh, dengan waktu bukaan yang lama maupun pendek, data delta magnitudonya tetap terfokus dan tidak menyebar.

Ucapan Terima Kasih

Adapun dalam kesempatan ini peneliti ingin mengucapkan terima kasih kepada Dr. Sogiono SH.,MH.,MS., selaku Kepala Sekolah SMA Plus Astha Hannas yang telah memberikan ijin selama melakukan penelitian di Observatorium e-Maya.

Program Studi Magister Astronomi, FMIPA ITB beserta segenap civitas akademika atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menimba ilmu selama menjadi mahasiswa.

6 PUSTAKA

- Amrizal, 2005. Tugas Akhir. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Arifin, Z.M. 2013. Tugas akhir. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Brager, M. & Montgomery, M.H. 2000. ASP Conference series, Vol. 210.
- Guyon, O., & Martinache, F. 2012, in society of photo-Optical instrumentation Engineers (SPIE) conference series, Vol. 8444, Society of Photo-Optical Instrumentation engineers (SPIE) Conference series.
- Howell. 2006. Handbook of CCD Astronomy. Cambridge University Press, New York.
- Hytti, H.T. 2005. Proc. Of SPIE-IS&T electronic Imaging, SPIE Vol. 6059, 60590A. Finland
- Janesick, J. 2001. *Scientific Charge-Coupled Devices*, 95 (Bellingham:SPIE).
- Janesick, J. 2002. *Dueling Detectors*. OE Magazine, Edisi Februari.
- Macdonald, L., Ji, W., Bouzit, S., Findlater, K. 2002. Proc. Colour in Graphics, Imaging, and Vision Conf. Poitiers.
- Tjin, E. 2012. *Memilih Kamera Dan Lensa Yang Tepat*. Elex Media, Jakarta.
- M. Zhang, et al. 2015. Precision Multi-band Photometry with a DSLR Camera. Astro-ph-IM. 1506 V1.
- Park, W et al. 2015. arXiv:1501.04778v1.
- Samus, O.V. 2004. General Catalogue Of Variable Stars- Electronical Edition.
- The AAVSO DSLR Observing Manual
User manual from IRIS 5.30
- Vora, P.L., Farrell, Tietz, F.J.D., Brainard, D.H., 1997. *Digital Color Cameras Spectral Response*. HP Technical Report 97-54.
- Widjanarko, T. 1995. Tugas akhir. Institut Teknologi Bandung. Bandung.
- Whitney, B. 1950. Publication of the Astronomical Society of the pacific. Vol. 62, No. 364

Status Terkini Bosscha Robotic Telescope

M. Yusuf^{*1}, A. Setiawan¹, M. Sulaeman¹, C. J. B. Anin², dan Y. Yulianty¹

¹Observatorium Bosscha, FMIPA, Institut Teknologi Bandung

²Program Studi Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, ITB

*E-mail: yusuf@as.itb.ac.id

ABSTRAK

Bosscha Robotic Telescope (BRT) adalah teleskop 35 cm yang digunakan sebagai eksperimen pengembangan sistem robotik di Observatorium Bosscha sejak tahun 2014. Kini, dilengkapi dengan sistem monitor cuaca, otomasi gerak atap, dan sistem *scheduling* pengamatan, BRT telah menjadi teleskop robotik yang beroperasi penuh secara otomatis dengan akurasi pointing $<1''$ dan akurasi guiding $<0,5''$. Pada makalah ini kami menampilkan bagaimana upaya integrasi tersebut dilakukan dari aspek instrumentasi dan teknis. Kami juga sampaikan penilaian kerja sistem BRT dari pengamatan yang telah dilakukan.

Kata Kunci: *Teleskop Robotik*

1 PENDAHULUAN

Pengembangan teleskop robotik di Observatorium Bosscha telah memasuki babak baru, setelah sebelumnya melalui tahapan eksperimental dan pengembangan otomasi sistem gerak teleskop (Yusuf, 2019). Upaya lanjut adalah membuat teleskop dapat beroperasi otomatis secara penuh, salah satunya dengan melakukan pengembangan komponen pendukung pengamatan seperti stasiun cuaca dan sensor awan, serta motorisasi atap gedung teleskop. Setelah itu dilakukan integrasi pengamatan dengan membangun sistem *scheduling* dan komunikasi komponen kepada teleskop dan uji sistem melalui pengamatan.

2 STASIUN CUACA DAN SENSOR AWAN

Pengamatan astronomi pada panjang gelombang optik memerlukan kondisi langit yang ideal, khususnya untuk pekerjaan fotometrik. Untuk dapat bekerja secara otomatis, teleskop robotik memerlukan masukan kondisi cuaca sebagai input parameter aman atau tidak aman untuk teleskop melakukan pengamatan. Stasiun cuaca (Gambar 1.) yang kami bangun akan memberikan input berupa



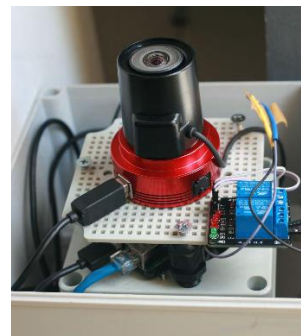
Gambar 1. Stasiun cuaca yang terpasang di atas atap Gedung Surya di Observatorium Bosscha.

temperatur, kelembapan, kecepatan angin, informasi kondisi lingkungan lokal gelap-terang, hujan-basah-kering, mendung-berawan-cerah. Keberadaan awan dapat dideteksi dengan mengukur temperatur langit pada panjang gelombang inframerah (Sloan, 1956). Informasi ini akan dilengkapi data sebaran awan dari all sky camera dan dari citra satelit Himawari. Seluruh masukan dari kedua instrumen tersebut akan digabungkan dan memberikan keputusan kepada teleskop apakah aman untuk melakukan pengamatan.

2.1 Instrumen

Sistem sensor cuaca dibangun menggunakan instrumen AAG Cloudwatcher yang dilengkapi sensor inframerah MLX90614 ESF-AAA (medan pandang 72°), sensor temperatur dan kelembapan, sensor hujan dilengkapi pemanas, sensor kecepatan angin, sensor cahaya.

Sensor awan dibangun dengan instrumen kamera ZWO ASI 120MM dan dilengkapi komputer Raspberry Pi 4 8 Gb. Pada sistem ditambahkan komponen pelengkap berupa kipas, relay, resistor, kabel, kotak IP67 dan dome CCTV untuk melindungi kamera seperti pada Gambar 2.

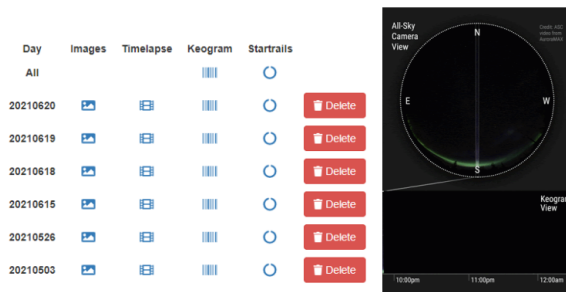


Gambar 2. All Sky Camera menggunakan kamera ZWO ASI 120 MM yang digunakan sebagai sensor awan.

2.2 Perangkat Lunak dan Database

Melalui proses *reverse engineering*, dibangun software stasiun cuaca yang dapat memberikan keluaran data temperatur langit, temperatur sekitar, kelembapan, dan kecepatan angin dengan interval ~15 detik. Program dibangun menggunakan Python 3 dan diaplikasikan pada RaspberryPi.

All sky camera dibangun menggunakan bahasa C dan merupakan modifikasi dari perangkat lunak yang dikembangkan Thomas Jacquin. Perangkat lunak ini akan mengambil citra setiap beberapa detik dan disimpan ke dalam database (Gambar 3).



Gambar 3. Database, video imelapse dan keogram.

2.3 Sistem Otomasi Gerak Atap Gedung Surya

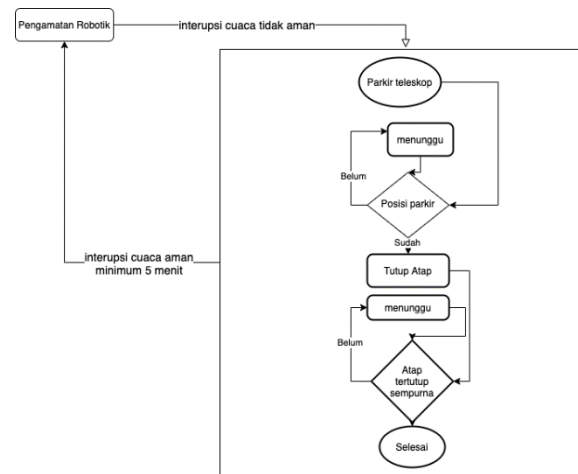
Teleskop BRT ditempatkan pada Gedung Surya dengan atap setengah silinder yang bergerak maju-mundur. Sistem atap sudah dibuka sesuai dengan standar ASCOM sebagai protokol standar perangkat keras astronomi. Dengan ini dibangun sistem otomasi sehingga teleskop dapat melakukan gerak membuka dan menutup dari input teleskop.

3 SISTEM TRACKING AKURASI TINGGI

Untuk meningkatkan tingkat akurasi dan performance, dilakukan pemasangan *absolute encoder*. Dengan ini, teleskop telah dapat melakukan pointing dengan akurasi yang sangat tinggi. Kesalahan tracking rata-rata BRT sekitar ± 0.5 detik busur.

4 INTEGRASI SISTEM

Langkah terakhir dalam membangun pengamatan robotik adalah dengan melakukan integrasi seluruh komponen hingga memastikan teleskop dapat bekerja secara otomatis. Langkah ini dilakukan sebagaimana dijelaskan pada diagram alir pada Gambar 4. Program robotik membaca data sensor cuaca untuk keputusan aman/tidak aman membuka atap. Selanjutnya program robotik membuka atap - menunggu hingga terbuka penuh dan teleskop boleh *Unpark*. Selama pengamatan program robotik akan



Gambar 4. Diagram alir program pengamatan robotik BRT.

selalu memonitor kondisi cuaca dan menginterupsi jika kondisi tidak aman maka akan muncul perintah untuk memarkir teleskop hingga posisi aman dan selanjutnya menutup atap.

5 KESIMPULAN

Upaya pengembangan dan uji yang telah dilakukan memberikan hasil yang positif dimana kami simpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Sistem atap dan sensor cuaca memungkinkan operasi teleskop tanpa pengawasan.
2. Sistem tracking dan guiding akurasi tinggi memungkinkan pengamatan fotometri presisi tinggi.
3. Sistem scheduling memungkinkan operasi teleskop otomatis dan lebih efisien Sistem BRT siap untuk direplikasi di teleskop lain.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kami ucapkan kepada kepala Observatorium Bosscha Ibu Premana W. Premadi atas proposal pengembangan P2MI Tahun 2021. Pembangunan infrastruktur tambahan pada BRT mendapatkan dana dari proposal tersebut.

6 PUSTAKA

- Sloan, R., Shaw, J., Singa, B., & Williams, D. 1956, in *Thermal Radiation from the Atmosphere*, Optical Society of America.
- Yusuf, M., Mahasena, P., Jatmiko, A., 2019, *Bosscha Robotic Telescope (BRT) - a 0.35 meter telescope on Bosscha Observatory*, Journal of Physics: Conference Series Vol. 1127 conference 1

Program Konversi Antena Telekomunikasi Indosat Menjadi Teleskop Radio VLBI

T. Hidayat^{1,2*}, I. Nurul Huda^{1,2}, S. Ramadhan^{1,2}, P. W. Premadi^{1,2}, B. Dermawan^{1,2}, L. Puspitarini^{1,2}, A. T. Jaelani^{1,2}, K. Vierdayanti^{1,2}, M. Irfan^{1,2}, M. Yusuf^{1,2}, M. Hafieduddin^{1,2}, H. R. T. Wulandari^{1,2}, dan C. Kunjaya^{1,2}

¹Kelompok Keahlian Astronomi, FMIPA ITB, Jl. Ganesha 10 Bandung

²Observatorium Bosscha, FMIPA ITB, Lembang

*E-mail: taufiq@as.itb.ac.id

ABSTRAK

Teknik radio *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI) telah memberikan kontribusi yang sangat penting bagi astronomi/astrofisika terutama dalam kemampuannya memberikan resolusi sudut yang paling tinggi, mencapai submilircsec. Pertumbuhan jejaring VLBI juga semakin besar, khususnya di Asia Timur dengan *East-Asian VLBI Network* (EAVN). Dalam makalah ini dipaparkan proposal pengembangan Teleskop Radio VLBI melalui program konversi antena telekomunikasi kerja sama antara Indosat Ooredoo dengan ITB, memanfaatkan *decommissioned antenna* di Stasiun Bumi Jatiluhur. Beberapa persiapan terkait sedang dilakukan bekerjasama dengan network yang telah ada. Potensi aerial ini diperhitungkan melalui kontribusinya dalam mengisi *uv-filling coverage*. Program-program sains yang potensial juga dipaparkan dalam makalah ini. Bersama dengan Teleskop Radio Nasional Thailand (TNRT), yang sedang dalam proses penyelesaian, teleskop ini akan dapat berperan untuk membentuk jejaring VLBI Asia Tenggara (SEAVN) yang siap diintegrasikan dengan EAVN.

Kata Kunci: Astronomi – Radio – VLBI

1 PENDAHULUAN

Sejak ditemukannya gelombang radio dari sumber-sumber astronomi, sejumlah penemuan penting dalam astronomi/astrofisika dapat diperoleh berkat sumbangsih dari astronomi radio; misalnya penemuan tentang kuasar, fenomena inti galaksi aktif, radiasi kosmik latar belakang, pulsar, sumber-sumber maser astrofisika, dan sebagainya. Khususnya, berkat teknik VLBI, yang dikembangkan sejak akhir tahun 1960-an, untuk pertama kalinya para astronom dapat memperoleh citra bayang-bayang suatu lubang hitam supermasif M87 (Akiyama et al., 2019). Teknik VLBI mengizinkan didapatkannya suatu teleskop dengan *aperture* seluas Bumi itu sendiri, yang terwujud oleh adanya *Event Horizon Telescope*.

Di lain pihak, saat ini Indonesia sedang membangun Observatorium Nasional yang berlokasi di Gunung Timau, Kabupaten Kupang, Provinsi NTT (Hidayat et al. 2012, Mumpuni et al. 2018), yang merupakan kerja sama antara LAPAN-BRIN, ITB, Universitas Nusa Cendana, dan Pemerintah Daerah setempat; di mana pengembangan astronomi radio merupakan salah satu program dalam Master Plan Observatorium Nasional (lihat misalnya dalam Hidayat et al. 2014). Teleskop radio kelas 20m diusulkan, yang dapat bekerja pada frekuensi tinggi di Q Band (45 GHz), serta *dipole array* yang bekerja di frekuensi rendah. Bergabung dengan VGOS

(*VLBI Global Observing System*) juga diusulkan dalam Master Plan Observatorium Nasional untuk aplikasi geodesi. Pengembangan ini tentu dengan mempertimbangkan kerja sama internasional yang telah terjalin dengan beberapa institusi lain, khususnya dengan NAOJ (Jepang).

Sebagai bagian dari percepatan pengembangan astronomi radio, selain yang dikembangkan di Observatorium Bosscha (Hidayat et al. 2013), program konversi antena komunikasi menjadi teleskop radio merupakan suatu opsi yang perlu dipertimbangkan, karena telah memberikan cukup banyak contoh yang berhasil, misalnya di Selandia Baru (Woodburn et al. 2015), di Jepang (Yonekura et al. 2016), di Ghana (Duah Asabere et al. 2016), dan di Inggris (Hoare, 2012). Saat ini, terdapat proyek serupa yang telah/sedang/akan dikerjakan di lebih dari 25 negara (Hoare 2019), termasuk berdirinya IVIA (*Iniciativa VLBI Ibero-Americana*, inisiatif konsorsium VLBI Spanyol dan Amerika Latin). Hal ini jelas memberikan prospek yang sangat baik di masa depan, karena memberikan kemungkinan distribusi aerial yang lebih merata di lima benua, serta sejalan dengan dimulainya pembangunan array teleskop radio raksasa dalam konsorsium SKAO (*Square Kilometre Array Observatory*) di Afrika dan Australia. Dengan demikian, teleskop radio global yang akan tersedia di globe Bumi akan terwujud, dan Indonesia harus menyiapkan langkah-langkah untuk ikut bergabung ke konsorsium tersebut.

2 KONVERSI ANTENA

Teknologi telekomunikasi berbasis satelit intelsat pernah menjadi tulang punggung telekomunikasi global, yang menghubungkan seluruh globe Bumi mulai akhir tahun 1960-an, dan telah sukses memberikan layanan selama beberapa dasawarsa. Teknologi ini memerlukan tersedianya stasiun bumi yang memiliki antena parabolik berukuran 20 – 36 m, untuk sambungan maupun kendali dengan satelit. Sejalan dengan munculnya teknologi telekomunikasi baru berbasiskan jaringan serat optik, khususnya untuk penyediaan sambungan internet dengan bandwidth besar, maka antena telekomunikasi tersebut sudah tidak lagi dioperasikan. Hal ini merupakan peluang bagi astronomi radio untuk memanfaatkan antena tersebut dengan melakukan konversi menjadi teleskop radio (Hoare 2019).



Gambar 1. Stasiun Bumi Indosat Ooredoo di Jatiluhur, Jawa Barat (<https://indosatooredoo.com>).

Telekomunikasi satelit di Indonesia disediakan antara lain oleh PT Indosat Ooredoo yang memiliki stasiun Bumi di Jatiluhur, beroperasi sejak tahun 1968 (lihat Gambar 1). Terdapat banyak antena berdiameter cukup besar di stasiun bumi tersebut yang sudah tidak dioperasikan lagi. Terkait dengan itu, untuk pengembangan astronomi radio di Indonesia, ITB melakukan kerja sama dengan Indosat, guna memanfaatkan *decommissioned antenna* tersebut, untuk dikonversi menjadi teleskop radio yang berkemampuan VLBI. Survey pendahuluan dilakukan mulai tahun 2015 untuk memeriksa antena mana yang masih potensial untuk dilakukan konversi. Progress dari pekerjaan ini antara lain dilaporkan dalam Hidayat (2019).

2.1 Antena JAH-2A 32 m

Pilihan utama adalah antena JAH-2A berdiameter 32 m (lihat Gambar 2) buatan TIW (kemudian menjadi Vertex RSI), yang beroperasi sejak tahun 1979. Antena ini memiliki *transmit* dan *receive gain* masing-masing sebesar 63 dan 58 dBi. Antenna ini diletakkan pada posisi $6^{\circ} 31' 23,19''$ LS dan $107^{\circ} 24'$

$41,72''$ BT pada ketinggian 139 mdpl. Antena serupa telah berhasil dikonversi di Kuntunse, Ghana (Duah Asabere et al. 2016), dan sedang dilakukan di Tulancingo, Meksiko.



Gambar 2. Antena JAH-2A berdiameter 32m yang sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai teleskop radio VLBI untuk aplikasi astronomi/astrofisika.

2.2 Antena JAH-5A 18,3 m

Antena selanjutnya yang sangat potensial untuk aplikasi geodesi/geodinamika adalah Antena JAH-5A yang berdiameter 18,3m (lihat Gambar 3). Antena ini dibuat oleh COMSAT dan beroperasi sejak tahun 1994. Sebagai *full motion antenna*, perangkat ini memiliki *transmit* dan *receive gain* masing-masing sebesar 60 dan 56 dBi. Antenna ini diletakkan pada posisi $6^{\circ} 31' 18,55''$ LS dan $107^{\circ} 24' 38,26''$ BT pada ketinggian 139 mdpl. Ukurannya yang relatif lebih kecil akan mampu bergerak lebih cepat dan tentu dapat menangkap sumber radio kuat dari kuasar dengan mudah.

2.3 Program yang dilakukan

Program lanjutan yang telah dilakukan adalah *assessment* teknis, terutama pada Antena JAH-2A. Hal ini mencakup kondisi struktur mekanik, motor-motor penggerak, sistem pengamanan, kondisi permukaan, *feed horn* dan sistem optik antena, serta peninjauan sistem kontrol penggerak antena. Secara umum, didapati kondisi antena masih cukup baik.

Pengukuran awal kondisi RFI (*Radio Frequency Interference*) di Jatiluhur telah dilakukan (Ramadhan 2021a), dan pemantauan cuaca dilakukan dengan pemasangan AWS (*Automatic Weather Station*) di salah satu menara, dengan hasil awal dipaparkan dalam Ramadhan (2021b). Selain

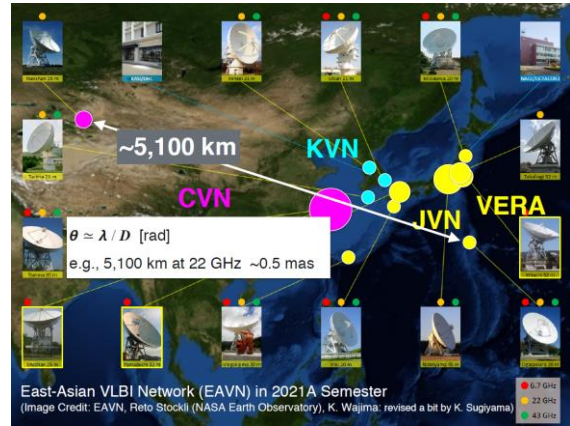
itu, studi pemanfaatan Antena JAH-5A untuk aplikasi geodesi juga telah dilakukan (Nurul Huda et al. 2021), khususnya untuk penentuan parameter orientasi Bumi (EOP) dan kerangka acuan terrestrial maupun langit (ITRF dan ICRF). Desain konversi akan dibuat menyesuaikan semua hasil *assessment* tersebut.



Gambar 3. Antena JAH-5A berdiameter 18,3m yang sangat potensial untuk dimanfaatkan sebagai teleskop radio VLBI untuk aplikasi geodesi/geodinamika.

3 JEJARING VLBI ASIA TIMUR DAN TENGGARA

Dalam tahap pertama diusulkan teleskop JAH-2A bekerja pada C-Band sebagai *single dish* seperti pada operasi awalnya. Hal ini akan mampu melakukan pengamatan kontinum untuk studi *active galactic nuclei* (AGN), termasuk sumber *radio-quiet* (galaksi Seyfert dan radio-quiet quasars) serta sumber *radio-loud* (blazars, *radio-loud quasars* dan *radio galaxies*), yang diharapkan juga mencakup nilai z tinggi. Dalam jejaring VLBI, teleskop ini dapat bergabung untuk studi pembentukan *supermassive black holes* dan evolusinya di AGN, dan untuk pengamatan *nearby starburst galaxies*, pengamatan supernova dan sisanya, (misalnya pada ARP220 dan IC 883, yang diketahui memiliki AGN). Pengamatan sumber-sumber maser merupakan salah satu program yang sangat prospektif untuk mengamati daerah pembentukan bintang, khususnya bintang masif, melalui garis maser methanol (CH_3OH) pada frekuensi 6,7 GHz.

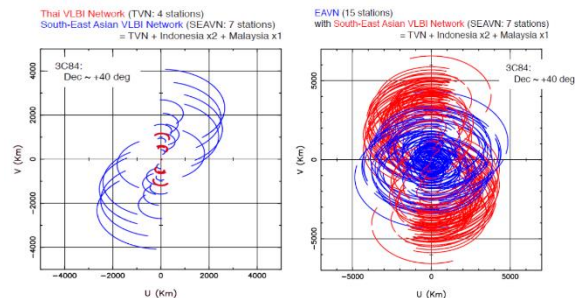


Gambar 4. EAVN yang saat ini terdiri dari JVN (Jepang), KVN (Korea), dan CVN (China), (credit: Wajima & Sugiyama).

Potensi teleskop ini untuk bergabung pada East Asian VLBI Network (EAVN, lihat Gambar 4) dipaparkan pada Hidayat et al. (2021) serta dapat berperan membentuk jejaring regional Asia Tenggara (SEAVN, lihat Tabel 1) bersama Thailand, yang sedang menyelesaikan teleskop 40m (TNRT), dan Malaysia.

Tabel 1. Resolusi sudut yang dapat dicapai oleh EAVN dan SEAVN.

	baseline (km)	C (mas)	K (mas)	Q (mas)
CVN - JVN	5100	1.81	0.55	0.28
TNRT - Jatiluhur	2970	3.11	0.95	0.48
TNRT - Timau	4170	2.21	0.67	0.35



Gambar 5. UV-coverage yang dapat dicapai oleh SEAVN dan EAVN (credit: Sugiyama).

Dari Tabel 1 terlihat bahwa TNRT-Jatiluhur serta TNRT-Timau dapat membentuk *baseline* masing-masing sepanjang 2970 dan 4170 km, dengan resolusi sudut mencapai 2,21 mas di C-Band (6,7 GHz), 0,67 mas di K-Band (22 GHz), dan 0,35 mas di Q-Band (43 GHz). UV-coverage untuk suatu sumber 3C84 pada deklinasi 40° ditunjukkan pada Gambar 5 dan memberikan perbaikan yang sangat signifikan apabila digabungkan dengan EAVN.

4 PENUTUP

Makalah ini memberikan studi awal tentang pentingnya keberadaan teleskop radio VLBI di daerah katulistiwa yang sampai sejauh ini masih kosong dan dapat berperan mengisi kekosongan tersebut untuk menjembatani *baseline* antara Australia dan Asia Timur. Posisi Indonesia berada di tengah-tengah dari wilayah tersebut sehingga kontribusinya akan cukup signifikan. Linimasa implementasi program ini adalah 2 tahun, namun sejauh ini masih terkendala oleh ketersediaan budget. Astronomi radio merupakan bidang multi-disiplin antara sains dan teknologi *cutting-edge* yang sangat penting untuk dikembangkan di Indonesia, serta memiliki aplikasi yang luas.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih secara khusus kepada Indosat Ooredoo atas dukungannya terhadap proyek pengembangan VLBI di Indonesia. Terima kasih khusus juga disampaikan kepada Dr. Koichiro Sugiyama (NARIT) yang telah memberikan beberapa material dalam makalah ini.

5 PUSTAKA

Akiyama, K., Alberdi, A., Alef, W., Asada, et al. (Event Horizon Telescope Collaboration), 2019, First M87 event horizon telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole, *ApJ*, 875, L1

Duah Asabere, B., Gaylard, M., Horellou, C., Winkler, H., & Jarrett, T., 2015, Radio astronomy in Africa: The case of Ghana. In: *The South African Institute of Physics* (SAIP 2014) Conference Proceedings

Hidayat, T., Mahasena, P., Dermawan, B., Hadi, T., Premadi, P., & Herdiwijaya, D., 2012, Clear sky fraction above Indonesia: an analysis for astronomical site selection. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 427(3), 1903–1917

Hidayat, T., S. Leon-Tanne, A. B. Suksmono, P. Mahasena, M. Irfan, & Indrawanto, 2013, Recent Development of Radio Astronomy at the Bosscha Observatory, In *Proc. of the 11th Asian-Pacific Regional IAU Meeting* (2011), Chiang Mai

Hidayat, T., Munir, A., Dermawan, B., Jaelani, A., Leon, S., Nugroho, D., Suksmono, A., Mahasena, P., Premadi, P., Herdiwijaya, D., Kunjaya, C., Dupe, Z., Brahmantyo, B., Mandey, D., Yusuf, M., Wulandari, H., Arief, F., Irfan, M., Jatmiko, A., Akbar, E., Sianturi, H., Tanesib, J., Warsito, A., & Utama, J.,

2014, Radio frequency interference measurements in Indonesia. A survey to establish a radio astronomy observatory. *Experimental Astron.* 37(1), 85–108

Hidayat, T., 2019, Report from Indonesia, Antenna Conversion Workshop, Accra, Ghana

Hidayat, T., Sugiyama, K., Jaroenjittichai, P., & Abidin, Z. Z., 2021, Developing the Future VLBI Network in Southeast Asia, the 13th EA-VLBI Workshop, Chiang Mai, Thailand (online)

Hoare, M., 2012, Recycling for radio astronomy. *Astron. Geophys.* 53(1), 1–19

Hoare, M., 2019, Development in Africa with Radio Astronomy (DARA) project, Antenna Conversion Workshop, Accra, Ghana

Mumpuni, E.S., Puspitarini, L., Priyatikanto, R., Yatini, C.Y., & Putra, M., 2018, Future astronomy facilities in Indonesia. *Nature Astron.* 2(12), 930–932

Nurul Huda, I., Hidayat, T., Dermawan, B., Lambert, S., Liu, N., Leon, S., Fujisawa, K., Yonekura, Y., Sugiyama, K., Hirota, T., Premadi, P. W., Breton, R., Minh, Y.-C., Jaroenjittichai, P., Wijaya, D., Pradipta, D., Putri, N. S. E., Ramadhan, S., Puspitarini, L., Wulandari, H. R. T., & Hafieduddin, M., 2021, Measuring the impact of Indonesian antennas on global geodetic VLBI network, *Experimental Astron.*, 52, Issue 1-2, p.141-155

Ramadhan, S., 2021a, Pengukuran Radio Frequency Interference (RFI) pada Situs-situs Observatorium Astronomi Radio Indonesia di Masa Depan. *Tesis Magister*, Program Studi Astronomi, ITB

Ramadhan, S., T. Hidayat, I. Nurul Huda, P. W. Premadi, B. Dermawan, L. Puspitarini, A. T. Jaelani, K. Vierdayanti, M. Irfan, M. Yusuf, M. Hafieduddin, H. R. T. Wulandari, Z. L. Dupe, & C. Kunjaya, 2021b, di *Proceedings* ini.

Woodburn, L., Natusch, T., Weston, S., Thomasson, P., Godwin, M., Granet, C., & Gulyaev, S., 2015, Conversion of a New Zealand 30-Metre Telecommunications Antenna into a Radio Telescope. *Publ. Astron. Soc. Aust.* 32(e017), 1–14

Yonekura, Y., Saito, Y., Sugiyama, K., Soon, K., Momose, M., Yokosawa, M., Ogawa, H., Kimura, K., Abe, Y., Nishimura, A., Hasegawa, Y., Fujisawa, K., Ohyama, T., Kono, Y., Miyamoto, Y., Sawada-Satoh, S., Kobayashi, H., Kawaguchi, N., Honma, M., Shibata, K., Sato, K., Ueno, Y., Jike, T., Tamura, Y., Hirota, T., Miyazaki, A., Niinuma, K., Sorai, K., Takaba, H., Hachisuka, K., Kondo, T., Sekido, M., Murata, Y., Nakai, N., & Omodaka, T., 2016, The Hitachi and Takahagi 32 m radio telescopes: Upgrade of the antennas from satellite communication to radio astronomy. *Publ. Astron. Soc. Japan* 68(5), 1–16

Low-Cost Astrophotography Mount using DIY Barn-Door Tracker and 3D-Printed Astro-Tracker at Observatorium Astronomi ITERA Lampung

A. A. Yusuf^{1*}, A. Oktaviandra¹, I. Hafizah¹, D. Andriyan², dan H. L. Malasan^{1,3}

¹ ITERA Lampung Astronomical Observatory, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia

² ITERA Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika Unit, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia

³ Department of Astronomy, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: aditya.yusuf@staff.itera.ac.id

ABSTRAK

Astrophotography is becoming increasingly common among the Indonesian astronomical community. The need to freeze the stars moving in the heavens made us try to do experiments with making an affordable barn-door tracker and 3d-printed astro-tracker. We tried two types of barn-door trackers using inexpensive stepper motor drives equipped with Arduino Nano microcontrollers. We also used a 3d-printer to create a mini equatorial mount that has more tracking accuracy. From our experiments, the first type of barn-door is the most stable one with the right stepper motor speed regulation, and is able to mount small DSLR cameras weighted about ± 600 gram. The 3d-printed Astro-tracker that we made is capable of maximally supporting DSLR cameras and 55 mm kit lenses weighing ± 800 grams, with good tracking accuracy (without forming visible star trail) for 30 seconds. The tools and materials to make these two types of trackers can be obtained or purchased relatively cheaply and easily.

Keyword: *astrophotography - barn-door tracker - 3d printer*

1 INTRODUCTION

Astrophotography is one of many ways to introduce astronomy to the world. The Indonesian astronomy community has grown quite a lot in the last decade. Most members of this astronomy club are interested in astrophotography. In Indonesia, there are several discussion groups on social media which also specifically discuss astrophotography.

The ITERA Astronomical Observatory (OAIL) is located at the southern tip of the island of Sumatera, is one of the observatories that support the popularization of astronomy activities as well to add insight and knowledge to both the local and national communities.



Figure 1. Astronomy community distribution in Indonesia

Stellar photography requires that the camera rotate at the same rate as the earth, but in the opposite direction. Any difference in the rate of camera rotation will make star trails or blurry images.

We know in general, tools to support astrophotography tend to be expensive and also difficult to obtain, especially in Indonesia. Therefore, we are looking into how we can help

these astronomy communities thrive through astrophotography with tools that can be made easily and cheaply, and whose materials are easy to find on the market.

To answer this need, we limit the criteria of the tool to be made: The tool must be able to assist in capturing nightscape / milkyway images, for wide-field imaging, easy to use, portable, easy for do-it-yourself project in a short time, the material is easy to find anywhere Indonesian market, easy to use, and also capable and does not produce a significant star trail when used.

We decided to try to find and make two types of instruments namely: a) Barn-door tracker and b) DIY mini equatorial mount. Barn door tracker is a device in the form of two pieces of wood connected by a hinge. Then there is a mechanism that pushes or lower the top wood so that it counter rotates the rotation of the Earth. The equatorial mount that we want to make is a simple equatorial mount with PLA material printed using a 3d printer. By using an arduino nano microcontroller and stepper motor, we hope we can upgrade the mount star-tracking mechanism.

We hope in the future, the astronomy community in Indonesia can build these tools to produce good astrophotography and ultimately increase the enthusiasm of the Indonesian people for astronomy.

2 ITERA BARN-DOOR TRACKER (IBT)

2.1 Barn-Door Tracker: Basic

Barn Door Tracker also known as Haig or Scotch mount is a device used to cancel out the diurnal

motion of the Earth for observational use or long exposure photography of astronomical objects. The concept was created by George Haig in 1975 which was published in Sky and Telescope magazine April edition. .

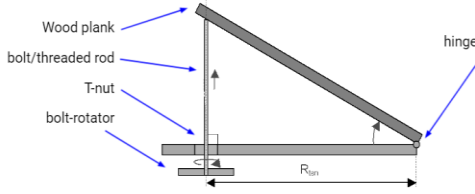


Figure 2. Barn-door tracker diagram

The essence of this tool is how to lift or lower the top board so that it has the same speed as the earth's rotation, by turning a bolt or threaded rod. So the camera attached to the top board will follow the star motion. At the beginning of its use in 1975, the barn door tracker had to be manually rotated by hand for every few seconds so as not to cause any visible trails on the camera (camera still used film roll at that time). For today's digital cameras, these imperfections in rotational speed can significantly affect the image. Therefore, using an automatic drive that can rotate more smoothly and precisely such as a servo or stepper motor, will make the image much better.

2.2 Stepper-motor

Stepper motor is a DC brushless electric motor that divides its 360-degree rotation into some number of steps equally. Its motion can be commanded using steps per second or delay time between steps. Stepper motor also needs a driver to communicate with the microcontroller.

Using this stepper motor, we have to calculate the rotation it takes to move the top board of our barn-door tracker with a sidereal rate.

$$\omega = \frac{2\pi RW}{T_{sid}} \times \frac{N_B}{N_S}$$

with ω is stepper motor RPM, R is distance of threaded rod to hinge, W is thread/mm of threaded rod or bolt, T_{sid} is sidereal time (minute), N_B is big gear teeth number, and N_S is small gear teeth number (which is attached to our stepper motor).

$$\Delta T = \frac{1000}{\frac{\omega M}{60}}$$

Then we must find stepper motor delay per step (ΔT), ω is stepper motor RPM, and M is step number per full rotation. We can also use microstepping to

further decrease ΔT . Then we can set this stepping with the program in the microcontroller

2.3 IBT design

We have built two designs of barn door tracker IBT-03 uses curved rod design and IBT-04 uses Haig mount design.

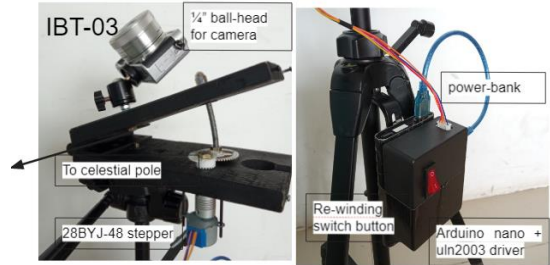


Figure 3. IBT-03, curved rod barn door tracker

IBT-03 consists of a microcontroller Arduino Nano, ULN2003 stepper driver, 28BYJ-48 stepper motor, 10000 mAh 5V powerbank, with 52:20 gear ratio. We use half-stepping to increase accuracy. With $R = 142$ mm, we obtain microstepping $\Delta T = 9.049552$ microsecond.

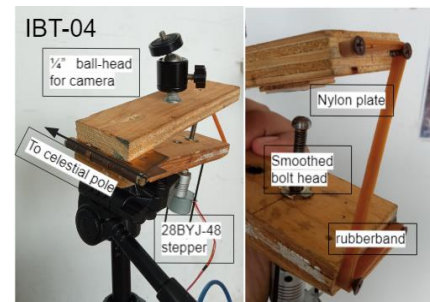


Figure 4. IBT-04 Haig mount

IBT-04 also uses Arduino Nano, 28BYJ-48 stepper, ULN2003 driver, 10000mAh power bank, and set $R = 142$ mm. With this setting we obtain microstepping $\Delta T = 23.528836$ microsecond. Then we alternate the microstepping to 23 and 24 in the ULN2003 program to increase the accuracy, because it only uses integer numbers. We use Arduino IDE to program the Arduino Nano with a very simple-to-understand code.

3 ITERA Mini Star Tracker (IMST)

3.1 3D Printing

Additive manufacturing or more commonly known as 3D printing is a method of construction of a 3D object. 3D printing allows rapid prototyping and low volume manufacturing of a product. For this purpose, an FDM (Fused Deposition Modeling) type of 3D printing is used, using PLA (Polylactic Acid) as the material as it is one of the easiest materials to

work with. For the IMST series tracker, the main body was printed with 0.28mm layer resolution while the gear parts were printed with higher resolution at 0.2mm per layer. 3D printing also can be used economically for low production runs of a product where it is much cheaper than using injection molding techniques.



Figure 5. IMST-01 L-plate mini equatorial

3.2 IMST Design

We have two different approaches to design our mini star tracker. IMST-01 uses L design taking advantage of center balanced L-plate and camera. IMST-02 is a mini german equatorial mount.

IMST-01 uses Arduino Nano as microcontroller, ULN2003 as stepper driver, 28BYJ-48 as stepper motor, and a pair of 3D-printed herringbone gears at 6:1 ratio. Using the herringbone gear we can have a better power transfer between small and big gear.



Figure 6. IMST-02 3d printed mini german equatorial mount

IMST-02 is an upgraded version of 3D-printed Equatorial Mount for DSLR by SirFixalotFPV at thingiverse.com. The original design is not designed for low latitude regions, we update it with a variable latitude wedge we design. We 3D-printed it using Ender 5 and PLA material.

IMST-02 use NEMA 17 Stepper Motor (442BYGH2100C-01A, 1.8°/step, 34 N.cm), DRV8825 stepper driver with 1/32 enabled microstepping, an Arduino Nano as microcontroller, and 6:1 an 4:1 double herringbone gear, which resulted 24:1 reduction. We also built a control box that has some features like, HA motion control push

button, main power switch, 12500 mAh power bank, and battery indicator.

4 TEST RESULTS

We use 2 cameras and 3 lenses to test our mini mounts: a) Nikon 1 J5 with 10-30 mm lens, b) Canon 1100 D with 18-55 mm lens kit, and c) Tamron 70-300 telephoto lens.

4.1 Trail Test

We attempted 6 trail tests on all of our instruments. It turns out that best tracking (HA-axis) is achieved with IMST-02. Images created using all of our instruments are still able to achieve good star shapes, and when stacked this is getting better. This test is strongly influenced by polar alignment accuracy, which only uses compass and digital inclinometer.

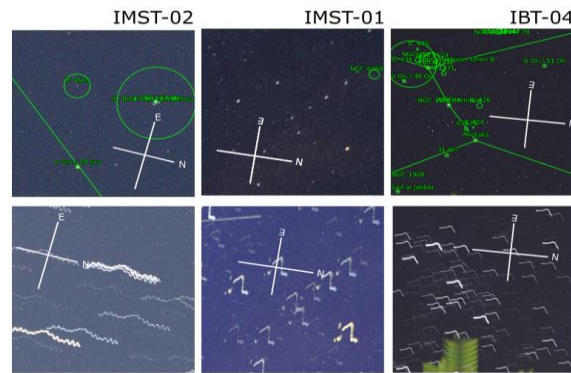


Figure 7. Star trail test of IBT-04, IMST-01, and IMST-02

4.2 Maximum Payload Test

We try to figure out how much is the payload capability using our instruments. In our test, we observe that IMST-02 has the most payload capacity of 1050 gram. IBT-03 and IMST-01 only capable of handling small cameras upto 700 grams.

Table 1. Payload test of IBT-03, IBT-04, IMST-01, and IMST-02

Camera & lens combination	Weight (gr)	IBT-03	IBT-04	IMST-01	IMST-02
Nikon 1 J5 + 10-30 mm	~240	OK	OK	OK	OK
Nikon 1 J5 + 18-55 mm	~440	OK	OK	OK	OK
Canon 1100D + 18-55 mm	~700	OK	OK	overcapacity	OK
Canon 1100D + Tamron 70-300 mm	~1050	overcapacity	overcapacity	overcapacity	OK

4.3 Usage Time Test

The purpose of this test is to find out the maximum elapsed time imaging usage of the camera in combination with our tracker. The test stops when the camera battery or power bank drains out.

Table 2. Maximum time usage test results of IBT-03, IBT-04, IMST-01, and IMST-02

	IBT-03	IBT-04	IMST-01	IMST-02
Nikon 1 J5 + 10-30 mm	~ 3 hours	~3 hours	~ 3 hours	~ 3 hours
Nikon 1 J5 +18-55 mm	~ 3 hours	~ 3 hours	~ 3 hours	~ 3 hours
Canon 1100D + 18-55 mm	~ 2 hours	~ 2 hours	-	~ 2 hours
Canon 1100D + Tamron 70-300 mm	-	-	-	~ 2 hours

4.4 Before and after image stacking

To make the image better, it would be better if we use a calibration frame and also do the stacking process. We recommend using freeware such as deepskystacker or sequator. The stacked image is apparently better than not-stacked images. This is enough for amateur astrophotographers' needs.

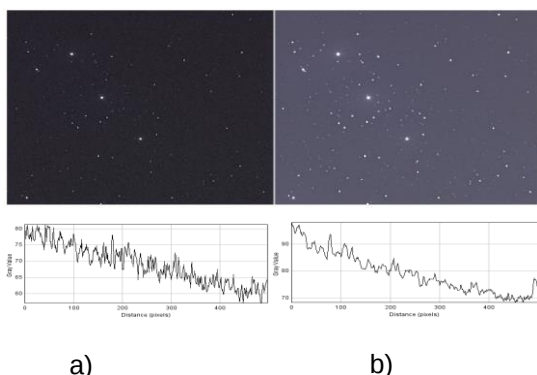


Figure 8. a) before stacking, much noise is visible, b) after stacking, less noise is visible

5 BUILT COST

Here is the table of the built cost of our instruments.

Table 3. Material price of IBT-03, IBT-04, IMST-01, and IMST-02. *) change according to market.

	Mechanical components	Electronic Components	Total
IBT-03	Rp 43.000	Rp 110.000	Rp 154.000
IBT-04	Rp 24.000	Rp 110.000	Rp 135.000
IMST-01	Rp 65.000	Rp 97.000	Rp 162.000
IMST-02	Rp 175.000	Rp 160.000	Rp 335.000

- Camera (EOS 1100D)	: Rp 3.500.000
- Lens (Tamron 70-300)	: Rp 1.500.000
- Tripod	: Rp 300.000
- Sequator / DeepSkyStacker	: Rp 0

Maximum cost is still under Rp 500.000., beside the tripod and camera. We think it's cheaper than the market-available star tracker.

6 CONCLUSION

Generations 3 and 4 and IMST generations 1 and 2 are sufficient to support wide-field astrophotography activities. IBT and IMST are cheaper than star trackers sold in the market.

7 REFERENCES

- D.P. Smits, 1988, A Mathematical Analysis of Double-Arm Barn-Door Drive, MNASSA, Vol. 47
- Legault, T. 2014. *Astrophotography*. Rock Nock Inc.
- Nick Touran, 2017, "Making a cheap and simple barn-door star tracker with software tangent correction for astrophotography", <https://partofthething.com/thoughts/making-a-cheap-and-simple-barn-door-star-tracker-with-software-tangent-correction-for-astrophotography/>, diakses pada Agustus 2021
- SirFixalotFPV, 2020, "Equatorial mount for DSLR", <https://www.thingiverse.com/thing:4593838>, diakses pada April 2021
- Toyib, M., Yusuf, A.A. 2021. Astronomy as a Tool in Community Building, Promoting Social Unity, and Solidarity: First-hand Experience in East Java, Indonesia., CAP Journal No. 29, March 2021
- Woodhouse, C.2016. The Astrophotography Manual: A Practical and Scientific Approach to Deep Space Imaging. Focal Press, New York and London.

Tinjauan Karakteristik dan Target Sains Teleskop Radio *Single-Dish* 18-26 Meter Serta Pemanfaatannya Untuk Observatorium Nasional Timau

M. Husna^{1*} dan F. Mumtahana²

¹Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

²Pusat Riset Antariksa, LAPAN BRIN

*E-mail: miftahlhsna@gmail.com

ABSTRAK

Lereng Gunung Timau, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur, dipilih sebagai lokasi pembangunan observatorium kelas internasional atau dikenal dengan Observatorium Nasional Timau. Observatorium Nasional Timau saat ini sedang mempersiapkan teleskop optik berdiameter 3.8 meter serta merencanakan pembangunan teleskop radio *single-dish* berdiameter kurang lebih 20 meter. Selain lokasi, kajian instrumen pengamatan juga merupakan salah satu aspek penting mulai dari bentuk antena, *mounting*, tipe reflektor hingga fokus penelitian yang nantinya dapat dilakukan dengan teleskop tersebut. Penelitian ini bertujuan untuk memberikan gambaran umum karakteristik dan aspek saintifik teleskop radio dengan diameter tersebut. Pada studi ini telah dikaji 11 teleskop radio *single-dish* di dunia dengan diameter terkecil 18 meter dan terbesar 26 meter. Mayoritas teleskop yang dikaji memiliki bentuk antena paraboloidal, *mounting alt-azimuth* dengan tipe reflektor *cassegrain*. Pada rentang diameter tersebut, banyak target sains yang dapat diperoleh mulai dari Tata Surya hingga Kosmologi dengan berbagai pilihan frekuensi dan tipe pengamatan. Distribusi lokasi teleskop radio *single-dish* seluruh dunia menunjukkan dominasi lokasi berada di belahan Bumi Utara, dan sangat sedikit keberadaannya di sekitar ekuator. Posisi Indonesia yang relatif dekat dengan ekuator, memungkinkan untuk pembangunan teleskop radio *single-dish* yang nantinya dapat ikut serta dalam jaringan VLBI dengan negara lain.

Kata kunci: Observatorium Nasional Timau – antena *single-dish* 20 meter – karakteristik teleskop radio dan target sains radio

1 PENDAHULUAN

UU No.21 tahun 2013 tentang keantariksaan mengamanatkan Indonesia untuk mandiri dalam sains dan teknologi keantariksaan, salah satunya dalam bidang astronomi dan astrofisika (Mumpuni, 2017). Untuk mewujudkannya, dipilihlah lereng Gunung Timau, Kabupaten Kupang, Provinsi Nusa Tenggara Timur, sebagai lokasi pembangunan observatorium kelas internasional setelah melakukan kajian beberapa lokasi yang berpotensi untuk pembangunan observatorium (Hidayat, 2012). Pembangunan dilakukan dengan pertimbangan faktor polusi cahaya yang mencemari Observatorium Bosscha.

Gunung Timau terpilih karena memenuhi persyaratan teknis salah satunya persentase kecerahan langit yang cukup tinggi (250 langit malam cerah per tahun) dibandingkan daerah lain di Indonesia. Hal tersebut dilaporkan oleh Hidayat et.al. (2012), 55%-75% langit malam yang cerah ditemukan dalam rentang bulan April hingga Oktober. Lokasi Observatorium Nasional Timau selanjutnya disebut Obnas Timau, berada di kawasan hutan lindung, lereng Gunung Timau 1300 meter di atas permukaan laut dengan luas sekitar 30 hektar. Salah satu fasilitas utama Obnas Timau penunjang pengamatan adalah teleskop optik 3.8 meter yang

saat ini masih dalam tahap pembangunan. Beberapa topik penelitian yang direncanakan mulai dari cuaca antariksa, pengamatan bintang variabel, *exoplanet*, studi gugus bintang galaktik dan ekstragalaktik, studi materi antar bintang, struktur dan dinamika galaksi hingga pengamatan kosmologi (Mumpuni, 2017). Selain panjang gelombang optik, direncanakan juga pembangunan teleskop pada ranah radio.

Astronomi radio merupakan salah satu cabang astronomi yang mempelajari fenomena objek langit melalui gelombang radio yang dipancarkannya (Wilson et al, 2009). Astronomi radio, memungkinkan untuk mengamati objek lemah pemancar gelombang radio yang dahulunya belum dapat dideteksi. Teleskop radio digunakan untuk mendeteksi sumber gelombang radio lemah yang dapat dioperasikan baik siang maupun malam hari, bahkan ketika langit dalam kondisi mendung. Intensitas sumber yang sampai ke Bumi sangat kecil dibanding radiasi yang diterima pada cahaya tampak, idealnya teleskop radio memiliki area pengumpul sinyal dalam ukuran besar (Wilson et al, 2009).

Antena adalah salah satu bagian utama dari sistem deteksi radio yang berfungsi mengumpulkan sinyal. Antena memiliki beberapa tipe : antena kawat seperti *dipole*, *yagi*, *heliks* dan umumnya berbentuk paraboloidal. Selain antena, desain *mounting* dan

tipe reflektor juga dipertimbangkan sebagai penunjang pengamatan. Desain *mounting* yang sering digunakan adalah *alt-azimuth* dan *equatorial*, sedangkan untuk tipe reflektor prinsip kerjanya mirip dengan sistem optik seperti : *prime focus*, *cassegrain*, *off-axis cassegrain*, *nasmyth*, *bent nasmyth*, dan *dual offset gregorian* (Hunter & Napier, 2016).

Obnas Timau saat ini sedang mempersiapkan pembangunan teleskop radio berdiameter kurang lebih 20 meter. Dalam perencanaan pembangunan sebuah observatorium, penting untuk dilakukan pengkajian baik instrumen maupun fokus penelitian nantinya yang akan digunakan dengan teleskop tersebut. Penelitian ini ditujukan untuk mengumpulkan informasi instrumen dan fokus penelitian beberapa teleskop radio *single-dish* di dunia dengan diameter terkecil 18 meter dan terbesar 26 meter.

2 DATA DAN METODE

2.1 Metode

Pada penelitian ini, telah dikumpulkan informasi lokasi 171 teleskop radio seluruh dunia, berdasarkan Salter, C. J. (2002), 54 data diantaranya merupakan teleskop radio *single-dish* yang kemudian dipilih lagi untuk kelas 20 meter dengan diameter terkecil 18 meter dan terbesar 26 meter. Data ini juga ditambah dengan teleskop radio *single-dish* yang juga digunakan untuk jaringan VLBI berdiameter pada rentang tersebut.

Teleskop radio *single-dish* dengan diameter 18-26 meter kemudian dikaji terkait spesifikasi instrumen dan fokus penelitiannya. Spesifikasi instrumen dalam hal ini seperti diameter, ketinggian, bentuk *mounting*, tipe reflektor dan rentang frekuensi masing-masing teleskop. Resolusi sudut masing-masing teleskop dapat diestimasi dengan informasi rentang frekuensi yang diberikan. Hasil tinjauan spesifikasi instrumen dan focus penelitian dirangkum dalam Tabel 1.

2.2 Data Teleskop Radio *Single-dish* 18 – 26 Meter

Teleskop radio *single-dish* diameter 18-26 meter:

1. Onsala 20 meter, Onsala Space Observatory, Swedia
2. Onsala 25 meter, Onsala Space Observatory, Swedia
3. Simeiz 22 meter, Ukraina
4. HartRAO 26 meter, Afrika Selatan
5. Mopra 22 meter, Australia

Teleskop radio *single-dish* diameter 18-26 meter yang juga digunakan untuk VLBI:

1. Paul Plishner Radio Astronomy and Space Sciences Center (PPRASSC) 18 meter, Amerika Serikat
2. Australia Telescope Compact Array (ATCA) 22 meter, Australia
3. VERA Station (Iriki, Mizusawa, Ishigakijima, Ogasawara) 20 meter, Jepang
4. KVN Station (Ulsan, Yonsei, Jeju) 20 meter, Korea Selatan
5. Shenshan 25 meter, Shanghai, China
6. Nanshan 25 meter, Shanghai, China

2.3 Frekuensi dan Resolusi Sudut

Berdasarkan data rentang frekuensi pada tabel 1, data frekuensi dikonversi menjadi data panjang gelombang menggunakan

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8 \text{ m/s}}{v(\text{Hz})}, \quad (1)$$

dengan v menyatakan pita frekuensi tengah yang digunakan dalam Hz, diperoleh panjang gelombang λ dalam satuan meter. Persamaan (1) digunakan untuk menghitung resolusi sudut masing-masing frekuensi yang diberikan oleh

$$\theta = 1,22 \frac{\lambda}{D}, \quad (2)$$

dengan D menyatakan diameter teleskop dalam meter, λ panjang gelombang dalam satuan meter dan θ resolusi sudut dalam satuan radian.

3 HASIL DAN ANALISIS

Berdasarkan informasi lokasi teleskop diperoleh distribusi lokasi untuk teleskop radio secara umum berada di Bumi belahan Utara. Teleskop radio *single-dish* tidak ditemukan disekitar ekuator, seperti yang ditunjukkan oleh gambar 1. Teleskop radio *single-dish* diameter sekitar 20 meter 37% berada di Benua Asia. Berdasarkan Tabel 1, dapat dilihat bahwa dari 11 teleskop yang dikaji, seluruh teleskop memiliki tipe reflektor *cassegrain* dengan mayoritas menggunakan *mounting alt-azimuth* dan hanya satu teleskop dengan *mounting equatorial* yaitu teleskop 26 meter HartRAO di Afrika Selatan. Pada tabel juga terdapat informasi ketinggian yang ternyata cukup bervariasi. Data ketinggian merentang dari 5 hingga 2080 mdpl, yang menunjukkan bahwa penempatan teleskop radio diameter kelas 20 meter dengan rentang frekuensi kerja tersebut tidak harus berada di lokasi yang sangat tinggi.

Selain tipe reflector dan *mounting* serta ketinggian, Tabel 1 juga menunjukkan hasil kajian bidang fokus penelitian untuk masing-masing teleskop.

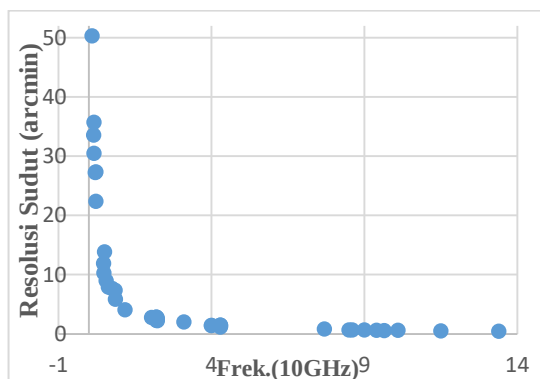
Tabel 1. Teleskop radio *single-dish* diameter sekitar 20 meter.

No	Teleskop dan Diameter	Ketinggian (mdpl)	Tipe Reflektor	Fokus Penelitian	Rentang Frekuensi (GHz)	Resolusi Sudut (arcmin)
1	ATCA 22 meter	273	Cassegrain. Alt-Azimuth	Kosmologi. Evolusi bintang. Astrokimia. Medan magnet di Galaksi. Sinar kosmik energi tinggi	1.1 – 3.1	27.2341
					3.9 – 11	7.6767
					16 – 25	2.7898
					30 – 50	1.4298
					83 - 105	0.6084
2	HartRAO 26 meter	1595	Cassegrain. Equatorial	ISM. Pulsar. Quasar	1.6 - 22	4.1011
3	KVN 21 meter (Ulsan. Yonsei. Tamna)	16.98 (Ulsan)	Cassegrain. Alt-Azimuth	Evolusi Bintang. AGN. Astrokimia	21.25 – 23.23	2.6928
		97 (Yonsei)			42.11 – 44.11	1.3898
		98 (Tamna)			85 – 95	0.6657
					125 - 142	0.4488
4	Mopra Radio Telescope 22 meter	850	Cassegrain. Alt-Azimuth	Struktur dan Komposisi Galaksi. Pembentukan bintang	16 – 27	2.6600
					30 – 50	1.4298
					76 - 117	0.5926
5	Nanshan 25 meter	2080	Cassegrain. Alt-Azimuth	Pulsar. Astrokimia. Pembentukan bintang. evolusi Bintang. AGN. transien	22	2.2876
					43	1.1704
6	Onsala 20 meter	22.76	Scmidt-Cassegrain. Alt-Azimuth	Astrokimia. ISM. Galaksi. EKstragalaksi. AGN. Pembentukan Bintang	2.2 – 2.4	27.3525
					8.1 – 9	7.3580
					18 – 26	2.8595
					26 – 36	2.0294
					36 – 50	1.4630
					67 – 87	0.8170
					85 - 116	0.6260
7	Onsala 25 meter	18.01	Cassegrain. Alt-Azimuth	Pembentukan bintang. AGN. Astrokimia	0.8 – 1.2	50.3287
					1.2 – 1.8	33.5524
					4.5 – 6.7	8.9873
					6 - 6.7	7.9258
8	PPRASSC 18 meter	1385	Cassegrain. Alt-Azimuth	Matahari	0.1 - 10	13.8418
9	Shenshan 25 meter	5	Cassegrain. Alt-Azimuth	Edukasi	1.62 – 1.68	30.5022
					2.15 – 2.35	22.3683
					4.7 - 5.1	10.2711
					8.2 – 9	5.8522
					22.1 - 22.6	2.2518
10	Simeiz 22 meter	100	Cassegrain. Alt-Azimuth	AGN. Pembentukan planet. aktivitas Matahari. Astrokimia	1.6	35.7448
					4.8	11.9149
					22	2.5996
					85	0.6728
					6	0.6650
					115	0.4973
11	VERA 20 meter	5 (Iriki)	Cassegrain. Alt-Azimuth	Galaksi. Kehidupan luar surya. Pulsar	22	2.8596
		56 (Mizusawa)				
		14 (Ishigakijima)			43	1.4630
		142 (Ogasawara)				



Gambar 1. Distribusi lokasi teleskop radio *single-dish* seluruh dunia diameter sekitar 20 meter.

Informasi fokus penelitian yang diperoleh dikelompokkan menjadi 12 bidang yaitu : Kosmologi, Galaksi dan AGN, Sumber Kosmik Energi Tinggi & Sumber Transien, Deep Survey Ekstragalaksi, Magnet Kosmik, ISM, Pembentukan Bintang, Astrokimia, Pembentukan Planet, Evolusi Bintang, Matahari, dan Tata Surya & Luar Surya. Rencana penelitian di Obnas Timau sendiri memiliki irisan bidang fokus penelitian dengan teleskop Nanshan 25 meter, China dan Onsala 20 meter, Swedia.



Gambar 2. Grafik hubungan frekuensi dengan resolusi sudut.

Dengan memanfaatkan persamaan (1) dan persamaan (2) serta informasi rentang frekuensi pada tabel 1, dapat dihitung perkiraan resolusi sudut masing-masing teleskop. Gambar 2 menunjukkan hubungan frekuensi dengan resolusi sudut. Terlihat bahwa semakin besar frekuensi yang digunakan, semakin kecil resolusi sudut yang dihasilkan seperti yang ditunjukkan oleh persamaan (1) dan persamaan (2). Hubungan antara resolusi sudut sebanding dengan panjang gelombang dan berbanding terbalik dengan diameter dan frekuensi. Sehingga jika frekuensi yang digunakan semakin besar maka resolusi sudut yang diperoleh semakin kecil. Sayangnya perhitungan ini hanyalah perhitungan kasar yang memungkinkan untuk menimbulkan eror diantaranya karena faktor konversi satuan dan detail

rentang frekuensi yang digunakan masing-masing teleskop. Meskipun demikian, hasil tersebut dapat memberi gambaran nilai resolusi sudut yang dapat dicapai dari masing-masing teleskop yang dikaji.

4 KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan informasi data dan tinjauan karakteristik teleskop radio yang dikumpulkan, diperoleh informasi sebagai berikut:

1. Teleskop radio mayoritas berada di belahan Bumi Utara baik *array* maupun *single-dish*. Teleskop radio diameter sekitar 20 meter tidak ditemukan berada disekitar ekuator.
2. Teleskop radio *single-dish* diameter sekitar 20 meter mayoritas berada di ketinggian di bawah 200 mdpl dengan tipikal reflektor *cassegrain* dan mayoritas *mounting alt-azimuth*
3. Hasil perhitungan resolusi pada masing-masing teleskop menunjukkan kesesuaian dengan persamaan (2), jika frekuensi yang digunakan oleh teleskop semakin besar, maka resolusi sudut yang diperoleh semakin kecil.

Banyak sekali topik penelitian yang dapat dilakukan dengan teleskop radio kelas 20 meter (Table 1). Rencana topik penelitian di Obnas Timau sendiri memiliki irisan fokus penelitian dengan teleskop Onsala 20-m di Swedia dan teleskop Nanshan 25-m di Shanghai yaitu pada fokus penelitian Galaksi dan AGN, Interstellar Medium (ISM) dan pembentukan bintang. Namun, masih terbuka topik penelitian lain yang dapat dilakukan dengan teleskop tersebut nantinya. Pembangunan teleskop radio di Obnas Timau sangat ideal untuk dilaksanakan, mengingat di bagian ekuator hanya sedikit teleskop radio yang tersedia. Diharapkan nantinya juga bisa digunakan tidak hanya untuk *single-dish* tetapi juga digunakan untuk VLBI.

5 PUSTAKA

- C. J., Salter. 2002, *Single-dish Radio Telescope of The World*, ASP Conference Proceedings, Vol. 278
- Hunter, T. R., & Napier, P. J. 2016, *Antennas and Receivers in Radio Interferometry*, arXiv: 1609.09376 [astro-ph.IM] <<http://arxiv.org/abs/1609.09376>>
- Mumpuni, dkk. 2017, Selayang Pandang Observatorium Nasional Timau, PT Gramedia, Jakarta (ISBN. 978-602-424-732-4)
- Hidayat, T., dkk. 2012, Clear sky fraction above indonesia: an analysis for astronomical site selection. *Monthly Not Royal Astron Soc*, 427:1903
- Wilson, T. L. 1997, *Tools of radio astronomy*. In *Choice Reviews Online* (Vol. 35, Issue 04). <<https://doi.org/10.5860/choice.35-2078>>

Profil Cuaca Situs Stasiun Bumi Jatiluhur untuk Persiapan Teleskop Radio VLBI Indonesia

S. Ramadhan^{1,2*}, T. Hidayat^{1,2}, I. Nurul Huda^{1,2}, P. W. Premadi^{1,2}, B. Dermawan^{1,2}, L. Puspitarini^{1,2}, A. T. Jaelani^{1,2}, K. Vierdayanti^{1,2}, M. Irfan^{1,2}, M. Yusuf^{1,2}, M. Hafieduddin^{1,2}, H. R. T. Wulandari^{1,2}, Z. L. Dupe³, dan C. Kunjaya^{1,2}

¹Kelompok Keahlian Astronomi, FMIPA ITB, Jl. Ganesha 10 Bandung, Indonesia

²Observatorium Bosscha, FMIPA ITB, Lembang, Indonesia

³Kelompok Keahlian Sains Atmosfer, FITB ITB, Jl. Ganesha 10 Bandung, Indonesia

*E-mail: ramadhan.sahlan@gmail.com

ABSTRAK

Stasiun Bumi Jatiluhur milik PT Indosat Ooredoo mempunyai beberapa antenna berdiameter cukup besar yang sudah tidak digunakan lagi sebagai antenna telekomunikasi. Melalui kerja sama ITB dengan Indosat, dua antenna ini diusulkan untuk dikonversi menjadi teleskop radio untuk program VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) di Indonesia, untuk aplikasi astronomi dan geodesi. Berbeda dengan fungsinya dahulu sebagai pengendali satelit yang cenderung tidak bergerak (statis), antenna yang berfungsi sebagai teleskop radio akan selalu bergerak ketika sedang melakukan *tracking* objek langit. Berbagai studi persiapan tengah dilakukan yang salah satunya adalah pengamatan cuaca di lokasi tersebut. Oleh karena daerah Jatiluhur memiliki medan yang berbukit, keberadaan angin menjadi hal yang penting untuk diperhatikan karena antenna tersebut memiliki struktur yang cukup besar dan berat. Sejak September 2019 yang lalu telah dipasang sebuah stasiun cuaca otomatis atau AWS (*Automatic Weather Station*) untuk memperoleh data dasar cuaca seperti temperatur, tekanan udara, curah hujan, arah dan kecepatan angin, dan sebagainya. Instrumen tersebut dihubungkan pada komputer mini Raspberry Pi 3 agar dapat menyimpan database cuaca secara kontinu. Hasil pengamatan selama kurang lebih setahun dipaparkan dalam makalah ini. Studi pemantauan cuaca ini masih terus dilanjutkan untuk mendapatkan profil cuaca yang lebih lengkap guna mendukung beroperasinya teleskop radio VLBI Indonesia di masa datang.

Kata Kunci: cuaca – stasiun – VLBI

1 PENDAHULUAN

Program konversi antenna telekomunikasi yang sudah tidak terpakai menjadi teleskop radio telah dan sedang dilakukan di beberapa negara seperti di Jepang, Australia, Inggris, Yunani, Ghana, Meksiko, dan masih banyak lagi. Indonesia, melalui kerjasama antara ITB dengan PT Indosat Ooredoo, tengah memulai langkah serupa untuk membangun stasiun VLBI (*Very-Long Baseline Interferometry*) di Jatiluhur, Purwarkarta, Jawa Barat (Hidayat et al. 2021).

Setidaknya terdapat dua antenna yang akan dikonversi untuk menjadi teleskop radio, yaitu antenna JAH-2A berdiameter 32-m yang diproyeksikan untuk aplikasi astronomi dan JAH-5A berdiameter 18-m yang diproyeksikan untuk aplikasi geodesi. Kedua antenna besar ini dahulu digunakan sebagai pengendali satelit.

Untuk merealisasikan program ini, sejumlah studi persiapan telah dan sedang dilakukan, salah satunya adalah pemantauan kondisi cuaca lokal dengan menggunakan AWS. Hal ini menjadi penting, mengingat pengamatan astronomi, apapun panjang gelombangnya, akan sangat dipengaruhi oleh kondisi atmosfer setempat. Khususnya, pola

keberadaan angin akan menjadi hal yang sangat berpengaruh terhadap kinerja teleskop radio berdiameter besar, karena struktur antenna yang besar dan berat.

Oleh karena itu, pola angin dan cuaca secara umum sangat penting untuk diketahui dan dipantau secara berkelanjutan. Makalah ini memaparkan studi pendahuluan profil cuaca di Stasiun Bumi Indosat Jatiluhur dari data yang telah didapatkan selama sekitar satu tahun. Data yang telah dibatasi pada enam parameter dasar, yaitu: temperatur, tekanan udara, kelembaban, presipitasi, titik embun, dan profil angin.

2 LANDASAN TEORI

Pemantauan cuaca secara kontinu pada suatu observatorium merupakan suatu hal yang lazim dilakukan di berbagai tempat, khususnya observatorium radio. Salah satunya, observatorium radio di Green Bank, West Virginia, Amerika Serikat telah membuat beberapa catatan penting terkait pengaruh cuaca dan atmosfer pada pengamatan astronomi radio (Maddalena & Morgan, 2011). Perlu dicatat bahwa pengukuran oleh AWS memberikan parameter data secara langsung, oleh sensor atau divais yang dimiliki, yaitu besaran misalnya temperatur, tekanan udara, curah hujan,

kecepatan dan arah angin, dan sebagainya. Selanjutnya, dari parameter tersebut dapat diperoleh beberapa besaran turunan yang penting bagi astronomi radio. Berikut ini dibahas beberapa parameter tersebut.

2.1 Angin dan temperatur udara

Kecepatan angin, diukur pada tiga nilai: kecepatan angin rata-rata di permukaan, di ketinggian 75-m, dan 'gust' atau tiupan angin secara mendadak, bersamaan dengan temperatur, dicatat dan dilaporkan sebagai fungsi waktu sehingga pengamat dapat menghindari waktu-waktu yang kurang baik untuk melakukan pengamatan. Misalnya, cuaca terlalu dingin atau terlalu berangin sehingga dapat membahayakan instrumen.

2.2 Opasitas

Opasitas merupakan besaran turunan yang diintegrasikan, yang dipengaruhi oleh kerapatan udara pada setiap lapisan atmosfer. Semakin banyak uap air atau awan yang terbentuk, maka semakin tinggi nilai opasitasnya, yang nantinya akan mempengaruhi hasil pengamatan.

2.3 Temperatur Sistem

Jika opasitas telah diperhitungkan untuk setiap lapisan atmosfer, maka pengamat dapat menghitung melalui prosedur transfer radiatif untuk memperoleh temperatur sistem (T_{sys}). Besaran ini merupakan gabungan dari kontribusi atmosfer serta derau peralatan. Oleh karena itu, nilai T_{sys} secara langsung menentukan nilai derau pengamatan.

2.4 Refraksi

Selain hal-hal yang telah disebutkan di atas, pengamat juga perlu memperhitungkan nilai refraksi atau indeks bias. Nilai ini akan berbeda-beda bergantung lapisan atmosfer di atasnya. Hal ini menjadi penting karena ketika teleskop diarahkan ke suatu koordinat objek, ada kemungkinan arah tersebut tidak tepat pada posisi objek yang sesungguhnya dikarenakan sinyal dibelokkan akibat refraksi. Oleh karena itu, refraksi penting untuk koreksi arah teleskop.

3 METODOLOGI

Pengukuran dilakukan sejak September 2019 dengan menggunakan instrumen AWS Davis™ Vantage Vue yang dipasang pada salah satu menara antenna di area Stasiun Bumi Jatiluhur (lihat Gambar 1). Instrumen ini secara otomatis akan mengirimkan data cuaca ke perangkat *receiver* yang disimpan di dalam ruangan, yang selanjutnya dihubungkan



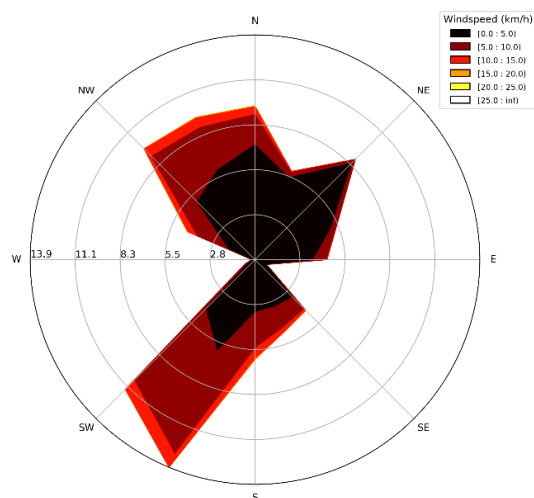
Gambar 1. AWS diletakkan pada salah satu menara antenna. Inset: AWS Davis™ Vantage Vue dan perangkat *receiver*-nya.

dengan komputer mini Raspberry Pi 3 agar dapat menyimpan hasil pengukuran cuaca secara kontinu, yang dipilih untuk setiap lima menit.

Terdapat gangguan teknis pada beberapa pekan pertama pengukuran sehingga data tidak berhasil terekam. Data baru tersimpan secara kontinu mulai Oktober 2019 hingga saat ini, tetapi hasil yang disajikan pada makalah ini hanya sampai September 2020 saja.

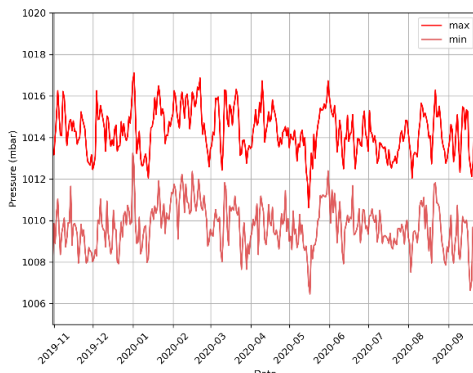
4 HASIL DAN ANALISIS

Sebagai analisis pendahuluan, hasil pengukuran disajikan dalam enam parameter cuaca: profil angin, tekanan udara, temperatur, kelembaban, presipitasi, dan titik embun.

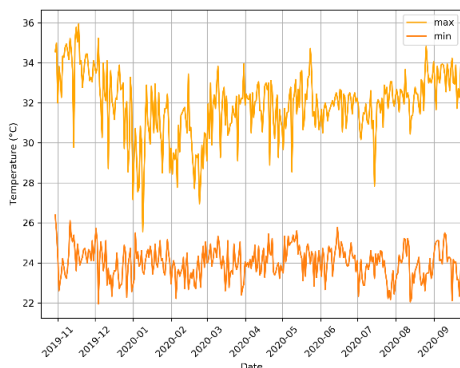


Gambar 2. Diagram *wind-rose* yang menggambarkan profil kecepatan angin rata-rata pada arah tertentu. Perbedaan warna menandakan perbedaan kecepatan, sedangkan nilai yang tertulis pada sumbu radial menyatakan persentase banyaknya angin.

Profil angin ditunjukkan sebagai diagram mawar pada Gambar 2 yang merupakan profil rata-rata selama durasi pengukuran. Secara umum, angin banyak berembus dari arah selatan barat-daya (SSW), dengan kecepatan rata-rata dalam rentang antara 10 – 14 km/jam. Angin cukup dominan terjadi pada rentang bulan November hingga Maret, yang berarti pada musim hujan. Kecepatan angin maksimum yang terukur adalah sebesar 33,33 km/jam (31 Desember 2019, 08:35:00 UT). Menurut manual antenna JAH-2A (Comsat 1996), kecepatan angin maksimum untuk *tracking* antenna adalah 130 km/jam, dan kecepatan maksimum untuk survive antenna dalam posisi parkir (*stow*) adalah 190 km/jam. Oleh karena itu, dengan profil angin yang telah diperoleh ini, pengoperasian antenna 32 m dan 18,5 m cukup terjamin karena kecepatan angin maksimum yang tercatat hanya sekitar 34 km/jam, jauh di bawah limit kecepatan pengamanan antenna.



Gambar 3. Variasi tekanan udara harian (dalam milibar), ditunjukkan dalam nilai maksimum (merah) dan minimum (merah muda).

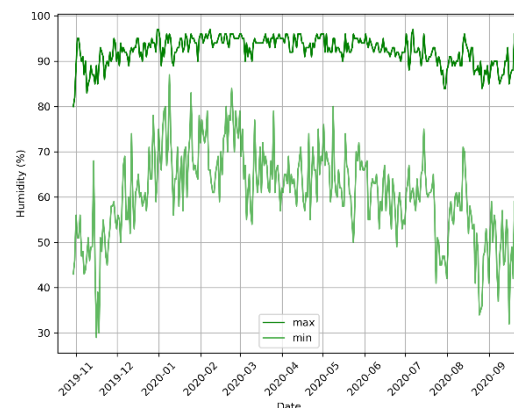


Gambar 4. Variasi nilai temperatur harian (dalam °C), ditunjukkan dalam nilai maksimum (kuning) dan minimum (jingga).

Besaran tekanan udara, temperatur, kelembaban, dan titik embun ditunjukkan masing-masing pada Gambar 3, 4, 5, dan 6. Semua parameter ini terkait dengan lokasi Jatiluhur yang terletak pada

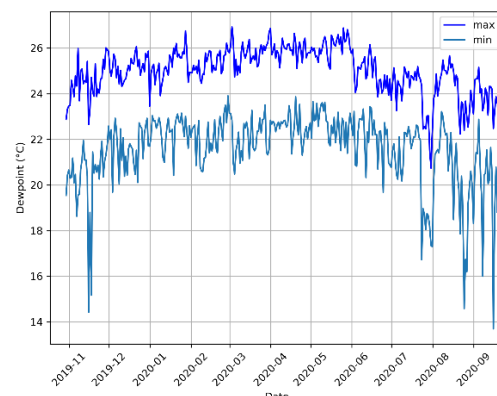
ketinggian 140 mdpl, dengan variasi tekanan udara antara 1010 – 1015 mbar, dan hanya berjarak sekitar 42 km dari pantai utara Jawa, dan di dekatnya terdapat danau dari Bendungan Jatiluhur (2,5 km).

Profil iklim tropis terlihat dengan jelas dan hal ini sangat penting diketahui untuk perawatan dan operasi teleskop. Temperatur harian bervariasi antara 24 hingga ~32 °C, sehingga terdapat variasi sebesar 8 °C, yang relatif stabil. Temperatur terpanas terjadi di musim hujan, mencapai 34 °C. Kestabilan nilai tekanan udara dan temperatur tampak terlihat dari Gambar 3 dan 4.



Gambar 5. Variasi nilai kelembaban harian (dalam %), ditunjukkan dalam nilai maksimum (hijau) dan minimum (hijau muda).

Nilai kelembaban relatif (dalam %) sangat penting diketahui, mengingat peralatan pendukung teleskop radio merupakan peralatan elektronik sensitif, yang harus disimpan dalam ruangan yang terjaga dengan nilai kelembaban yang rendah dan temperatur yang stabil. Kelembaban yang tinggi merupakan kondisi khas iklim tropis yang tidak terhindarkan. Dari Gambar 5, secara rerata, variasi nilai kelembaban harian di musim kemarau berkisar

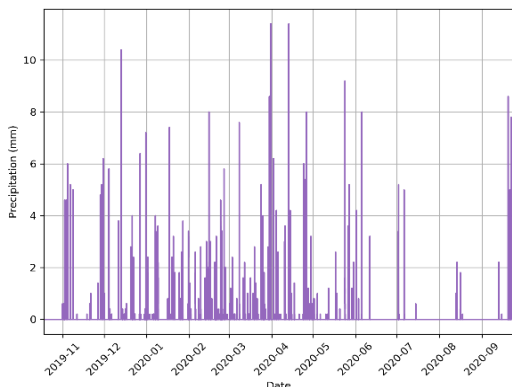


Gambar 6. Variasi nilai titik embun harian (dalam °C), ditunjukkan dalam nilai maksimum (biru) dan minimum (biru tua).

sekitar 30% dan membesar di musim hujan sampai sekitar 50%, dengan nilai akurasi sekitar 15%.

Variasi harian nilai titik embun (dalam °C) ditunjukkan pada Gambar 6 merentang antara 21 hingga 25 °C. Nilai ini, bersama dengan nilai kelembaban relatif, dapat dikonversi menjadi besaran *pwv* (*precipitable water vapor*) yang berguna untuk menentukan kandungan uap air terintegrasi (Hidayat et al. 2010). Selanjutnya, nilai tersebut dapat digunakan untuk menentukan nilai opasitas untuk menentukan transmitansi ataupun serapan atmosfer, maupun untuk kalibrasi sinyal. Perlu pula dicatat bahwa teleskop radio yang diusulkan akan bekerja pada frekuensi kurang dari 25 GHz, sehingga relatif tidak rentan terhadap variasi perubahan kandungan uap air.

Selanjutnya, Gambar 7 memberikan pola perubahan musim di Jatiluhur, antara musim hujan (dengan presipitasi sekitar 12 mm) dan musim kemarau. Musim hujan dapat dikatakan berlangsung antara bulan Oktober sampai dengan April, dan dilanjutkan dengan musim kemarau antara Mei sampai dengan akhir September, dengan Juli – Agustus nyaris tanpa hujan. Pola ini sangat khas daerah tropis, tidak berbeda dengan umumnya daerah lain di Indonesia. Dari data ini, Jatiluhur juga dapat dikatakan sebagai daerah yang relatif kering.



Gambar 7. Pola presipitasi harian (dalam mm) di Jatiluhur.

5 PENUTUP

Berdasarkan data cuaca yang terukur selama hampir setahun, terlihat bahwa Stasiun Bumi Jatiluhur memiliki profil cuaca yang relatif stabil. Kecepatan angin yang menjadi *concern* utama karena antenanya cukup besar, didapati hasil yang tidak mengkhawatirkan untuk keamanan beroperasinya teleskop. Hasil pengukuran awal ini dapat menjadi salah satu pertimbangan untuk mempersiapkan fasilitas pendukung untuk keperluan stasiun VLBI, sambil melanjutkan pengukuran dalam jangka waktu yang lebih panjang.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih secara khusus kepada Indosat Ooredoo yang mendukung keberlangsungan proyek ini. Penulis juga menyampaikan terimakasih kepada M. F. Nashiruddin dan Agus T. P. Jatmiko atas diskusinya yang bermanfaat.

6 PUSTAKA

- Anonim, 2009, *User's Guide to WeeWX* <<http://www.weewx.com/docs/usersguide.htm>>
- Anonim. Vantage Vue® Console Manual
- Comsat RSI, 1996, *Earth Station Monitor and Control System, Operation and Maintenance Manual*, Jatiluhur
- Hidayat, T., Mahasena, P, dan Dermawan, B., 2010, *Search for New Astronomical Site in Indonesia: I. Global Atmospheric Parameters*, *Jurnal Matematika dan Sains*, 15, P. 16-22
- Hidayat, T., Nurul Huda, I., Ramadhan, S., Premadi, P. W., Dermawan, B., Puspitarini, L., Jaelani, A. T., Vierdayanti, K., Irfan, M., Yusuf, M., Hafieduddin, M., Wulandari, H. R. T., dan Kunjaya, C., 2021, dalam *Proceedings* ini.
- Maddalena, R. J. dan Morgan, L., 2011, *High Frequency Weather Forecasts* <<https://www.gb.nrao.edu/~rmaddale/Weather/index.html>>

Motorisasi Sistem Buka - Tutup Atap Gedung Surya Di Observatorium Bosscha

A. Setiawan* dan D. Mandey**

¹Observatorium Bosscha FMIPA ITB, Bandung, Indonesia

*E-mail : agus@as.itb.ac.id

**E-mail : mandey.de@as.itb.ac.id

ABSTRAK

Sistem teleskop robotik merupakan sistem yang kompleks dimana salah satu komponen pendukungnya adalah atap bangunan teleskop yang proses buka – tutupnya dapat dikendalikan jarak jauh atau dikendalikan secara otomatis dengan input informasi cuaca. Dalam paper ini, kami akan memaparkan rancangan mekanik sistem motorisasi atap sebelum digunakan secara otomatis dalam sistem teleskop robotik. Komponen atap yang kami gunakan adalah atap geser (*sliding roof*). Motor penggerak berupa motor listrik dengan kekuatan 1.5 hp kecepatan putar 1390 rpm. Sistem penggerak manual tetap dipertahankan untuk keperluan perawatan dan antisipasi kondisi tanpa adanya aliran listrik.

Kata Kunci: teleskop robotik – motorisasi – atap geser

1 PENDAHULUAN

Gedung Surya adalah salah satu bangunan teleskop yang ada di Observatorium Bosscha. Mekanisme proses buka – tutup atapnya masih manual oleh tangan. Sistem teleskop robotik memerlukan sarana pendukung diantaranya atap bangunan teleskop yang dapat digeser oleh *controller*. Pengembangan sistem teleskop robotik di Gedung Surya dimulai dengan tahap awal yakni memodifikasi mekanik penggeser atap dari sistem manual ke sistem berpenggerak motor.

Karya tulis ini dimulai dengan mengungkapkan latar belakang pentingnya sistem motorisasi atap bangunan teleskop. Bagian kedua adalah tulisan yang menjelaskan detail mekanik rancangan alat dan dilanjutkan dengan perhitungan aspek teknis. Bagian keempat menceritakan hasil dari kegiatan rancangan.

2 RANCANGAN ALAT

Mekanik manual untuk proses buka – tutup atap Gedung Surya tetap dipertahankan dalam rancangan pengembangan alat ini. Elemen utama pada sistem manual adalah *winch driving gear* yaitu alat untuk menarik benda berat dengan memanfaatkan tenaga tangan. Beberapa bagian *winch* dimodifikasi sehingga dapat dirakit menjadi satu sistem penggeser atap bertenaga motor.

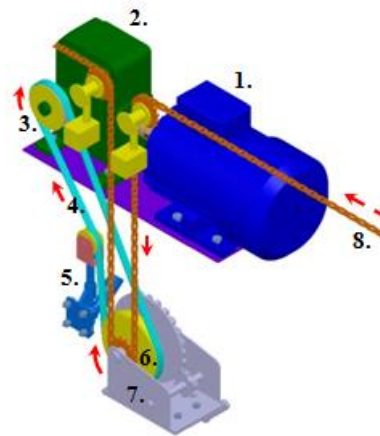
Dalam rancangan disediakan dua pilihan menggeser atap bangunan yaitu manual atau penggunaan motor, hal ini dilakukan dengan cara mengatur posisi tangkai *toggle clamp*. Tangkai *toggle clamp* ditarik agar *v-belt* kendur untuk beralih dari penggunaan motor ke manual. Kondisi ini menyebabkan *handle* dapat diputar tangan agar atap bergeser.

Penjelasan detail rancangan sistem motorisasi atap disajikan pada tulisan sub bagian :

2.1 Mekanisme penggunaan motor

Gambar 1. memperlihatkan delapan elemen yang menyusun sistem penggerak atap. Setiap elemennya memiliki fungsi tertentu :

1. *Motor listrik* : sumber penggerak.
2. *Gear box* : pengurang beban putar.
3. *Pulley-a* : dipasang di poros output gear box.
4. *V-belt* : penghubung pulley-a dan pulley-b.
5. *Toggle clamp* : pengatur regangan v-belt.
6. *Pulley-b* : dipasang di poros sprocket.
7. *Winch* : Dudukan poros sprocket, pulley-b, roda gigi kerekan, manual handle.
8. *Rantai* : kedua ujungnya diikatkan ke dudukan atap.



Gambar 1. Rancangan sistem motorisasi atap.

Proses buka – tutup atap dimulai dari tenaga motor listrik yang porosnya dihubungkan ke *gear box*. *Pulley-a* dipasang di poros output *gear box* berputar dengan nilai kecepatan lebih rendah dari putaran motor. Putaran *pulley-a* diteruskan oleh *v-*

belt ke *pulley-b* dan memutar poros *sprocket* di *winch*. Peristiwa ini mengakibatkan rantai bergeser menarik dudukan atap bangunan teleskop.

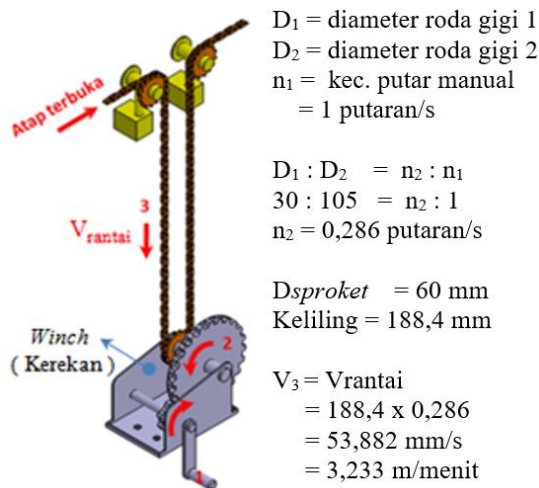
2.2 Mekanisme manual

Terdapat dua poros roda gigi di *winch*. Satu poros dihubungkan ke *manual handle*. Poros kedua dimodifikasi menjadi dudukan *pulley-b* dan *sprocket*.

Toggle clamp memiliki *roller* yang menekan *v-belt* sehingga putaran *pulley-a* diteruskan ke *pulley-b*. Tangkai *toggle clamp* dapat ditarik agar *roller* terlepas dari *v-belt*. Kondisi ini menyebabkan *v-belt* kendur dan tangan mudah memutar *handle* untuk menggeser atap.

3 PERHITUNGAN ASPEK TEKNIS

Kecepatan rantai menarik atap geser tergantung nilai putaran motor listrik, rasio roda gigi di *gear box*, diameter *pulley* dan *sprocket*. Sistem penggerak manual menjadi rujukan untuk mengetahui kecepatan atap geser. Gambar 2. mengilustrasikan perhitungan kecepatan atap geser dengan kerekan manual.



Gambar 2. Perhitungan kerekan manual.

Di bawah ini adalah hasil perhitungan kecepatan atap geser berdasarkan spesifikasi teoretis elemen yang digunakan.

- Putaran motor = 1390 rpm
Gear box ratio = 1:50
- Pulley atas ($D_a = 3\frac{1}{2}$ inch)
 $n_{pulley-a} = 1390 : 50 = 27,8$ rpm
- Pulley bawah ($D_b = 5\frac{1}{2}$ inch)
 $n_{pulley-b} : n_{pulley-a} = D_a : D_b$
 $n_{pulley-b} = (D_a : D_b) \times n_{pulley-a}$
 $= (3\frac{1}{2} : 5\frac{1}{2}) \times 27,8$
 $= 17,69$ rpm = 0,294 putaran/s
- Vrantai = $188,4 \times 0,294$
 $= 55,389$ mm/s = 3,323 m/menit

4 PENUTUP

Sistem motorisasi atap Gedung Surya saat ini sudah terpasang dan berfungsi dengan baik. Waktu yang diperlukan untuk membuka atau menutup atap sepanjang 5 meter sekitar 1 menit 17 detik. Sistem motorisasi ini terintegrasi dengan sistem kendali utama teleskop robotik (*Bosscha Robotic Telescope / BRT*).

Selama waktu pengamatan, atap dapat dibuka atau ditutup secara otomatis berdasarkan input dari sensor cuaca. Motorisasi sistem buka – tutup atap ini kedepannya dapat diterapkan pada gedung – gedung teleskop lain di Observatorium Bosscha.

Ucapan Terima Kasih

Penulis bersyukur kepada Allah SWT termasuk bagian dari tim solid pengembangan instrumentasi ini. Kami menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang terlibat langsung maupun tidak langsung dalam kegiatan ini.

5 PUSTAKA

Sularso & Suga, K. 1997, Dasar – dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin, Pradnya Paramita, Jakarta

Analisis Teleskop *DIY* - PPKM sebagai media Praktikum di Laboratorium Bumi dan Antariksa

C. P. Asmoro^{1*}, H. Susanti¹, dan J. A. Utama¹

¹Universitas Pendidikan Indonesia

*E-mail: cp.asmoro@upi.edu

ABSTRAK

Penelitian ini memaparkan proses perancangan, pembuatan dan performa teleskop Do It Yourself (*DIY*) untuk media praktikum di Laboratorium Bumi dan Antariksa Departemen Pendidikan Fisika. Praktikum yang dilakukan memberikan pengetahuan terkait prinsip kerja, pemasangan, dan observasi, akan tetapi kondisi pandemik COVID19 yang menuntut pembelajaran dan praktikum secara daring menjadikan proses tersebut tidak bisa dilakukan secara *Hands On*. Tujuannya adalah menghasilkan Teleskop *DIY* yang dapat digunakan untuk mengamati benda langit. Metode yang digunakan adalah metode *Research dan Development*, keperluan teleskop dianalisa sehingga memunculkan ide untuk membuat sendiri. Teleskop didesain dengan mengutamakan tingkat keakurasian, kemudahan, dan keekonomisan. Hasil penelitian menunjukan Teleskop *DIY* berhasil dibuat dengan cukup baik, uji coba terbatas pengambilan data dengan metoda Astrofotografi di dapatkan citra Bulan dengan demikian teleskop *DIY* sudah dapat digunakan pada praktikum di Laboratorium Bumi dan Antariksa.

Kata Kunci: *Teleskop – Praktikum – DIY*

1 PENDAHULUAN

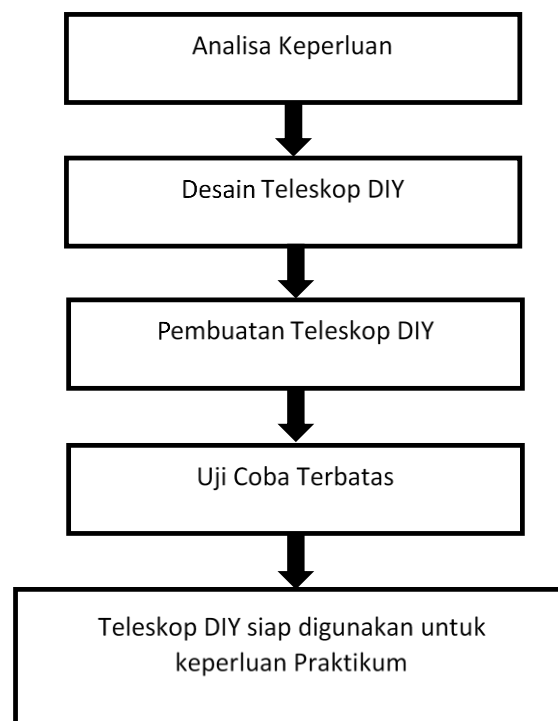
Teleskop merupakan Alat Praktikum di Laboratorium Bumi dan Antariksa terutama pada matakuliah yang berkaitan dengan Astronomi seperti Konsep Dasar Bumi Antariksa, Astronomi Posisi, dan Astrofisika, para mahasiswa biasanya menggunakan langsung Teleskop untuk pengamatan benda langit. Praktikum yang dilakukan memberikan pengetahuan terkait prinsip kerja, merakit dan penggunaannya, akan tetapi kondisi pandemik Covid-19 yang menuntut pembelajaran dan praktikum secara daring menjadikan proses tersebut tidak bisa dilakukan secara *Hands On* (Wolf & McQuitty, 2011).

Penelitian ini akan memaparkan proses perancangan, pembuatan dan performa Teleskop Do It Yourself (*DIY*) (Sarpong & Rawal, 2020) dengan melakukan rekonstruksi kembali Galileoscope (Arion & Tresch Fienberg, 2015; Mishra & Ramesh, 2014) agar dapat membuat teleskop sederhana pada skala rumahan. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui bagaimana Teleskop Refraktor *DIY* dapat memenuhi kegiatan Praktikum Teleskop di Laboratorium Bumi dan Antariksa. Metode penelitian yang digunakan yaitu metode eksperimen Teleskop Refraktor *DIY* berbantu panduan praktikum dengan instrumen yang digunakan berupa angket.

2 METODE PENELITIAN

Metode yang digunakan adalah metoda eksperimen dan angket. Metode yang digunakan adalah metoda eksperimen dan angket. Tahap-tahap

yang dilakukan adalah sebagai berikut yaitu pertama dilakukan analisa keperluan, kemudian melakukan desain teleskop. Dilanjutkan dengan pembuatan teleskop dan melakukan uji coba terbatas.



Gambar 1. Alur Penelitian.

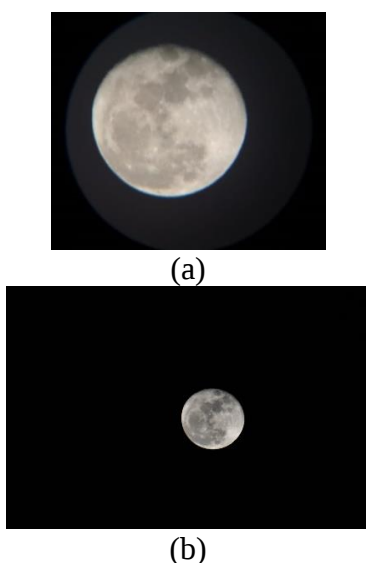
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Teleskop *DIY* yang telah dibuat ternyata dapat digunakan dengan baik oleh para relawan mahasiswa, terlihat bagaimana mereka bisa merakit dan melakukan observasi. Selain itu para mahasiswa



Gambar 2. Uji Coba Teleskop DIY.

pun ditantang untuk dapat melakukan Teknik fotografi objek langit menggunakan teleskop yang dikenal sebagai Teknik Astrofotografi (Asmoro et al., 2018), ada 2 teknik yang biasa digunakan yaitu *Afocal* dan *PrimeFocus*. *Afocal* adalah dengan cara meletakkan lensa kamera anda pada bidang eyepiece / lensa okuler teleskop kemudian mengambil gambar dan *PrimeFocus* adalah dengan cara menggunakan teleskop tanpa lensa okuler (Eyepiece) yang dihubungkan langsung melalui sebuah adaptor ke badan kamera (Asmoro et al., 2016). Pada gambar 8 merupakan hasil citra objek langit yang diperoleh mahasiswa menggunakan teknik astrofotografi.



Gambar 3. Teknik Astrofotografi (a) *Afocal* dan (b) *Prime Focus*.

4 PENUTUP

Teleskop DIY (*Do It Yourself*) PPKM (Pasang-Putar-Kendalikan-Mengamati) yang dibuat sudah berhasil dilakukan dengan baik. Keberhasilan

tersebut terlihat dari hasil uji coba dengan teknik astrofotografi didapatkan citra Bulan dan Matahari yang cukup bagus dan hasil validasi dari pengguna. Sehingga Teleskop *DIY* – PPKM ini sudah bisa digunakan sebagai media praktikum pada mata kuliah yang berkaitan dengan Astronomi seperti Konsep Dasar Bumi Antariksa, Astronomi Posisi, dan Astrofisika di Laboratorium Bumi dan Antariksa Departemen Pendidikan Fisika Universitas Pendidikan Indonesia.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan Terima Kasih kepada Rektor dan LPPM Universitas Pendidikan Indonesia yang telah Dana Rencana Kerja dan Anggaran Tahunan Penugasan Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat Universitas Pendidikan Indonesia Tahun Anggaran 2021, dengan Surat Keputusan Rektor Nomor: Nomor: 835/UN40/PT.01.02/2021.

5 PUSTAKA

- Wolf, M., & McQuitty, S. (2011). Understanding the do-it-yourself consumer: DIY motivations and outcomes. *AMS review*, 1(3), 154-170.
- Sarpong, D., & Rawal, A. (2020). 23 From Open Labs to DiY Labs–Harnessing ‘the wisdom of crowds’ for Innovation. In *Innovating in the Open Lab* (pp. 263-274). De Gruyter Oldenbourg.
- Arion, D. N., & Tresch Fienberg, R. (2015, January). Galileoscope: From IYA 2009 to IYL 2015. In *American Astronomical Society Meeting Abstracts# 225* (Vol. 225, pp. 228-01).
- Mishra, L., & Ramesh, R. (2014). Galileo’s Astronomical Discoveries.
- Asmoro, C. P., Achmad, A. R., Wijaya, A. F. C., Ardi, N. D., & Budisulistiorini, S. H. (2018). The analysis of total solar eclipse pictures on August 21, 2017 at Wyoming, USA. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 288, No. 1, p. 012035). IOP Publishing.
- Asmoro, C. P., Wijaya, A. F. C., Ardi, N. D., Abdurrohman, A., Utama, J. A., Sutiadi, A., ... & Suyardi, B. (2016, November). The Assembled Solar Eclipse Package (ASEP) in Bangka Indonesia during the total solar eclipse on March 9, 2016. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 771, No. 1, p. 012020). IOP Publishing.

Sistem Panel Listrik Untuk Buka Tutup Atap Gedung Surya di Observatorium Bosscha

M. Sulaeman^{1*}

¹Observatorium Bosscha, FMIPA- ITB, Bandung, Indonesia

*E-mail: maman@as.itb.ac.id

ABSTRAK

Untuk menunjang kegiatan astronomi di Observatorium Bosscha diperlukan suatu sistem buka tutup atap gedung yang dapat dikontrol secara otomatis, dalam hal ini untuk atap gedung surya masih dilakukan secara manual, sehingga untuk proses buka tutup atap akan memakan banyak waktu. Untuk itu perlu di buat suatu sistem rangkaian kelistrikan yang dapat mengontrol motor Tiga fase secara bolak-balik, dalam hal ini menggunakan rangkaian forward reverse, terdiri dari panel listrik, TOR (Thermal Overload Relay), kontaktor, MCB 3 Phasa, lampu indikator, limit switch, kabel listrik, kabel marker dan push button. Metode yang digunakan dalam pembuatan makalah ini dengan melakukan pengumpulan data, desain yang terdiri dari gambar rancangan, pemilihan jenis bahan dan alat pendukung untuk pembuatan panel listrik tersebut. Setelah panel listrik direalisasikan, kemudian dilakukan pengujian keakuratan rangkaian bolak balik untuk motor 3 fase dan hasilnya tiap komponen berfungsi dengan baik, terutama pada limit switch untuk buka dan tutup atap berfungsi normal.

Kata Kunci: Panel – 3 Fase – Bolak-balik

1 PENDAHULUAN

Untuk menunjang kegiatan astronomi di Observatorium Bosscha diperlukan suatu sistem buka tutup atap gedung yang dapat dikontrol secara otomatis, dalam hal ini untuk atap gedung surya masih dilakukan secara manual, sehingga untuk proses buka tutup atap akan memakan banyak waktu.

Untuk itu perlu di buat suatu sistem rangkaian kelistrikan yang dapat mengontrol motor Tiga fase secara bolak-balik, dalam hal ini menggunakan rangkaian forward reverse, terdiri dari panel listrik, TOR (Thermal Overload Relay), kontaktor, MCB 3 Phasa, lampu indikator, limit switch, kabel listrik, kabel marker dan push button.

2 PERANCANGAN DAN PEMBUATAN

Metode yang digunakan dalam pembuatan makalah ini dengan melakukan pengumpulan data, desain yang terdiri dari gambar rancangan, pemilihan jenis bahan dan alat pendukung untuk pembuatan panel listrik tersebut. Setelah panel listrik direalisasikan, kemudian dilakukan pengujian keakuratan rangkaian bolak balik untuk motor 3 fase dan hasilnya tiap komponen berfungsi dengan baik, terutama pada limit switch untuk buka dan tutup atap berfungsi normal.

2.1 Prinsip Kerja

Untuk gambar rangkaian pengawatan daya 3 fase di pisah dari gambar rangkaian kontrol, seperti terlihat pada gambar 1, dengan prinsip kerja pada

rangkaian *forward reverse* yaitu ketika tombol *push button* NO (*Normally Open*) atau tombol pada kontaktor 1 ditekan maka akan berubah menjadi NC (*Normally Closed*), maka arus akan mengalir ke *coil relay* kontaktor 1 (A1 dan A2) maka kontaktor 1 akan menutup sehingga arus mengalir dari MCB 3 fase menuju kontaktor 1 diteruskan ke TOR (*Thermal Overload Relay*), dari output TOR langsung ke motor 3 fase sehingga motor berputar searah jarum jam, untuk membalikan putaran motor tekan terlebih dahulu pushbutton NC (*Normally Closed*) atau tombol *off*, setelah itu tekan pushbutton NO atau tombol *on* pada kontaktor 2, maka motor akan berputar berlawanan arah jarum jam.

2.2 Sistem Pengunci (*interlock*)

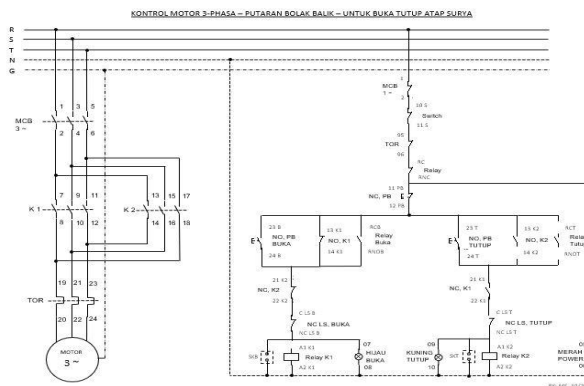
Dengan adanya sistem pengunci memungkinkan rangkaian tetap aman karena untuk memutar arah motor searah atau berlawanan jarum jam harus menekan *Pushbutton* NC atau tombol *off* dulu, hal ini karena keluaran dari NO kontaktor 1 yaitu nomor 13–14 langsung menuju kontaktor 2 NC yaitu nomor 21–22, begitupun sebaliknya untuk keluaran NO kontaktor 2 yaitu nomor 13–14 langsung masuk NC kontaktor 1 yaitu nomor 21–22, sehingga ketika kontaktor 1 bekerja maka kontaktor 2 akan tetap *off* walaupun di tekan *on* pada kontaktor 2 tersebut, karena kalau kita lihat pada rangkaian NO nomor 13–14 pada kontaktor 1 berubah menjadi NC, sedangkan NC pada kontaktor 1 yaitu nomor 21–22 berubah menjadi NO sehingga arus pada kontaktor 2 tidak akan mengalir, begitupun sebaliknya berlaku juga pada kontaktor 2.

2.3 Arduino dan Kabel Marker

Agar rangkaian terhubung ke-arduino maka untuk *Pushbutton on* (NO) yang ke NO (13-14) kontaktor 1 dan kontaktor 2 harus dihubungkan paralel pada *relay* NO arduino, sedangkan untuk *pushbutton off* (NC) harus dihubungkan seri ke *relay* NC Arduino.

Untuk memudahkan pengecekan atau suatu saat terjadi kerusakan pada panel maka diperlukan kabel *marker* pada setiap ujung kabel yang terhubung, ini untuk memudahkan penelusuran kabel, serta keterangan lengkap dari setiap kabel *marker* ditempel di samping panel atau dibagian yang mudah terlihat seperti pada gambar 2. Hal ini sesuai dengan PUIL 2000 (Persyaratan Umum Instalasi Listrik Indonesia tahun 2000).

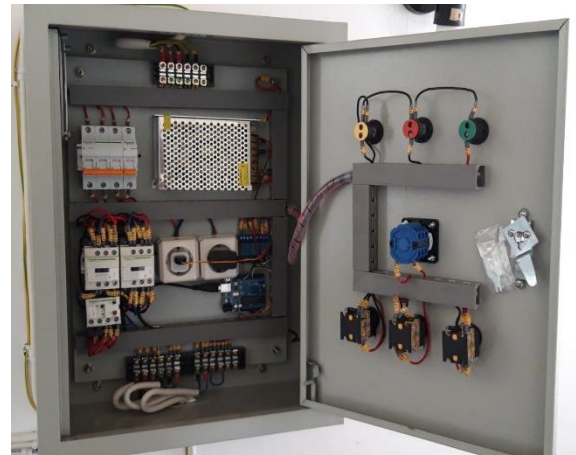
3 GAMBAR



Gambar 1. Rangkaian kontrol motor 3 fase bolak balik.



Gambar 2. Keterangan Kabel Marker



Gambar 3. Panel listrik beserta komponen peralatan pendukung.

4 KESIMPULAN

Setelah dilakukan percobaan semua komponen berfungsi dengan baik, untuk penempatan *limit switch* harus akurat agar proses buka tutup atap gedung surya bisa maksimal.

Kabel *marker* dan keterangan penting dibuat untuk memudahkan pengecekan jalur perkabelan.

Agar motor 3 fase aman perlu dibuat sistem pengunci pada rangkaian *forward reverse*.

Untuk memudahkan penglihatan pada panel listrik maka dipasang lampu indikator untuk *power*, *pushbutton on* dan *off*.

Ucapan Terima Kasih

Saya ucapkan terimakasih kepada Kepala Observatorium Bosscha FMIPA-ITB yaitu Dr. Premana W. Premadi dan terima kasih juga kepada semua teman-teman pegawai Observatorium Bosscha yang telah mendukung pembuatan panel listrik ini.

5 PUSTAKA

PUIL, Y. 2002, Persyaratan Umum Instalasi Listrik 2000 (PUIL 2000), Badan Standardisasi Nasional, Jakarta Square, D. 1993, *Wiring Diagram Book* <<https://www.daltco.com/sites/daltco.com/files/resource/schneider-wiring-diagram-book.pdf>>

Pengembangan Sistem Pemantauan Kondisi *Seeing* Langit Malam di Observatorium Bosscha

S. Ramadhan^{1,2,*}, M. Yusuf², dan C. J. B. Anin^{1,2}

¹Kelompok Keahlian Astronomi, FMIPA ITB, Jl. Ganesha 10 Bandung, Indonesia

²Observatorium Bosscha, FMIPA ITB, Lembang, Indonesia

*E-mail: ramadhan.sahlan@gmail.com

ABSTRAK

Pengamatan astronomi pada panjang gelombang visual akan banyak dipengaruhi oleh kondisi atmosfer berupa '*seeing*' yang berasal dari turbulensi udara yang bersifat lokal dan temporal. Sebuah observatorium, baik yang telah berdiri maupun yang akan dibangun, haruslah memiliki informasi terkait nilai *seeing* yang valid. Makalah ini memaparkan hasil awal terkait pengembangan sistem pengamatan *seeing* yang dilakukan di Observatorium Bosscha sebagai lokasi pengujian. Instrumen yang digunakan terdiri atas teleskop reflektor berdiameter 8 inch, Hartmann Mask, dan *software Seeing Monitor* dengan metode DIMM (*Differential Image Motion Monitor*). Kedepannya, sistem ini akan diujikan pada variasi metode dan instrumen yang berbeda. Luaran dari pengembangan ini adalah sistem otomasi pengamatan *seeing* yang dapat direproduksi di tempat lain.

Kata Kunci: pengukuran – *seeing* – DIMM

1 PENDAHULUAN

Seeing adalah perubahan kenampakan objek langit akibat adanya pengaruh atmosfer Bumi yang bersifat turbulen dan memiliki medium yang tidak homogen. Kedinamisan dan ketidakseragaman atmosfer ini akan mengakibatkan cahaya bintang yang sampai ke kita akan terlihat berkelap-kelip dan juga bergoyang-goyang. Efek ini akan semakin terlihat jelas jika pengamatan bintang dilakukan dengan menggunakan teleskop optik yang bekerja pada panjang gelombang visual. Sebuah observatorium yang aktif melakukan pengamatan astronomi harus memiliki informasi nilai *seeing* yang valid untuk menghasilkan data yang lebih berkualitas.

Secara umum, Observatorium Bosscha memiliki nilai *seeing* sekitar 1-2 detik busur (Yusuf dkk, 2014). Nilai ini nantinya akan dikonfirmasi melalui sistem pemantauan *seeing* yang dilakukan pada penelitian kali ini. Salah satu pengembangan yang dilakukan adalah memvariasikan instrumen dan metode yang digunakan untuk melihat apakah hasilnya konstan atau tidak. Setelah itu, akan dibuat sistem otomasi pengukuran *seeing* yang diharapkan dapat diadopsi oleh observatorium lainnya.

2 LANDASAN TEORI

Pemantauan *seeing* yang telah dilakukan pada makalah ini masih merupakan tahap awal. Ide dasar dari pekerjaan ini adalah merekam citra dengan menggunakan teleskop kecil dan *H-DIMM* (*Hartmann-Differential Image Motion Monitor*) *Mask*.

Proses penguraian citra dengan *mask*, yang biasanya menggunakan prisma, dapat dilakukan karena *depth-of-field* pada *sub-aperture* jauh lebih besar dibandingkan dengan *aperture* utama sistem optik induknya (teleskop tanpa *mask*) (Bally, dkk. 1996). Dengan nilai *aperture* berdiameter D , panjang gelombang λ , dan panjang fokus f , nilai *depth-of-field* dinyatakan dengan

$$2\Delta Z = \alpha \lambda (f/D)^2 \quad (1)$$

dengan $\alpha = 1,22$. Dengan demikian, jika CCD diletakkan pada jarak $< \Delta Z$ dari fokus terbaiknya, maka nilai PSF yang dihasilkan dapat terbedakan dengan jelas pada citra fokus yang dihasilkan oleh masing-masing *sub-aperture* tersebut. Citra yang dihasilkan oleh *sub-aperture* yang terpisah pada jarak d akan terpisah dengan jelas pada nilai

$$\Delta z > \alpha \lambda (f/d)^2 \quad (2)$$

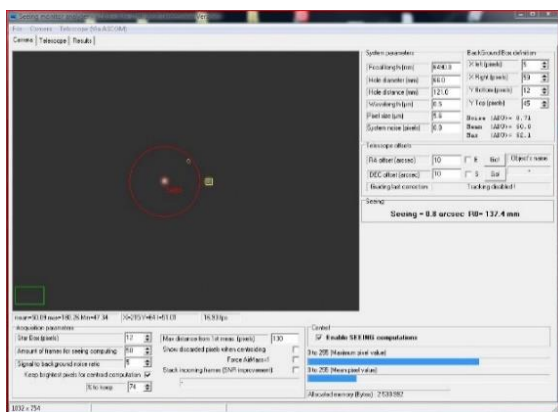
Artinya, detektor yang diletakkan pada jarak Z dari bidang fokus, dengan $\Delta z < Z < \Delta Z$ dan jarak antara masing-masing *sub-aperture* yang lebih besar dari d , akan menghasilkan citra dengan fokus terbaiknya.

3 METODOLOGI

Instrumen yang digunakan terdiri atas teleskop reflektor Vixen VMC200L berdiameter 8 inch dengan panjang fokus 1.950 mm dan *Hartmann Mask* hasil *3D-printing* dengan diameter lubang sebesar 6 cm dan jarak pisah antarlubang 14 cm seperti pada Gambar 1. *Software* yang digunakan adalah *Seeing Monitor Analyser* dengan metode *H-DIMM* (*Hartmann Differential Image Motion Monitor*) (Bally dkk, 1995) seperti pada Gambar 2.

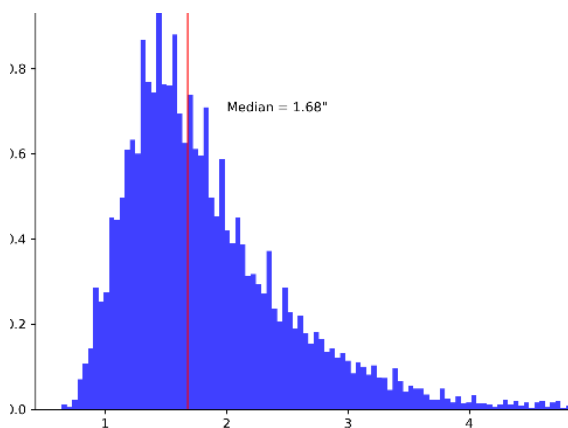


Gambar 1. Kiri: Teleskop reflektor 8 inch (Vixen VMC200L). Kanan: Hartmann Mask yang digunakan hasil 3D-printing.

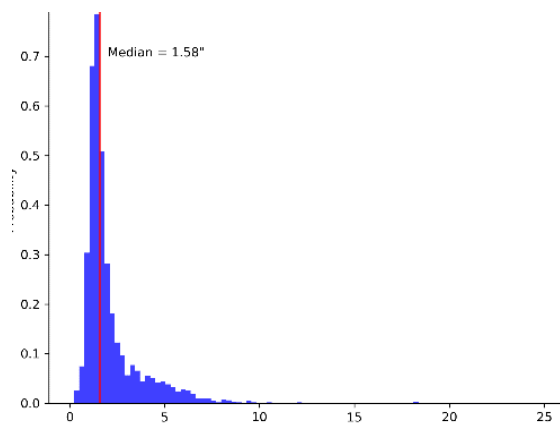


Gambar 2. Perangkat lunak Seeing Monitor Analyser v2.03 (<https://www.alcor-system.com>).

4 HASIL DAN ANALISIS



Gambar 3. Histogram nilai seeing (dalam detik busur) pada saat pengukuran 29-30 Juni 2021 dengan ukuran lubang 6 cm dan binning 1x1. Garis merah menandakan lokasi nilai median pada histogram.



Gambar 4. Histogram nilai seeing (dalam detik busur) pada saat pengukuran 1-2 Juli 2021 dengan ukuran lubang 2 cm dan binning 2x2. Garis merah menandakan lokasi nilai median pada histogram.

Pengukuran perdana dilakukan pada tanggal 29 Juni 2021 menjelang dini hari sebagai pengujian awal sistem. Pada tanggal 1 Juli 2021 dilakukan pengukuran kembali dengan sedikit perubahan konfigurasi, yaitu diameter lubang pada *Hartmann Mask*, yang sebelumnya berukuran 6 cm, diperkecil menjadi 2 cm. *Binning* piksel pada kamera diubah dari 1x1 menjadi 2x2. Hasilnya seperti yang ditampilkan pada Gambar 3 dan 4.

5 SIMPULAN

Terdapat perbedaan yang tidak terlalu jauh pada nilai median distribusi probabilitas perolehan nilai *seeing* dari dua konfigurasi pengukuran. Ukuran lubang 6 cm dan *binning* 1x1 menghasilkan nilai *seeing* 1,68", sedangkan ukuran lubang 2 cm dan *binning* 2x2 menghasilkan nilai *seeing* 1,58". Pengukuran ini masih merupakan tahap awal dan perlu dilanjutkan dan dikembangkan lagi.

6 PUSTAKA

Bally dkk., 1996, Publ. Astron. Soc. Aust., 13, 22-7
 Yusuf dkk., 2014, AIP Conference Proceedings 1589, 49
https://www.alcor-system.com/new/SW/DIMM_Software_Manual.html
 (ALCOR-SYSTEM) diakses pada 26 Oktober 2021 pukul 13.02 WIB

Peran Sky Quality Meter LU-DL dalam Mengkaji Kecerahan Langit Malam di Kota Pontianak dan Kabupaten Mempawah

Suraina

Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer Pontianak, Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Pontianak, Indonesia
E-mail: suraina@lapan.go.id

ABSTRAK

Langit malam yang cerah tanpa polusi cahaya menjadi salah satu parameter yang sangat penting untuk menggambarkan kualitas suatu pengamatan astronomi. Untuk menentukan lokasi pengamatan dengan kualitas langit malam yang ideal khusus di wilayah Kalimantan Barat diperlukan suatu kajian terkait kecerahan langit malam. Makalah ini menyajikan hasil pengukuran kecerahan langit dengan fotometer portabel pada arah zenith untuk pengamatan selama 30 hari dari pukul 18.00 s.d 05.00 WIB. Hasil pengukuran kecerahan langit untuk dua lokasi, yaitu kota Pontianak dan kabupaten Mempawah memperlihatkan bahwa kabupaten Mempawah memiliki kualitas langit malam yang lebih baik dari kota Pontianak. Pengukuran kecerahan langit di kabupaten Mempawah sebesar 18,77 mag/arcsec² dengan nilai maksimum 20,72 mag/arcsec². Sementara di kota Pontianak, kecerahan langit malam mencapai 17,49 mag/arcsec² dengan nilai maksimumnya 18,55 mag/arcsec². Desa Wajok kabupaten Mempawah masih memiliki potensi langit gelap dan bisa menjadi salah satu lokasi alternatif untuk melakukan pengamatan astronomi khusus di wilayah Kalimantan Barat.

Kata Kunci: SQM – kecerahan langit – polusi cahaya

1 PENDAHULUAN

Polusi cahaya sudah menjadi masalah yang serius bagi para astronom karena keakuratan astronomi yang semakin berkurang terhadap pengamatan benda-benda langit. Falchi (2010) telah mengkaji kecerahan langit yang dipengaruhi oleh tingkat polusi cahaya. Didapatkan bahwa terdapat penurunan kecerahan langit sekitar 0.2 - 0.3 magnitudo dari pukul 7 malam hingga tengah malam. Setelah tengah malam, kecerahan langit cenderung konstan dengan sedikit peningkatan pada pukul 2 sampai pukul 3 pagi.

Pun dan So (2011) mengkaji kecerahan langit malam yang diukur dan dipantau di sekitar kota Hong Kong menggunakan Sky Quality Meter di 199 kota dan pedesaan yang berbeda lokasi. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa kota Hong Kong sudah sangat tercemar oleh polusi cahaya dengan tingkat kecerahan langit malam di perkotaan sebesar 15 mag/arcsec². Nilai ini lebih cerah daripada di pedesaan yang tingkat kecerahan langitnya mencapai 20,1 mag/arcsec². Tahun 2016, Falchi dkk kembali melakukan kajian dengan menyajikan atlas dunia pencahayaan langit buatan. Atlas ini menunjukkan bahwa 23% dari daratan dunia antara 75° LU dan 60° LS, 88% Eropa, dan hampir setengah dari Amerika Serikat mengalami pencemaran cahaya malam.

Langit malam yang cerah tanpa polusi cahaya menjadi salah satu parameter yang sangat penting untuk menggambarkan kualitas suatu pengamatan astronomi. Kota Pontianak menjadi salah satu wilayah di Indonesia dengan tingkat polusi cahaya

yang cukup tinggi. Untuk menentukan lokasi pengamatan dengan kualitas langit malam yang ideal khusus di wilayah Kalimantan Barat diperlukan suatu kajian yang salah satunya adalah kajian kecerahan langit malam. Telah dilakukan studi untuk mengkaji tingkat kecerahan langit malam di kota Pontianak dan Kabupaten Mempawah yang terletak di sekitar ekuator dengan fotometer portable.

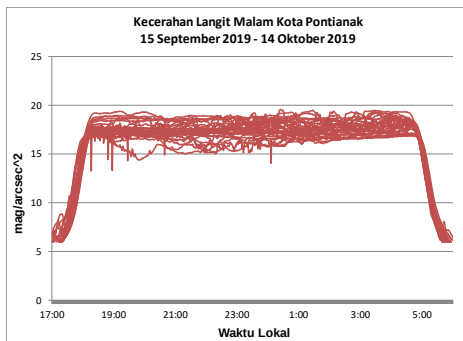
2 METODOLOGI

Penelitian dilakukan dengan metode observasi tingkat kecerahan langit malam menggunakan SQM LU-DL pada arah zenith (Herdiwijaya & Arumaningtyas, 2011). Pengamatan dilakukan di dua lokasi, yakni di wilayah Kota Pontianak dan Kabupaten Mempawah selama 30 hari dari pukul 18.00 s.d 05.00 WIB. Data yang digunakan untuk pengamatan di kota Pontianak (0°0'13" LS, 109°21'59" BT) adalah data dari tanggal 15 September s.d 14 Oktober 2019. Untuk pengamatan di Kabupaten Mempawah (0°2'29" LU, 109°20'14" BT) data yang digunakan dari tanggal 15 September s.d 14 Oktober 2020. Pengukuran dilakukan dengan bantuan Software Unihedron Device Manager (UDM) dengan jarak waktu perekaman 1 menit untuk setiap data.

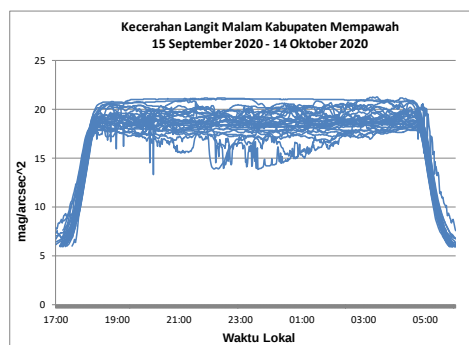
3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran kecerahan langit di kabupaten Mempawah rata - rata sebesar 18,77 mag/arcsec² dengan nilai maksimum 20,72 mag/arcsec². Sementara di kota Pontianak, rata – rata kecerahan langit malam mencapai 17,49 mag/arcsec² dengan nilai maksimumnya 18,55 mag/arcsec².

Gambar 1 dan **Gambar 2** adalah hasil plot kecerahan langit di Kota Pontianak dan Kabupaten Mempawah. Sumbu x merupakan data waktu permenit dan sumbu y merupakan nilai kecerahan langit yang dinyatakan dalam satuan magnitudo per satuan detik busur persegi (mag/arcsec^2).

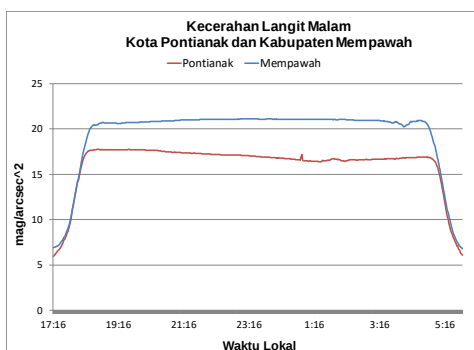


Gambar 1. Kecerahan Langit di Kota Pontianak



Gambar 2. Kecerahan Langit di Kabupaten Mempawah

Hasil plot pada **Gambar 3**, memperlihatkan bahwa kabupaten Mempawah memiliki kualitas langit malam yang lebih baik dari kota Pontianak. Untuk waktu pengamatan dari pukul 19.00 s.d 04.00 WIB, nilai kecerahan langit yang diukur di kota Pontianak menunjukkan rentang nilai dari 16,34 mag/arcsec^2 sampai dengan yang tertinggi 17,74 mag/arcsec^2 . Merujuk pada skala Bortle, rentang nilai tersebut berada pada kategori kelima ($<18,0$ mpdbp) dimana polusi cahaya sudah dominan dan



Gambar 3. Perbandingan Tingkat Kecerahan Langit di Kota Pontianak dan Kabupaten Mempawah

hanya planet-planet terang yang terlihat. Hal ini dikarenakan lokasi pengamatan di kota Pontianak terletak di perbatasan pinggir dan pusat kota.

Sementara lokasi pengamatan di Kabupaten Mempawah masih berada pada batas pedesaan dan pinggir kota. Dalam rentang waktu pengamatan dari pukul 19.00 s.d 04.00 WIB, nilai kecerahan langit yang diukur di Kabupaten Mempawah berada pada rentang nilai dari 20,25 mag/arcsec^2 sampai dengan yang tertinggi 21,09 mag/arcsec^2 . Kondisi langit pada rentang nilai tersebut menunjukkan awan tampak diterangi cahaya polusi, Milky Way masih cukup jelas tetapi detailnya kurang jelas. Berdasarkan skala Bortle, rentang nilai tersebut berada pada kategori kedua (antara 20,4 – 21,3 mpdbp) dimana polusi cahaya sudah mulai terlihat pada beberapa arah tertentu, kenampakan galaksi Bima Sakti dan cahaya Zodiak hanya pada waktu tertentu.

4 KESIMPULAN

Untuk melakukan pengamatan astronomi di kota Pontianak, objek langit yang dapat diamati dengan baik terbatas pada bulan, planet, dan bintang terang, khususnya jika pengamatan dilakukan pada panjang gelombang visual. Kedepannya riset ini akan dilanjutkan untuk melakukan pengukuran kecerahan langit di Kabupaten atau Kota lain yang masih berada dalam wilayah Kalimantan Barat. Disamping riset kecerahan langit, riset terkait cuaca juga perlu dilakukan untuk menentukan lokasi pengamatan yang ideal. Untuk saat ini, Kabupaten Mempawah bisa menjadi lokasi alternatif untuk melakukan pengamatan astronomi di Kalimantan Barat.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terimakasih disampaikan kepada seluruh anggota tim pengamatan Balai Pengamatan Antariksa dan Atmosfer Pontianak yang telah mengoperasikan SQM secara rutin. Ucapan yang sama juga disampaikan kepada saudari Gerhana Puannandra Putri, S.Si. yang telah memberi saran dan masukan dalam penelitian ini.

5 PUSTAKA

- Falchi, Fabio, 2010, Mon. Not. R. Astron. Soc. (2010), doi:10.1111/j.1365-2966.2010.17845.x
- Falchi dkk, 2016, Sci Adv 2 (6), e1600377, DOI: 10.1126/sciadv.1600377.
- Pun dan So, 2011, arXiv : 1106.3842v1 [astro-ph.IM] 20 Jun 2011.
- Herdiwijaya dan Arumaningtyas, 2011, Prosiding Seminar Himpunan Astronomi Indonesia di Aula Barat-ITB, Bandung, 27 Oktober 2011



TEMA 4:
Pendidikan Astronomi (Tinggi, Dasar,
Publik) dalam Era Teknologi 4.0

Network for Astronomy School Education for Indonesian Teachers (2016-2021)

N. Pratiwi^{1,2,3*}, H. L. Malasan^{1,2,3}, R. Muztaba^{1,2,3}, R. W. Romadhonia³, M. I. Ikhsan^{1,2,3}, D. M. Noor³, E. R. Kencana³, N. Resfita³, A. Fitriawati³, A. N. I. Putri^{1,2,3}, V. L. Ipmawan³, E. Fitri², M. Dewi², C. Kunjaya², Aprilia², and E. Soegiartini²

¹Atmospheric and Planetary Science Study Program, Institut Teknologi Sumatera, South Lampung, Indonesia

²Astronomy Division, Faculty of Mathematics & Natural Sciences, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

³ITERA Astronomical Observatory, Institut Teknologi Sumatera, South Lampung, Indonesia

*E-mail: nindhita.pratiwi@sap.itera.ac.id

ABSTRACT

The first NASE (Network for Astronomy School Education) course in Indonesia was held by Ma Chung University under the support of International Astronomical Unit (IAU) in 2016. Then, Institut Teknologi Sumatera also conducted NASE courses in 2018 and 2019, and then followed by means of virtual courses at Institut Teknologi Bandung in 2020 and Universitas Ahmad Dahlan in 2021. These programs were attended by 5 IAU Instructors, 8 Local Instructors, and 207 Participants in total. The participants were teachers, high school students, lecturers, undergraduate students, and astronomy communities from several regions in Indonesia. NASE course program consists of 4 lectures, 10 workshops, and astronomy visits. We visited Candi Badut (an archaeological site, the oldest Hindu Temple in Java Island) in 2016, Lampung Museum (historical tourist destination for education, research, and recreation) in 2018, Pugung Raharjo (a site of relics from the megalithic period such as statues, punden terraces, corpse/cage stones, stone altars, menhirs, hollow stones, and dolmen) in 2019 and Museum Muhammadiyah (an Islamic center for education and recreation) in 2021. NASE courses improve science teachers' understanding of concepts and practical competences in astronomy. It also stimulates advances in teaching abilities so their students can increase their interest in learning astronomy.

Keywords: Astronomy – Education – Teacher.

1 INTRODUCTION

NASE (Network for Astronomy School Education) was developed in response to 10 Years Strategic Plan of IAU (International Astronomical Union) to increase the efforts of IAU in schools. NASE was founded in August 2009. The goals are to educate teachers and help them to develop astronomy education in their countries (Ros, 2012). Technically, one or two members of NASE visited the host countries, and they teach teachers with the help of local lecturers of astronomy. However, not only visiting once, in fact, NASE always follows the develop of the visit results in each country. The aim is to establish a local group of NASE members from each country, who continue teaching at NASE events each year and create new trainings using NASE materials. NASE provides facilities for teachers to make instruments for understanding astronomical concepts. In addition, NASE also promotes an active learning process by practice using self-made instruments (Ros & Garcia, 2013).

Conditions of astronomy education in Indonesia can be described as follows,

- Astronomy is not an independent subject; it is possibly part of physics or geography.
- Students who follow annual event of National Science Competition, face difficulties.

- Many school teachers do not have sufficient astronomical background.

Based on these situations, Universitas Ma Chung initiated the NASE basic training in Malang (2016). Then, Institut Teknologi Sumatera (ITERA) had the opportunity to host NASE in 2018 and 2019. After that, it was continued by Institut Teknologi Bandung (ITB), in collaboration with ITERA, held NASE basic training for teachers virtually in 2020. And then, Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta held a virtual NASE training assisted by ITERA and ITB teams in 2021.

2 NASE COURSES IN INDONESIA

NASE programs include 4 lectures (Stellar Evolution, History of Astronomy, Cosmology, and Solar system), 10 workshops (Local Horizon and Watches of Sun, Movement of the Stars, The Sun and the Moon, Stages on eclipses, Briefcase from the Young Astronomer, Solar Spectrum and Sunspots, Life of Stars, Astronomy Beyond the Visible, Expansion of the Universe, Planets and Exoplanets, Astrobiology), and Excursions to introduce Archaeoastronomy in the respective region (Ros & Hemenway, 2017). See Table 1 for details.

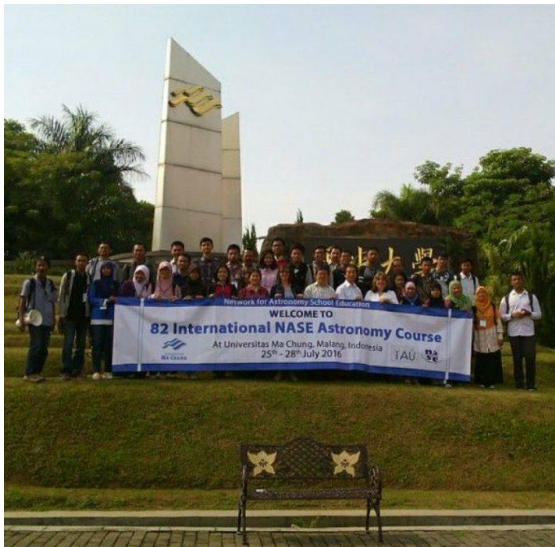
2.1 NASE in Universitas Ma Chung, Malang (2016)

The first NASE in Indonesia held on July 2016. The most of the participants of this course were

Table 1. Details of NASE courses in Indonesia.

	2016	2018	2019	2020	2021
IAU Instructors	Rosa M. Ros (Spain) Beatriz Garcia (Argentina) A. Tomita (Japan) C. Kunjaya (Indonesia)	Rosa M. Ros (Spain) Alexandre C. (Portugal) H. L. Malasan (Indonesia)	A. Pickwick (UK) C. Kunjaya (Indonesia) H. L. Malasan (Indonesia)	Rosa M. Ros (Spain) C. Kunjaya (Indonesia) H. L. Malasan (Indonesia) Aprilia (Indonesia)	Rosa M. Ros (Spain) C. Kunjaya (Indonesia) H. L. Malasan (Indonesia) Aprilia (Indonesia)
Participants	34 (East and Central Java)	18 (Lampung and West Java)	21 (Lampung and West Java)	74 (13 provinces)	60 (34 provinces)
Dates	25-28 July 2016	22-25 October 2018	19-22 August 2019	13-15 August 2020	12-15 August 2021

teachers. Besides them, it was participated also by high school students and communities of astronomy in East Java (Malang Astronomy Club) and Surabaya Astronomy Club. They were invited to join the excursion in *Candi Badut* (an archeological site), the oldest Hindu Temple in Java Island. Figure 1 shows a picture of the participants taken in this event.

**Figure 1.** All of participants and instructors in NASE 2016.

2.2 NASE course in Institut Teknologi Sumatera, South Lampung (2018)

In 2018, NASE course was attended by 18 participants from Lampung, Jakarta, Bandung, Malang, Jombang, and Surabaya. They were invited to visit *Museum Lampung*, a historical site visit for education, research and recreation. In the museum, there are unique collections. In there, we saw Chinese zodiac bowl. This bowl indicated that ancient people had known about zodiac (stellar constellation in ecliptic). Besides that, the participants involved in workshops, one of them was about scale of distance (Figure 2).

**Figure 2.** Scale of distance: workshop for understanding about scale of interplanetary distance in Solar System.

2.3 NASE course in Institut Teknologi Sumatera, South Lampung (2019)

In 2019, there were 21 participants, consist of teachers, undergraduate students, and astronomy communities. At that time, they visited *Taman Purbakala Pugung Raharja*, an archeological site complex, where there are relics from megalithic period such as statues, punden terraces, corpse stones (cage stones), stone altars, menhirs, hollow stones, and dolmen. The interesting object that had been found is a stone that was suspected to function as a compass. The understanding of direction shows that at ancient time they already seen the regularity of the sky movement. Activity in *Pugung Raharjo* is displayed in Figure 3.

2.4 NASE course in Institut Teknologi Bandung, Bandung (2020)

The following NASE course was held on August 2020, by ITB Bandung. This course was participated by 74 participants from 13 provinces in Indonesia. They were lecturers, undergraduate students, teachers, communities, and high school students. One of our activities was making instrument to understand about expansion of universe (Figure 4).



Figure 3. Astronomical Excursion to *Pugung Raharjo*. The tour guide introduced Archeoastronomy in Lampung.

Even though it was the first virtual NASE due to the pandemic outbreak, participants commented that NASE course was very helpful and it was beyond their expectations.

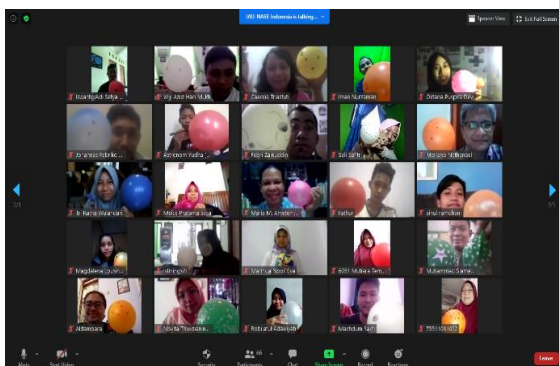


Figure 4. Expansion of Universe workshop: Understanding expansion concept using balloon.

2.5 NASE course in Universitas Ahmad Dahlan, Yogyakarta (2021)

In 2021, NASE was still held virtually due to the pandemic. It followed by 60 participants from 34 provinces. They are member of PPFI (*Perkumpulan Pecinta Fisika Indonesia*), undergraduate students from Universitas Ahmad Dahlan, and public. Even though this course was held virtually, the participants were invited to join the virtual excursion in *Museum Muhammadiyah*, an Islamic center for education and recreation. They listened to the

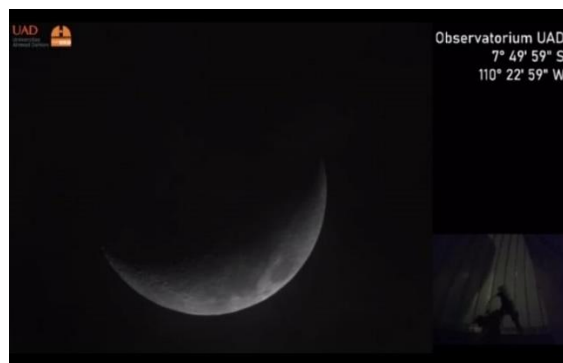


Figure 5. Universitas Ahmad Dahlan as the host of NASE course in 2021, conducted Lunar observation virtually.

explanation about *Muhammadiyah* role of astronomy development in Indonesia and the world. For example, Muhammadiyah contributed in the rocket launching by Indonesian scientists, Islamic calendar arrangement, and observatory construction. Besides that, participants were also invited to join virtual observation (Figure 5).

3 CONCLUSIONS

NASE can improve understanding of concepts and practices in astronomy for teachers. It also makes advances in teaching abilities so their students can increase their interest in learning astronomy.

Acknowledgements

We thank Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) Institut Teknologi Sumatera and Institut Teknologi Bandung, Universitas Ma Chung, and Universitas Ahmad Dahlan for substantially helping us in making these events success.

4 REFERENCES

- Ros, R. 2012, *Phys. Educ.* **47**, 112
- Ros, R. & Garcia, B. 2013, Network for Astronomy School Education
<<http://sac.csic.es/astrosecundaria/en/Presentacion.php>>
- Ros, R. & Hemenway, M. 2017, *14 steps to the Universe – Astronomy course for teachers and science graduates*, EU

Menjembatani kemajuan pengetahuan sains dan pendidikan sains

P. W. Premadi^{1,2*}

¹Kelompok Keahlian Astronomi, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

²Observatorium Bosscha, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Indonesia

*E-mail: premadi@as.itb.ac.id

ABSTRAK

Sains berkembang dengan amat pesat yang juga dibarengi dengan diversifikasi yang semakin tajam. Pemanfaatan sains dalam berbagai aspek kehidupan juga semakin lebar dan 'urgent'. Namun, kemajuan sains yang pesat ini belum dapat diimbangi pada peningkatan substansi sains dalam pendidikan sains. Akibatnya, senantiasa ada kesenjangan lebar antara sains garis depan dan sains yang dipahami oleh masyarakat, yang diajarkan di sekolah. Tanpa pembenahan yang baik, kesenjangan ini dapat menghambat pemanfaatan sains untuk peradaban, bahkan mengganggu kepercayaan masyarakat pada sains. Salah satu upaya untuk memperkecil kesenjangan ini adalah dengan memberdayakan fasilitator yang menjembatani saintis dan pendidik. Fasilitator pendidikan sains adalah mereka yang disiapkan untuk dapat memahami konten sains dengan amat baik, mengikuti perkembangan sains, sekaligus dilengkapi dengan kemampuan penyampaiannya dalam berbagai format. Fasilitator lalu dapat bekerja mandiri sebagai pendidik dalam sistem sekolah formal maupun informal, sebagai rekan kerja guru, dan sebagai komunikator sains dalam media umum. Fasilitator sains dapat berafiliasi dengan suatu institusi sains, seperti Observatorium Bosscha, untuk dapat memahami perkembangan terkini suatu cabang sains tertentu, sekaligus mengembangkan materi pendidikan dan metoda pembelajarannya.

Kata Kunci: Sains – Pengetahuan – Pendidikan

1 PENDAHULUAN

Sains adalah pengetahuan tentang alam yang telah terakumulasi dan terperiksakan hingga batas-batas tertentu. Definisi sederhana ini sudah menunjukkan bahwa sains adalah fungsi waktu. Sains adalah produk kerjasama manusia lintas generasi yang tak pernah selesai: terus-menerus diperbaiki, dipertajam, diperluas, ditambah, sehingga sains senantiasa dalam status tentatif, dalam semangat positif. Fungsi waktu yang disebutkan di atas harus dimaknai sebagai fungsi upaya manusia dalam mendorong kemajuan sains.

2 KEMAJUAN DAN PERKEMBANGAN PENGETAHUAN

Peran sains dalam peradaban terus meningkat, sebagai pengetahuan yang dimiliki oleh individu, maupun sebagai prinsip kerja yang implisit hadir dalam teknologi yang dimanfaatkan. Ini dapat diambil sebagai petunjuk kemajuan pengetahuan. Namun, di dalam batang tubuh pengetahuan sendiri, bagaimana kemajuan dan perkembangan pengetahuan diukur? Bagaimana kita bisa terus mendorong kemajuan yang diinginkan? Salah satu yang dapat menjadi pengukur kemajuan sains adalah pertanyaan yang diajukan dengan jernih dan tajam, yang dapat mengarahkan haluan riset untuk topik termaksud. Dengan pertanyaan bermakna ini tujuan suatu riset dapat didefinisikan dengan jelas dan strategi untuk pelaksanaannya juga disusun dengan baik.

2.1 Produk Sains

Sains, sebagai badan usaha raksasa, melaksanakan berbagai elemen pekerjaan saintifik, yang masing-masingnya dapat bervariasi menurut jenis sainsnya. Oleh karenanya apa yang dapat dikenali sebagai produk sains juga tidak tunggal, bergantung pada posisinya pada peta besar sains. Kita mendengar berbagai ajektif yang berasosiasi dengan sains, seperti pengetahuan fundamental, pengetahuan terobosan, temuan, konfirmasi, dan lain-lain, yang secara implisit mengidentifikasi produk sains tersebut pada tahapan tertentu dalam metode saintifik yang dirujuk.

Diseminasi produk sains pada umumnya dalam bentuk kontribusi pada pertemuan ilmiah, dan dalam publikasi dalam jurnal ilmiah maupun bentuk publikasi yang lain. Untuk produk sains yang fundamental, terobosan, temuan besar, tidak jarang diberitakan juga dalam publikasi yang ditujukan untuk umum. Pertanyaannya adalah bagaimana agar produk sains ini dapat diterima dan sampai batas tertentu dipahami juga oleh masyarakat umum, dan juga bagaimana akomodasinya dalam pendidikan formal. Upaya untuk menjawab ini banyak terlihat di berbagai institusi sains, termasuk barangkali sains yang kurang mendunia seperti seperti fisika partikel di CERN (Gulejova dkk, 2021).

2.2 Perguruan Tinggi dan Evolusi Kurikulum

Cukup adil untuk mengatakan bahwa sebagian besar penelitian ilmu alam dasar diselenggarakan di perguruan tinggi. Kedekatan relasi penelitian dan

pendidikan pada jenjang ini salah satunya adalah relasi yang sinambung antara pimpinan program penelitian (dosen) dan anggota team pelaksana (mahasiswa). Keperluan penyiapan sumber daya manusia ini salah satunya mewujud pada kurikulum di perguruan tinggi. Evolusi kurikulum untuk suatu rumpun sains merupakan salah satu indikator kemajuan dan perkembangan pengetahuan. Astronomi dan astrofisika adalah cabang sains yang memerlukan fondasi kuat pada fisika dan matematika, selain pengetahuan dasar astronomi sendiri. Pada struktur kurikulum ini mewujud dalam berbagai matakuliah dasar yang memuat kalkulus, metoda matematika, mekanika, termodinamika, fisika statistik, elektromagnetika, gelombang, mekanika kuantum. Sementara matakuliah dasar astronomi mencakup astronomi posisi, waktu, astrofisika, dan yang relevan dengan pengamatan. Yang kemudian dikategorikan dalam pengetahuan dasar astronomi substansi menurut objek atau fenomena astronomis: bintang, Tata Surya, galaksi, dan alam semesta, yang juga merupakan pencabangan utama dalam astronomi. Ini boleh dikatakan sebagai kurikulum inti suatu program pendidikan tinggi astronomi yang standard isinya generik di seluruh dunia.

Dalam dua dekade belakangan ini, mengikuti perkembangan astronomi, muncul pencabangan yang lebih halus dan juga pengayaan. Sebagai contoh matakuliah yang merepresentasikan pencabangan halus: bintang ganda, atmosfer planet, dinamika sistem bintang, ektragalaksi. Pekerjaan instrumentasi dan komputasi menjadi besar dan canggih, sehingga memerlukan kelompok perkuliahan tersendiri untuk memenuhi kebutuhan penelitian. Pengayaan materi spesifik dapat diakomodasi dalam matakuliah pilihan subtopik, dan program singkat seperti *workshop*, "*summer school*", dan seminar atau kolokium.

Kulminasi hasil belajar dalam program studi adalah dalam bentuk Tugas Akhir Sarjana, Tesis Magister, dan Disertasi Doktorat. Sementara kulminasi tentatif riset berbentuk publikasi atau hasil karya lain yang diakui. Karena konten dan cara kerja pendidikan sains pada perguruan tinggi terkait langsung dengan penelitian, maka kesinambungan dalam aliran pengetahuan menjadi syarat perlu sekaligus syarat cukup kualitas pendidikan tinggi.

3 PENDIDIKAN SAINS

Kendati di perguruan tinggi kesinambungan dalam aliran pengetahuan antara penelitian dan pendidikan menjadi syarat, pemenuhannya selalu menjadi tantangan, persis karena pengetahuan yang

terus maju. Derap kemajuan di garis depan pengetahuan berada pada tingkat kecanggihan tinggi. Untuk mengakomodasinya pada ranah pendidikan diperlukan pemilahan taraf kesulitan yang memerlukan waktu lebih panjang. Akibatnya selalu ada kesenjangan antara pengetahuan di garis depan dan pengetahuan yang menjadi konsumsi pendidikan. Adanya penjenjangan S1, S2, dan S3 adalah salah satu strategi menjawab tantangan ini.

Situasinya amat berbeda, dan jauh lebih sulit, pada pendidikan dasar dan menengah, juga pendidikan untuk masyarakat, dimana ada kesenjangan amat lebar dan dalam antara pengetahuan yang sudah dicapai oleh ilmuwan dan pengetahuan yang dimiliki oleh masyarakat. Penyebabnya bisa kelembaman pada sektor pendidikan sekolah untuk memuat pengetahuan baru dan pemuatan berita saintifik di media massa yang kurang efektif. Untuk melihat lebih dalam lagi, kita perlu mengingat beberapa hal prinsipil tentang pendidikan sains.

3.1 Esensi Pendidikan Sains

Tujuan pendidikan sains, sederhananya, adalah agar dimiliki kemampuan mengamati secara kritis, berpikir analitik, dan mengkonstruksi gagasan, dengan cara menanamkan tatanan berpikir saintifik. Untuk mencapai tujuan abstrak ini umumnya tatanan berpikir saintifik ini diajarkan dalam konteks sains alam. (ajektif saintifik melekat karenanya). Apapun topik sains alamnya, harus ada pengetahuan dasar yang diajarkan. Apa yang kita maksud dengan pengetahuan dasar? Disinilah ilustrasi tentang kurikulum astronomi menjadi bermanfaat untuk melihat secara konkrit bagaimana "batu bata" pengetahuan astronomi disusun agar "bangunan" pengetahuan astronomi dapat berdiri tegak dan terus menjadi tumpuan kokoh menyangga spesialisasi apapun di atasnya. Produk sains berupa pengetahuan fundamental memberi opsi baru untuk melebarkan bangunan alih-alih hanya membangun ke atas. Terbayang oleh kita struktur pengetahuan: fundamental, diversifikasi, spesialisasi.

Di dalam pendidikan kita dengar istilah pengayaan, yang umumnya tidak cukup dalam untuk menjadi spesialisasi, namun dapat memberikan perluasan wawasan ke arah topik tertentu. Pengayaan dapat menginspirasi, dan pada kesempatan tertentu memberikan relevansi, yang membantu pemahaman bahan ajar. Itu sebabnya pengayaan perlu diberikan bahkan pada pembelajaran pengetahuan dasar. "Dasar" bukan berarti yang termudah untuk dipahami; malahan memerlukan loncatan berpikir, yang diwujudkan

dalam strategi pembelajaran: terima dulu, pahami kemudian. Ini mengharuskan materi ajar dan penyampaian disesuaikan dengan kesiapan kognitif peserta didik. Kesiapan kognitif bukan hanya pada kemampuan berpikir, tetapi juga keluasan perspektif. Yang kedua ini, biasanya muncul dalam kemauan berpikir dan keterbukaan cara pandang, yang lebih membantu penerimaan dan pemahaman ide baru.

Pengajar tentu perlu menyiapkan diri, materi, dan cara penyampaian yang disesuaikan dengan berbagai kondisi kesiapan belajar ini. Persiapannya jelas menentukan apakah penyampaian materinya berujung pada pengenalan saja atau pemahaman. Ini menjadi titik reflektif bagi kita untuk menjernihkan apa objektif program pendidikan yang ingin kita selenggarakan.

3.2 Pendidikan Masyarakat dan di Sekolah

Dalam mengajar kita selalu berangkat dari apa yang para pembelajar tahu dan kenal, lalu memilih kendaraan untuk mencapai titik pengenalan dan pengetahuan yang ditargetkan. Jalur pendidikan manapun yang dipilih amat penting untuk menyiapkan konteks yang para peserta didik dapat bayangkan, sebab pemahaman kontekstual adalah pintu masuk, sebagai Langkah *engagement*, ke pemahaman fundamental untuk relevansi yang lebih luas. Upaya *engagement* tentu lebih besar pada sektor pendidikan umum, karena memerlukan persepsi atas spektrum lebar kondisi kognisi masyarakat.

Pemberian konteks dapat berupa narasi yang menghidupkan fakta (seperti data numerik) karena inilah yang menghidupkan mesin logika. Ini dapat berupa cerita jalan menuju suatu penemuan, yang sekaligus menjelaskan “bagaimana” suatu fakta (“apa”) ditemukan. Secara implisit dan eksplisit relasi kausal mengemuka dalam narasi ini. Mengikuti jalur cerita ini dikenali pula institusi dan tokoh yang berperan, sehingga nampak pula sains adalah usaha manusia dalam wadah kerjasama yang besar dan berkesinambungan.

Konteks juga dapat dihadirkan melalui identifikasi sains yang menjadi prinsip kerja dasar berbagai teknologi yang dimanfaatkan masyarakat. Selain memberikan pemahaman pada masyarakat bahwa sains bukan melulu untuk sains, ilustrasi ini memotivasi generasi muda menjadikan pengetahuan sains sebagai basis pencapaian pada sektor lain.

4 FASILITATOR PENDIDIKAN SAINS

Menilik cakupan dan rincian pekerjaan pendidik sains pada masyarakat jelas diperlukan sumber daya

manusia yang memang disiapkan untuk menjalankannya. Di dalam tulisan ini dipinjam istilah yang umum dikenal, yakni fasilitator pendidikan, namun dengan makna pemberdaya yang lebih luas daripada memfasilitasi dalam artian konvensional.

Fasilitator pendidikan sains yang dimaksud perlu memiliki pengetahuan dasar yang dalam dan luas tentang bidang sains tertentu, sehingga ia bisa memahami garis besar kemajuan sains pada bidang tersebut. Minatnya yang serius pada pendidikan dan komunikasi sains mestilah tampak pada materi ajar yang ia siapkan dan cara penyampaian. Idealnya ia berafiliasi dengan institusi yang menjalankan penelitian sains termaksud untuk dapat senantiasa memperoleh *insight* langsung dari para ilmuwan pemegang otoritas sains spesifik tersebut untuk memahami narasi utuh topiknya. Dengan ini ia dapat menghadirkan produk sains yang dimaksud dalam bentuk yang dapat diterima oleh mereka di luar komunitas sains spesifik tersebut.

4.1 Pendidikan Formal

Sebagai fasilitator pendidikan sains untuk pendidikan formal, penting mengenali peta pendidikan sains dalam kurikulum sekolah, sekaligus bagaimana kurikulum tersebut dijalankan. Komunikasinya yang erat dengan ilmuwan membantunya dalam mengidentifikasi jenis produk sains (Subbagian 2.1) untuk kemudian memilah dan menyiapkan materi ajar dan metode penyampaian yang efektif (Subbagian 3.1). Sehingga untuk sistem pendidikan formal, fasilitator mengajar, menanamkan, dan melatih cara berpikir saintifik dengan muatan sains spesifik yang berkorespondensi dengan struktur kurikulum dan tingkat kognisi peserta didik. Pada kesempatan yang bersamaan ia juga meningkatkan kapasitas guru dalam materi ajar maupun metode pembelajarannya. Program pembelajaran dapat berupa kegiatan ekstrakurikuler sesuai kondisi alam lokal (misal, Fursten, 2017).

4.2 Pendidikan Informal

Peran fasilitator pendidikan sains untuk umum lebih dikenal karena domain kerjanya pada *interface* antara komunitas sains dan masyarakat. Ia mungkin lebih dikenal sebagai komunikator sains, yang cakupan utama kerjanya adalah mengabari dan memperkenalkan materi sains terkini, menarik, dan/atau relevan dengan masyarakat. Di dalam astronomi ini dapat berupa berita temuan, update misi astronomis yang sedang dimonitor, berita kejadian astronomis istimewa, dan fitur objek astronomis yang senantiasa populer namun eksotik seperti lubang hitam.

Untuk dapat menyiapkan materi yang *engaging* sekaligus mencerahkan, fasilitator pendidikan sains untuk publik perlu mengenali *audience*-nya. Berbeda dari perannya pada pendidikan sains di sekolah, dimana hasil belajar dinilai secara akumulatif pada akhir masa belajar, komunikasi sains untuk publik sering menjadi rujukan jika berkaitan dengan fenomena saintifik aktual, seperti kejadian alam istimewa atau wabah penyakit. Penjelasan yang jernih dan akurat diperlukan masyarakat untuk mengambil keputusan.

4.3 Contoh

Sebagaimana layaknya institusi sains, Observatorium Bosscha memanggul amanah pendidikan astronomi untuk semua: perguruan tinggi, dasar dan menengah, dan publik. Untuk membantu pembelajaran materi astronomi pada tingkat dasar dan menengah, diselenggarakan program fasilitasi pendidikan yang intinya adalah menyiapkan materi bantu ajar astronomi dan menyiapkan guru untuk memahaminya dan menyampaikannya pada kegiatan pembelajaran di sekolah masing-masing. Bentuknya adalah Kelas Daring Astronomi, Workshop Guru, yang dapat dilaksanakan secara daring maupun luring. Kompetensi yang diperlukan adalah pemahaman astronomi dan sains fisis dasar dan pengetahuan umum tentang kurikulum sekolah dasar dan menengah untuk dapat menyiapkan materi ajar, serta ketrampilan untuk menyampaikan materi astronomi untuk berbagai usia. Sementara layanan untuk publik diselenggarakan secara regular dalam bentuk Pengamatan Virtual Langit Malam, Talkshow, dan Newsletter yang menyuguhkan konten astronomi hingga tingkat komprehensif yang menarik untuk publik ketahui dan pahami. Komunikasi ringkas dengan frekuensi lebih tinggi berupa berita dan gambar astronomi, fitur relevan dengan astronomi dan observatorium, disampaikan melalui media

sosial. Untuk pekerjaan ini, selain pemahaman substansi astronomi dasar dan berita astronomi terkini, diperlukan kemampuan mempersepsi kondisi, minat, dan kebutuhan umum akan pengetahuan masyarakat, serta kemampuan untuk menuangkan dalam paket-paket komunikasi berupa narasi dan gambar yang dapat diterima oleh masyarakat.

5 PENUTUP

Telah diargumentasikan dalam tulisan ini perlunya upaya memperkecil kesenjangan antara pengetahuan sains yang dicapai oleh komunitas ilmiah dan perlunya praktisi pendidikan sains sebagai sumber daya yang mewujudkan upaya tersebut sesuai relevansinya dengan pembelajar. Kesuksesan upaya ini akan menjadikan sains senantiasa dipercaya masyarakat sebagai modal dan tuntunan berpikir bagi individu maupun komunitas dalam kehidupan modern. Sains astronomi menjadi ilustrasi untuk argumentasi ini, namun jelas perlu diwujudkan oleh cabang sains lain, terutama yang terdekat relevansinya dengan masyarakat.

Ucapan Terima Kasih

Saya berhutangbudi pada team pendidikan dan penjangkauan masyarakat Observatorium Bosscha, Universe Awareness Indonesia, Planetarium Jakarta, dan teman-teman komunitas astronomi Indonesia yang luar biasa upayanya agar astronomi menjadi bekal sains untuk umum dan sekolah.

6 PUSTAKA

- Gulejova, B. B., 2021, Proceedings of the Memorial Workshop Devoted to the 90th Birthday of V. N. Gribov (Gribov-90 Memorial Volume), Dokshitser, Y., Levai, P., Lukacs, A., and Nyiri, J., editors, 991-113, <https://doi.org/10.1142/12318>
- Fursten, K., 2017, Hawk Mountain Global Raptor Conservation, <<http://hawkmountain.org>>

Mendorong Penguasaan Astronomi di Jenjang Pendidikan Menengah melalui Olimpiade

L. Puspitarini^{1,2*}, Aprilia^{1,2}, H. L. Malasan^{1,2}, M. I. Hakim^{1,2}, M. I. Arifyanto^{1,2}, E. I. Akbar^{1,2}

¹Program Studi Astronomi dan Observatorium Bosscha, FMIPA, Institut Teknologi Bandung, Jalan Ganesha 10 Bandung 40132 Indonesia

²Tim Pembina Kompetisi Astronomi

*E-mail: lucky.puspitarini@as.itb.ac.id

ABSTRAK

Sampai saat ini, kurikulum pendidikan di Indonesia belum sepenuhnya mengakomodasi astronomi. Salah satu upaya untuk mendorong pembelajaran astronomi di jenjang pendidikan menengah, yaitu melalui kegiatan olimpiade atau kompetisi sains bidang astronomi. Sejak tahun 2003, Indonesia telah berpartisipasi secara aktif dalam olimpiade astronomi tingkat internasional dan telah meraih berbagai prestasi. Selain itu, astronomi merupakan salah satu bidang ilmu yang dilombakan dalam ajang Olimpiade Sains Nasional (saat ini disebut Kompetisi Sains Nasional) tingkat SMA atau MA di bawah Pusat Prestasi Nasional, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi. Kegiatan olimpiade atau kompetisi bidang astronomi yang berjenjang disertai pembinaan telah membawa berbagai dampak positif, khususnya dalam mendorong penguasaan astronomi bagi pelajar dan tenaga pendidik, menjangkau siswa/siswi unggul, serta dalam jangka panjang meningkatkan mutu pendidikan.

Kata Kunci: Olimpiade – Kompetisi – Pendidikan

1 PENDAHULUAN

Sampai saat ini, kurikulum pendidikan di Indonesia masih belum sepenuhnya mengakomodasi astronomi. Sebagian kecil materi astronomi disisipkan di mata pelajaran Geografi dan Fisika tingkat SMA/MA. Namun, intensitasnya masih sangat terbatas, bahkan tidak ada materi astronomi yang mencakup pengamatan atau praktikum astronomi. Padahal, wawasan astronomi memiliki peran yang sangat penting, tidak hanya untuk memahami fenomena alam terkait benda langit tetapi juga membentuk pola pikir, mengembangkan kemampuan analisis, meningkatkan keingintahuan, meningkatkan kesadaran lingkungan, membentuk apresiasi, serta meningkatkan imajinasi dan kreativitas. Oleh karena itu, perlu adanya suatu strategi untuk meningkatkan minat dan penguasaan astronomi untuk generasi muda. Salah satunya, yaitu melalui olimpiade atau kompetisi sains bidang astronomi.

2 OLIMPIADE ATAU KOMPETISI SAINS INTERNASIONAL

Penyelenggaraan olimpiade sains terinspirasi dari olimpiade olahraga yang merupakan ajang kompetisi dengan misi persahabatan. Olimpiade sains merupakan bentuk kompetisi intelektual untuk pelajar yang bertujuan memotivasi generasi muda dan menyediakan suatu kerangka untuk belajar dan berkembang, serta menjalin persahabatan internasional (Stachowski, 2021).

Terdapat beragam olimpiade sains bidang astronomi di tingkat internasional, misalnya *International Astronomy Olympiad* (IAO) (sejak 1996), *Asian-Pacific Astronomy Olympiad* (APAO) (sejak 2005), *International Olympiad on Astronomy and Astrophysics* (IOAA) (sejak 2007), *Global e-Competition on Astronomy and Astrophysics* (GeCAA) (pada tahun 2020), dll. Gambar 1 menunjukkan contoh kegiatan olimpiade sains bidang astronomi.

Sejak tahun 2003, pelajar Indonesia telah berpartisipasi secara aktif dalam olimpiade astronomi tingkat internasional dan telah meraih berbagai prestasi. Sebagai contoh, pada GeCAA 2020 lalu, tim nasional Indonesia meraih prestasi meraih berupa 3 medali perak, 6 medali perunggu, dan 7 *honorable mention*. Daftar prestasi sebelum tahun 2020 dapat dilihat pada Aprilia dkk (2018).

Indonesia merupakan salah satu negara yang berperan aktif dalam membentuk dan mengembangkan olimpiade astronomi tingkat internasional, yaitu IOAA (Soonthornthum, B., Kunjaya, C., 2011). IOAA bertujuan mempromosikan minat yang tumbuh dalam astronomi dan ilmu terkait, khususnya melalui pendidikan untuk generasi muda, dan meningkatkan pengembangan kontak internasional dalam mempromosikan astronomi dan astrofisika di sekolah-sekolah. Selain itu, melalui IOAA, diharapkan semakin banyak siswa SMA/MA berprestasi yang bersemangat belajar astronomi di tingkat universitas untuk menjadi astronom generasi penerus.

Kegiatan IOAA dan olimpiade astronomi lainnya juga didukung oleh *International Astronomical Union (IAU)* dalam *Working Group (WG) on Astronomy Competitions for Secondary School Students*.



Gambar 1. IOAA 2015 di Jawa Tengah. Kegiatan olimpiade tidak hanya untuk kompetisi namun juga menjalin persahabatan internasional.

3 OLIMPIADE ATAU KOMPETISI SAINS NASIONAL

Olimpiade Sains Nasional (OSN) atau saat ini disebut Kompetisi Sains Nasional (KSN) adalah kompetisi tahunan dalam bidang sains bagi para pelajar di seluruh Indonesia. KSN diselenggarakan oleh Pusat Prestasi Nasional, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi. KSN bersifat berjenjang, yaitu tingkat kabupaten, provinsi, dan nasional. Juara dari KSN dapat mengikuti pembinaan dan seleksi untuk menjadi tim nasional pada olimpiade tingkat internasional. Pembinaan dan seleksi tim nasional dilakukan oleh Tim Pembina Kompetisi Astronomi (TPKA) yang beranggotakan perwakilan Kelompok Keahlian Astronomi ITB bekerjasama dengan Pusat Prestasi Nasional.

Tujuan dari KSN, yaitu:

1. mengembangkan peserta didik bertalenta dan berkarakter dengan prestasi internasional, yang mampu berkontribusi sebagai perintis pembangunan melalui ilmu pengetahuan dan teknologi, untuk mewujudkan bangsa yang unggul;
2. pemerataan prestasi ke pelosok tanah air, dengan maksud untuk menemukan peserta didik bertalenta dan berkarakter yang maksimal;
3. menciptakan atmosfer berkompetisi dan berprestasi yang sehat, serta mendorong tumbuh kembangnya budaya silih asuh di sekolah dan semua pemangku kepentingan;

4. melakukan seleksi dan menyiapkan calon peserta yang dapat diandalkan untuk mewakili Indonesia pada kompetisi tingkat internasional.

Saat ini, KSN bidang astronomi hanya diperuntukkan untuk pelajar SMA/MA. KSN bidang astronomi menguji kemampuan pelajar dalam teori, analisis data, dan observasi astronomi.

Dari tahun ke tahun, terdapat peningkatan minat pelajar terhadap bidang astronomi. Hal ini dapat dilihat dari jumlah peserta KSN tingkat Provinsi yang meningkat, lihat Gambar 2.



Gambar 2. Jumlah Peserta KSN Tingkat Provinsi untuk Bidang Astronomi mengalami peningkatan dari tahun ke tahun.

Pada penyelenggaraan KSN secara luring, misalnya KSN tahun 2019, antusiasme terhadap astronomi dari para pelajar, pihak sekolah, dan masyarakat kota yang menjadi tuan rumah cukup besar. Selain kompetisi, KSN juga diramaikan dengan kegiatan *public outreach* dan *talkshow*. Dalam hal ini, KSN dapat menjadi ajang untuk memperkenalkan astronomi tidak hanya untuk pelajar, namun juga tenaga pendidik, dan masyarakat.

Pada tahun 2021, terdapat peningkatan jumlah peserta KSN secara signifikan. Hal ini dikarenakan tingginya minat para pelajar dan adanya pemanfaatan teknologi informasi dan komunikasi sehingga KSN dapat dilaksanakan secara daring.

4 DAMPAK OLIMPIADE/KOMPETISI ASTRONOMI

Dengan adanya olimpiade atau kompetisi sains bidang astronomi, astronomi semakin dikenal di kalangan pelajar, guru atau pihak sekolah, dan masyarakat. Hal ini dapat dilihat dari peningkatan minat pelajar terhadap olimpiade/kompetisi astronomi, munculnya pelatihan-pelatihan astronomi bagi pelajar dan guru/tenaga pendidik, adanya dukungan sekolah melalui pelatihan, fasilitas teleskop, klub astronomi, dll. Selain itu, antusiasme masyarakat juga meningkat khususnya di daerah yang menjadi tuan rumah penyelenggaraan KSN.

Dampak lain yang sangat menarik, yaitu peningkatan minat alumni olimpiade/kompetisi untuk melanjutkan belajar astronomi di tingkat universitas. Hal ini akan berdampak positif untuk meningkatkan jumlah astronom generasi penerus di Indonesia, dan mutu pendidikan.

Selain itu, dampak khusus yang dirasakan oleh pelajar peserta olimpiade atau kompetisi, yaitu menambah wawasan astronomi, meraih penghargaan, mendapatkan pengalaman berharga, mendapat kesempatan edukasional (pembinaan, tawaran beasiswa kuliah), serta memperluas jejaring dan persahabatan.

5 PENUTUP

Kurikulum pendidikan di Indonesia belum sepenuhnya mengakomodasi astronomi. Olimpiade atau kompetisi sains di bidang astronomi dapat menjadi ajang untuk mendorong penguasaan astronomi di jenjang Pendidikan menengah (SMA/MA). Terdapat berbagai dampak positif, yaitu mendorong penguasaan astronomi bagi pelajar dan

tenaga pendidik, menjaring siswa/siswi unggul, serta dalam jangka panjang meningkatkan mutu pendidikan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Panitia kegiatan Seminar Panorama Antariksa dan Pusat Prestasi Nasional, Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi.

6 PUSTAKA

- Aprilia, Malasan H. L., Arifyanto, M.I., Sugianto, Y., Hakim, M.I., Puspitarini, L. & Kunjaya, C., 2018, *Proceeding of Communicating Astronomy with the Public Conference*, Fukuoka Japan, p. 195
- Stachowski, G., 2021, *Proceedings for the 3rd Shaw-IAU workshop on Astronomy for Education*
- Soonthornthum B., & Kunjaya C., 2011, *Eur. J. Phys* 32, pp S15 – S20
- Zelko, 2021, *Proceedings for the 3rd Shaw-IAU workshop on Astronomy for Education*

Penggunaan Media Simulasi Visual untuk Mengurangi Miskonsepsi Siswa pada Materi Astronomi dalam Mata Pelajaran Geografi SMA

M.P. Lestari^{1*} dan H. Wulandari²

¹SMAN 1 Pangkalpinang, Pangkalpinang, Indonesia

²Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: meryanipujilestari28@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian dilatarbelakangi oleh banyaknya kesalahan siswa dalam memahami salah satu materi astronomi, yaitu sistem Bumi - Bulan dan Matahari, pada pelajaran Geografi SMA. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi miskonsepsi siswa dan mengetahui efektifitas penggunaan media simulasi visual dalam mengurangi miskonsepsi tersebut. Penelitian ini adalah penelitian eksperimen dengan menggunakan desain penelitian *one group pre-test – post-test* dengan populasi sejumlah 211 siswa kelas X SMAN 1 Pangkalpinang Tahun Ajaran 2020-2021. Pengumpulan data menggunakan tes diagnostik *multiple four-tier test* dengan kombinasi metode CRI (*Certainty Responses of Index*). Penelitian menunjukkan bahwa: (1) miskonsepsi yang paling banyak dialami siswa adalah pada konsep efek Coriolis, gerak semu harian Matahari, gerak semu tahunan Matahari, perbedaan panjang siang dan malam, intensitas penyinaran Matahari dan gerhana; (2) setelah diberikan pembelajaran menggunakan media simulasi visual persentase siswa yang mengalami miskonsepsi menurun; (3) penurunan rata-rata miskonsepsi individu siswa sebesar 76,32% (kategori tinggi), dan penurunan miskonsepsi rata-rata terhadap tiap butir soal sebesar 96,91% (kategori tinggi). Dapat disimpulkan penggunaan media simulasi visual efektif dalam mengurangi miskonsepsi pada siswa kelas X SMAN 1 Pangkalpinang.

Kata Kunci: miskonsepsi- sistem Bumi Bulan dan Matahari - media simulasi visual

1 PENDAHULUAN

Pelajaran Geografi dapat dijadikan sebagai sarana memperkenalkan pengetahuan astronomi di sekolah. Materi astronomi dalam pelajaran Geografi SMA secara eksplisit dicakup dalam Kompetensi Dasar (KD) 3.4 “Menganalisis Dinamika Planet Bumi sebagai Ruang Kehidupan”, yang diberikan pada siswa kelas X semester ganjil. Pada KD ini salah satunya dibahas dampak rotasi dan revolusi Bumi terkait dengan topik astronomi sistem Bumi - Bulan dan Matahari, yang juga merupakan salah satu topik yang dicakup dalam materi Kompetisi Sains Nasional bidang Kebumihan dan Astronomi.

Berdasarkan penelitian sebelumnya, siswa seringkali mengalami miskonsepsi terhadap konsep astronomi (Trumper, 2001). Miskonsepsi adalah pengetahuan yang disimpan oleh siswa sesuai dengan konsep yang mereka yakini, namun konsep tersebut tidak sesuai dengan konsep ilmiah yang diterima saat ini (Fowler dan Jaoude, 1987). Miskonsepsi yang terjadi pada siswa seringkali tidak teridentifikasi, karena umumnya tes yang digunakan oleh guru merupakan tes ilmu pengetahuan. Oleh karena itu diperlukan tes yang dapat mengidentifikasi miskonsepsi, seperti menggunakan tes diagnostik miskonsepsi *multiple four-tier test* dengan CRI (Treagust, 1988). Untuk mengurangi miskonsepsi dibutuhkan media pembelajaran, salah satunya berupa media simulasi visual.

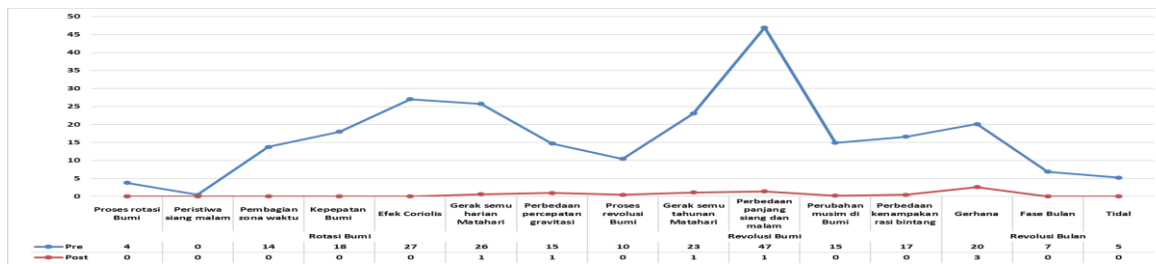
2 METODE

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen dengan desain penelitian *one group pre test – post test*. Populasi penelitian adalah seluruh siswa Kelas X SMAN 1 Pangkalpinang tahun ajaran 2020 - 2021 yang mendapatkan mata pelajaran Geografi (siswa peminatan IPS maupun siswa lintas minat Geografi MIPA) berjumlah 211 siswa. Pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan tes diagnostik *multiple four-tier test* yang dimodifikasi dengan metode *Certainty of Response Index* (CRI). Soal tes berjumlah 24 buah dan terdiri atas 4 tingkat pertanyaan, yaitu tingkat 1 berupa pertanyaan dengan pilihan jawaban benar-salah, tingkat 2 berupa pertanyaan tentang tingkat keyakinan dengan skala CRI (0-5) atas jawaban pada pertanyaan tingkat satu, tingkat 3 berupa pertanyaan mengenai alasan terhadap jawaban pertanyaan tingkat satu dan tingkat 4 berupa pertanyaan tentang tingkat keyakinan dengan skala CRI (0-5) atas jawaban pertanyaan tingkat tiga. Siswa dikategorikan mengalami miskonsepsi jika memenuhi kriteria seperti pada Tabel 1.

Sebelum digunakan sebagai instrumen penelitian, dilakukan uji coba untuk menilai kelayakan soal.

Tabel 1. Kriteria diagnostik miskonsepsi empat tingkat dengan CRI (Prawira et al., 2020).

Tkt 1	Tkt 2	Tkt 3	Tkt 4	Kategori
Salah	CRI > 2.5	Salah	CRI > 2.5	Miskonsepsi



Gambar 1. Grafik perbandingan persentase miskonsepsi siswa sebelum dan setelah perlakuan.

Penskoran dilakukan pada tingkat 1 dan tingkat 3 untuk melakukan uji validitas, reliabilitas, tingkat kesukaran dan daya pembeda. Hasil uji coba menunjukkan terdapat 10 soal kategori mudah dan 14 soal kategori sedang, reliabilitas soal cukup, validitas beragam, memiliki daya beda, sehingga instrumen dinyatakan layak digunakan untuk penelitian.

3 HASIL PENELITIAN

Sebelum penelitian dilakukan, siswa telah mendapat materi pembelajaran dampak rotasi dan revolusi Bumi dari guru kelas. Pengetahuan yang telah diterima siswa tersebut dianggap sebagai prakonsepsi dalam penelitian ini. Prakonsepsi ini diuji dengan *pre-test* untuk mendeteksi miskonsepsi siswa sebelum perlakuan.

Penelitian mengidentifikasi bahwa pada topik dampak rotasi dan revolusi Bumi serta revolusi Bulan, miskonsepsi yang paling banyak dialami siswa adalah pada konsep efek Coriolis, gerak semu harian Matahari, gerak semu tahunan Matahari, perbedaan panjang siang dan malam, intensitas penyinaran Matahari dan gerhana.

Perlakuan dengan media simulasi visual diberikan untuk mengurangi miskonsepsi pada konsep efek Coriolis, yaitu siswa diberikan kesempatan untuk meningkatkan pemahaman konsep dengan cara mengeksplorasi simulator dari JavaLab (<https://javalab.org/en/>). Selanjutnya, untuk konsep gerak semu dan tahunan Matahari digunakan *motion of the sun simulator* dari Astro-UNL (<https://astro.unl.edu/>). Simulator ini dapat memperagakan gerak Matahari di langit, yang menunjukkan perubahan posisi harian dan musiman Matahari. Melalui simulasi dengan bantuan alat peraga dan eksplorasi menggunakan *daylight simulator*, *Illuminated areas simulator* serta *lunar phase simulator* dari Astro-UNL (<https://astro.unl.edu/>) siswa dapat meningkatkan pemahaman terhadap konsep perbedaan panjang siang dan malam, intensitas penyinaran Matahari dan gerhana.

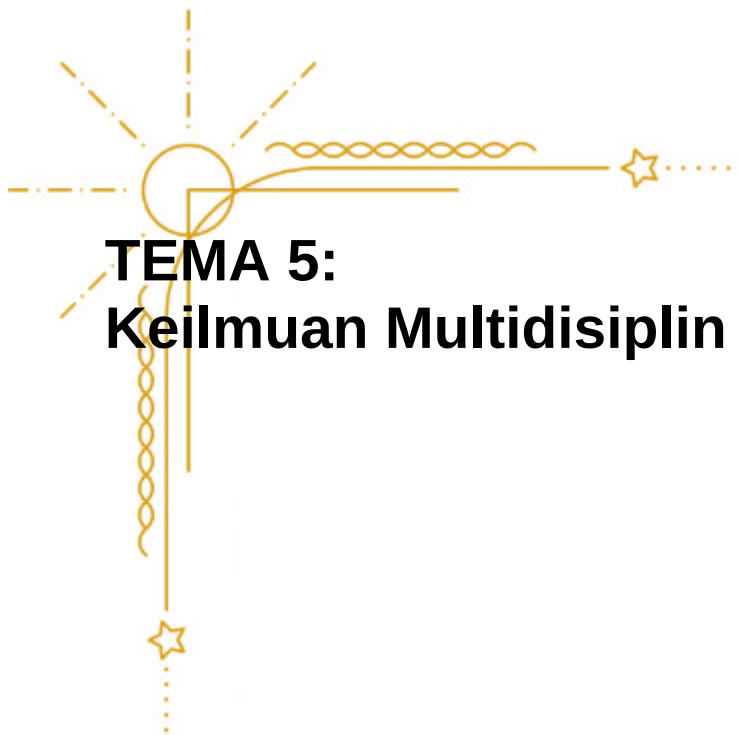
Penggunaan media simulasi memudahkan guru dalam menjelaskan konsep yang abstrak kepada siswa, membantu siswa memahami konsep dengan cara eksplorasi mandiri, serta dapat memotivasi siswa, sehingga siswa yang mengalami miskonsepsi berkurang (lihat Gambar 1). Secara rata-rata, setiap siswa mengalami penurunan miskonsepsi sebesar 76,32% (kategori tinggi). Sementara itu, secara rata-rata miskonsepsi siswa pada tiap butir soal menurun sebesar 96,91% (kategori tinggi) setelah dilakukan perlakuan. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan media simulasi visual sangat efektif dalam menurunkan miskonsepsi siswa pada konsep-konsep yang diujikan

4 KESIMPULAN

1. Penggunaan soal diagnostik miskonsepsi pilihan ganda empat tingkat dengan kombinasi CRI layak digunakan untuk mengidentifikasi miskonsepsi berdasarkan hasil uji validitas.
2. Profil miskonsepsi berhasil diidentifikasi dari jawaban siswa yang paling banyak salah, yaitu mengenai konsep efek Coriolis, gerak semu harian Matahari, gerak semu tahunan Matahari, perbedaan panjang siang dan malam, intensitas penyinaran Matahari dan gerhana.
3. Penggunaan media simulasi visual dapat menurunkan persentase miskonsepsi rata-rata siswa kelas X SMAN 1 Pangkalpinang. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan media simulasi visual dalam pembelajaran sangat efektif dalam mengurangi miskonsepsi siswa.

5 PUSTAKA

- Fowler & Jaoude. 1987. In Proceedings of the Second International Seminar on Misconceptions and Educational Str.
- Prawira, et al. 2020. International Journal of Scientific and Research Publications, Vol 10, DOI: 10.29322/IJSRP.10.01.2020.p9769.
- Trumper, Ricardo. 2001. Research in Science & Technological Education, vol 19. doi: 10.1080/02635140120046259.
- Treagust, D. 1998. Internasional Journal of Science Education 10(2). 159-169.



TEMA 5:

Keilmuan Multidisiplin terkait Astronomi

Cahaya Fajar Sidik di Indonesia, Suatu Tinjauan terhadap Riset Para Peneliti Ilmu Falak Berlatarbelakang Nahdlatul Ulama

KH S. Nawawi^{1*}, D. Fahrurrazi², KH A. M. Zahid³, KH M. Hasan³, HM Basthoni^{4,11}, I. Fahmi⁵, E. P. Arumaningtyas⁸, N. Rohmah⁹, I. Qustholaani¹, R. Nugraha^{1,12}, S. Ahadi^{1,12}, KH A. Y. Fattah¹, KH Shofiyulloh⁶, D. Effendi^{1,13}, Khafid^{1,14}, H. Setyanto¹, A. Junaidi⁸, KH I. Ismail¹, M. Arkanuddin⁷, S. Anam¹⁰ dan M. M. Sudibyo¹

¹Lembaga Falakiyah PBNU, Jakarta, Indonesia; ²Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Sleman, DIY, Indonesia; ³Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Gresik, Jawa Timur, Indonesia; ⁴Lembaga Falakiyah PWNu Jawa Tengah, Indonesia; ⁵Lembaga Falakiyah PWNu DKI Jakarta, Indonesia; ⁶Lembaga Falakiyah PWNu Jawa Timur, Indonesia; ⁷Lembaga Falakiyah PWNu DIY, Indonesia; ⁸Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Ponorogo, Jawa Timur, Indonesia; ⁹PCINU Jepang, Jepang; ¹⁰Institut Agama Islam Ngawi, Jawa Timur, Indonesia; ¹¹UIN Walisongo, Semarang, Jawa Tengah, Indonesia; ¹²Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta, Indonesia; ¹³Lembaga Antariksa dan Penerbangan Nasional, Jakarta, Indonesia; ¹⁴Badan Informasi Geospasial, Jakarta, Indonesia.

*E-mail: marufinsudibyo@gmail.com

ABSTRAK

Cahaya fajar adalah ketampakan sinar Matahari yang telah terbiaskan, terhambur dan terserap dalam atmosfer di atas horizon timur jauh sebelum Matahari terbit. Ketampakan cahaya fajar merupakan fungsi *sun depression angle* (SDA) relatif terhadap horizon timur. Bagi Umat Islam, awal ketampakan cahaya fajar merupakan penanda awal waktu Subuh. Akhir-akhir ini muncul pertanyaan berapa tinggi Matahari saat awal waktu Subuh di Indonesia. Makalah ini mendiskusikan kerja para peneliti cahaya fajar sidik berlatarbelakang Nahdlatul Ulama sejak 2010 hingga 2020. Instrumen penelitian adalah kamera (sensor CCD/CMOS) dan *Sky Quality Meter* yang sebagian besar diarahkan ke horizon. Data ditampilkan dalam kurva kecerlangan sebagai fungsi SDA. Kurva dianalisis lewat metode gradien, modus, visual, solver dan pendekatan fungsi linear guna menemukan titik belok kurva SDA. Dari riset-riset itu diperoleh 249 himpunan data dengan 37 data diantaranya (dengan titik belok kurva SDA $< -18^\circ$) dipandang layak untuk dianalisis. Ke-37 data tersebut bersifat homogen yang berasal dari titik pengamatan gelap (skala Bortle maksimum 3), tanpa cahaya Bulan dan langit cerah. Tujuhbelas dari 37 himpunan data mengandung ketampakan fajar kizib yang membentuk pola linear. Titik belok kurva SDA untuk 37 himpunan data tersebut adalah $-19,576 \pm 0,943^\circ$. Berdasarkan prinsip nilai terkecil yang dikombinasikan faktor optimasi untuk toleransi fiki (*ihityat*) maka nilai terendah bagi awal waktu Subuh di Indonesia dalam riset-riset tersebut adalah pada SDA -20° .

Kata Kunci: Nahdlatul Ulama – fajar sidik – *sun depression angle* -20°

1 PENDAHULUAN

Waktu ibadah harian wajib bagi Umat Islam merupakan fungsi posisi Matahari, baik langsung maupun tak langsung. Waktu Subuh berdasar pada berkas cahaya Matahari dari timur yang diterima satu titik di permukaan Bumi setelah memperoleh beragam perlakuan saat melintasi atmosfer. Berkas cahaya itu akan terlihat di langit timur sebagai cahaya fajar selama Matahari belum terbit. Cahaya fajar adalah analog dengan cahaya senja di langit barat pasca Matahari terbenam. Meski kedudukan fikihnya sedikit berbeda (Shofiyulloh, 2020).

Fikih membedakan cahaya fajar ke dalam dua jenis: fajar sidik (fajar–nyata) dan fajar kizib (fajar–semu). Fajar sidik memiliki struktur melebar di horizon timur dan lebih terang dibanding fajar kizib. Sebaliknya struktur fajar kizib mirip segitiga dengan alas berimpit pada horizon (Fatah, 2021). Struktur fajar kizib memberikan kesan menyerupai fenomena cahaya zodiak.

Hanya kehadiran fajar sidik yang menentukan waktu Subuh. Intensitas cahaya fajar sidik merupakan fungsi tinggi Matahari di bawah horizon timur atau *sun depression angle* (SDA). Semakin rendah jarak sudut Matahari terhadap horizon (semakin kecil SDA) maka semakin terang cahaya fajar sidik. Terbitnya cahaya fajar sidik ditandai oleh titik belok kurva pada kecerlangan langit di atas horizon timur. Kurva yang semula horizontal (nilai gradien konstan atau nol) sebagai representasi latar–belakang malam mendadak berbelok menjadi tidak horizontal (Basthoni, 2020).

Perbincangan fajar sidik di Indonesia telah mengemuka dalam lebih dari satu dasawarsa terakhir, yang mempertanyakan penggunaan SDA -20° baik pada Kementerian Agama RI maupun Nahdlatul Ulama dan ormas–ormas Islam lainnya. Sejumlah riset diselenggarakan dalam menjawab pertanyaan tersebut. Selain yang ditinjau dalam makalah ini, riset fajar sidik yang menonjol misalnya aneka riset yang dikompilasi Dhani Herdiwijaya (Herdiwijaya, 2020). Berdasarkan 251 data dalam

kompilasi tersebut maka itu menyimpulkan titik belok kurva pada SDA $-18,67^\circ$ ($R^2 = 0,988$) dan tidak berhasil mendeteksi cahaya zodiak.

Cahaya zodiak menempati posisi penting dalam perbincangan aspek ibadah fajar sidik. Cahaya zodiak tersurat pada hadis-hadis Rasulullah SAW sebagai fajar kizib. Deskripsinya menyerupai ekor serigala, yakni mirip segitiga (Fatah, 2021). Cahaya zodiak adalah cahaya baur yang muncul di atas horizon timur jauh sebelum Matahari terbit dan di atas horizon barat jauh setelah Matahari terbenam. Cahaya zodiak merupakan produk hamburan cahaya Matahari pada debu-debu antarplanet (Hanner, 1976). Debu-debu itu kemungkinan dipasok komet-komet keluarga Jupiter (Schulz dkk, 2015). Untuk lingkungan dekat Bumi, sumber debu kemungkinan adalah Mars (Jorgensen dkk, 2021). Sementara fajar sidik adalah produk hamburan, pembiasan dan serapan cahaya Matahari dalam atmosfer Bumi (Shariff dkk, 2013).

2 METODOLOGI

Makalah ini mendiskusikan kerja para peneliti cahaya fajar sidik yang berlatar-belakang Nahdlatul Ulama selama periode 2010–2020. Mereka terhimpun dalam Tim Kajian Awal Waktu Subuh yang dibentuk Lembaga Falakiyah Pengurus Besar Nahdlatul Ulama lewat SK no. 01/SK/LF–PBBU/XII/2020.

Penelitian mereka berlangsung setempat-setempat dengan instrumen bervariasi dari kamera (sensor CCD atau CMOS) hingga Sky Quality Meter (SQM). Mayoritas instrumen tidak diarahkan ke zenith. Citra kamera diproses dengan *software Iris* atau *ER Mapper (false color)* guna memperoleh data numerik. Sementara SQM langsung memproduksi data numerik.



Gambar 1. Contoh sampel data, cahaya zodiak (atas) yang tampak bersamaan dengan cahaya fajar-nyata (bawah). Panah menunjukkan kedudukan ekliptika. Diabadikan di Kolbano (NTT) pada 27 November 2019. (Sumber : Ismail Fahmi, 2019).

Data-data numerik tiap tanggal pengukuran ditampilkan dalam kurva kecerlangan langit dengan sumbu SDA dan kecerlangan langit (dalam mag/arcsec² untuk SQM dan kecerlangan relatif untuk kamera). Kurva dianalisis dengan salah satu dari metode gradien, modus, visual, solver (MS Excell) dan pendekatan fungsi linear guna menentukan titik belok kurva dan nilai SDA-nya.

2.1 Riset Nihayatur Rohmah

Riset berlangsung pada periode 2010–2013 dengan titik observasi multilokasi (Klaten, Pati, Madiun, Boyolali, Yogyakarta dan Bandung). Instrumennya kamera Canon EOS 400D dan Canon Powershoot A480 yang diarahkan ke horizon timur. Dari riset mandiri untuk dalam kerangka penulisan tesis dan disertasi ini diperoleh 53 data *fajar sidik* (25 data dari Madiun, 18 data dari lokasi lain).

2.2 Riset Djawahir Fahrurrazi dkk

Riset dilaksanakan periode Juli–September 2012 dengan titik observasi di pantai Pati (Jawa Tengah). Instrumennya kamera Canon 1000D yang diarahkan ke horizon timur. Dari riset bersama peneliti DTGD FT UGM Yogyakarta ini diperoleh empat data fajar sidik.

2.3 Riset Eka Puspita Arumaningtyas

Riset berlangsung pada periode 2011–2012 dengan titik observasi multilokasi (Jombang, Bandung, Cimahi dan Lembang). Instrumennya SQM yang diarahkan ke empat arah mata angin setinggi 45° dari horizon. Dari riset bersama peneliti Departemen Astronomi FMIPA ITB Bandung ini diperoleh 121 data fajar sidik.

2.4 Riset Imam Qusthalaani

Riset dilaksanakan pada periode Mei–Juni 2018 dengan titik observasi di Rembang (Jawa Tengah). Instrumennya kamera Canon EOS 100D dan SQM LU–DL yang diarahkan ke horizon timur. Dari riset mandiri dalam kerangka penulisan tesis ini diperoleh enam data fajar sidik.

2.5 Riset Ismail Fahmi

Riset berlangsung pada periode 2018–2019 dengan titik observasi multilokasi (Kolbano, Labuan Bajo dan Belitung). Instrumennya kamera yang diarahkan ke horizon timur. Dari riset bersama peneliti Kementerian Agama RI ini diperoleh satu data fajar sidik.

2.6 Riset HM Basthoni

Riset dilaksanakan pada periode Mei–Desember 2019 dengan titik observasi multilokasi (Semarang,

Karimunjawa, Bawean, Batam dan Lampung). Instrumennya SQM yang diarahkan ke horizon timur. Dari riset mandiri dalam kerangka penulisan disertasi ini ini diperoleh sembilan data fajar sidik.

2.7 Riset LF PCNU Gresik

Riset berlangsung pada periode 2019–2020 dengan titik observasi multilokasi (Bawean dan Banyuwangi). Instrumennya SQM dan kamera Raspi (CMOS) yang diarahkan ke horizon timur. Dalam riset mandiri ini diperoleh 42 data fajar sidik.

2.8 Riset Rukman Nugraha dkk

Riset dilaksanakan pada periode September–Desember 2019 dengan titik observasi multilokasi (Depok, Tangerang, Bengkulu, Labuan Bajo, Karimunjawa dan Subang). Instrumennya SQM yang diarahkan ke zenith. Dari riset bersama peneliti sub bidang gravitasi dan tanda waktu BMKG ini diperoleh 13 data fajar sidik.

3 PEMBAHASAN

3.1 Cahaya zodiak

Secara keseluruhan para peneliti memperoleh 249 himpunan data dengan 17 himpunan data yang lengkap dengan cahaya zodiak, baik secara kasatmata atau instrumental (gambar 1). Ke-17 himpunan data itu dikategorikan sebagai data Kelompok A (lampiran tabel 1). Mereka berasal dari Bawean & Banyuwangi (keduanya Jawa Timur), Kolbano (NTT) dan Labuan Bajo (NTB).

Ketampakan cahaya zodiak ditandai oleh peningkatan gradual kecerlangan langit hingga membentuk pola linear (tabel 3 dan gambar 2). Pola linear itu bisa dibedakan dari pola eksponensial pada peningkatan kecerlangan langit yang hadir bersamaan dengan ketampakan fajar sidik. Terdeteksinya cahaya zodiak pada himpunan data Kelompok A merupakan yang pertama di Indonesia. Cahaya zodiak terlihat pada titik observasi dengan kecerlangan langit minimum 21 mag/arcsec².

Dari sisi ilmu falak, penyebutan cahaya zodiak yang disusun fajar sidik untuk satu lokasi yang sama dalam beberapa hadis Rasulullah SAW mengindikasikan tidak sembarang lokasi yang dapat digunakan dalam observasi fajar sidik. Berdasarkan data Kelompok A, maka lokasi tersebut harus gelap

Tabel 3. Contoh fungsi linear cahaya zodiak dari 3 sampel data (lokasi Banyuwangi)

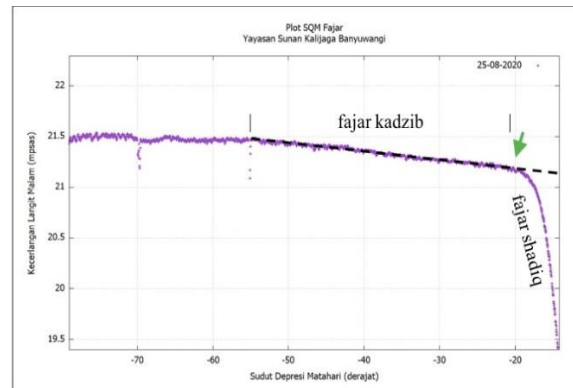
Data	Fungsi linear	SDA
24-08-20	$i = -0,0083h + 21,03$ ($R^2=0,98$)	19,45
25-08-20	$i = -0,0083h + 21,02$ ($R^2=0,99$)	20,19
28-08-20	$i = -0,0032h + 21,15$ ($R^2=0,99$)	20,39

dengan skala Bortle maksimum 3 (kecerlangan langit > 21,3 mag/arcsec²).

3.2 Terbitnya fajar sidik

Titik belok data Kelompok A merupakan titik belok fajar. Saat SDA sudah lebih besar dari titik belok fajar maka peningkatan kecerlangan langit telah berganti dari pola linear menjadi pola eksponensial yang merupakan penanda terbitnya fajar sidik. Pada 232 himpunan data yang bukan tergolong Kelompok A, muncul pertanyaan apakah nilai SDA mereka berbeda dibanding nilai SDA dari Kelompok A?

Untuk menjawabnya dilaksanakan uji dua rata-rata (*t-test*) didahului reduksi data. Ternyata hanya data dengan $SDA < -18^\circ$ yang lolos dan membentuk Kelompok B berisi 20 data (lampiran tabel 2). Uji normalitas Anderson–Darling terhadap kelompok ini menghasilkan $p = 0,381$ sehingga data berdistribusi normal. Reduksi data juga dilakukan pada Kelompok A. Pada $N = 9$ maka uji normalitas Anderson–Darling menghasilkan $p = 0,312$ sehingga distribusinya juga normal.



Gambar 2. Contoh kecerlangan langit dari titik observasi Banyuwangi pada 25 Agustus 2020. Nampak pola linear yang menandakan cahaya zodiak (*fajar kadzib*) dan pola eksponensial yang menandakan cahaya fajar–nyata (*fajar shadiq*). (Sumber: LF PCNU Gresik, 2020.)

Uji homogenitas Fischer F pada Kelompok A dan B itu menghasilkan $p\text{-two tail} = 0,057$. Maka keduanya bersifat homogen. Uji *t-test two sample assuming equal variances* menghasilkan $p\text{-one tail} = 0,204$. Maka data pada Kelompok A maupun Kelompok B adalah sama pada tingkat kepercayaan 95 %. Sehingga titik belok kurva pada seluruh data yang mempunyai $SDA < -18^\circ$ dapat digunakan dalam menentukan terbitnya fajar sidik.

Nilai rata-rata SDA untuk gabungan data kelompok A dan kelompok B adalah $-19,576 \pm 0,943^\circ$.

3.3 Awal Waktu Subuh

Dalam kajian fikih dikenal adanya faktor toleransi (*ihtiyat*). Yaitu faktor optimasi untuk pengamanan, yang ditambahkan dalam hasil perhitungan / pengamatan agar dapat diterapkan untuk kepentingan ibadah dengan memberikan rasa tenang dan nyaman.

Dengan nilai rata-rata SDA $-19,576 \pm 0,943^\circ$ maka diperoleh rasionalisasi nilai SDA terbitnya fajar sidik pada riset-riset tersebut adalah $-20,5^\circ$. Namun apabila ditambahkan faktor toleransi fikih terkait waktu salat, maka nilai SDA $-20,5^\circ$ perlu dibulatkan ke atas menjadi -20° . Sehingga cukup untuk rasional menyimpulkan awal waktu Subuh di Indonesia terjadi pada SDA -20° .

4 KESIMPULAN

Telah dilaksanakan tinjauan terhadap riset-riset dari para peneliti fajar sidik yang berlatar belakang Nahdlatul Ulama. Hasilnya dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Terdapat 249 himpunan data fajar sidik yang diperoleh 8 peneliti/kelompok peneliti dalam periode 2010–2020. Data-data itu diperoleh dari instrumen kamera (sensor CCD/CMOS) dan SQM yang ditempatkan di P. Jawa dan sekitarnya (Kep. Karimunjawa, P. Bawean), P. Sumatera dan sekitarnya (Kep. Riau, Kep. Bangka Belitung) dan Kep. Bali–Nusatenggara.
2. Terdapat 17 himpunan data bagian Kelompok A yang meliputi ketampakan cahaya zodiak. Data Kelompok A berasal dari titik observasi gelap (skala Bortle maksimum 3).
3. Semua data dengan SDA $< -18^\circ$ dapat digunakan untuk memperoleh nilai rata-rata SDA terbitnya fajar sidik di Indonesia, yakni $-19,576 \pm 0,943^\circ$.
4. Dengan mempertimbangkan faktor optimasi toleransi dalam fikih, maka cukup rasional untuk

menyatakan awal waktu Subuh di Indonesia adalah pada SDA -20° .

Ucapan Terima Kasih

Lembaga Falakiyah PBNU menyampaikan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah mendukung aktivitas observasi cahaya fajar dari para peneliti. Yaitu Kementerian Agama RI, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang dan Observatorium Imahnoong.

5 PUSTAKA

- Shofiyulloh. 2021, *Awal Subuh Fajar Sodik*, kajian ke-5 TKAWS LF PBNU, 27 Februari 2021.
- Fatah, AY. 2021, *Perspektif Fiqih Awal Waktu Subuh*, kajian ke-5 TKAWS LF PBNU, 27 Februari 2021.
- Rohmah, N. 2020, *Polemik Fajar*, kajian ke-1 TKAWS LF PBNU, 6 Juni 2020.
- Basthoni, HM. 2020, *Laporan Pengamatan Fajar*, kajian ke-2 TKAWS LF PBNU, 10 Desember 2020.
- Qusthalaani, I. 2021, *Observasi Fajar Sidik*, kajian ke-3 TKAWS LF PBNU, 9 Januari 2021.
- Arumaningtyas, EP. 2021, *Penentuan Shubuh dengan SQM*, kajian ke-3 TKAWS LFPBNU, 9 Januari 2021.
- Fahmi, I. 2021, *Rukyatul Fajr*, kajian ke-3 TKAWS LF PBNU, 9 Januari 2021.
- Fahrurrazi, D. 2021, *Identifikasi Posisi Matahari*, kajian ke-4 TKAWS LF PBNU, 23 Januari 2021.
- Nugraha, R. 2021, *Pengamatan Fajar & Senja di BMKG*, kajian ke-4 TKAWS LFPBNU, 23 Januari 2021.
- LF PCNU Gresik. 2021, *Pengamatan Banyuwangi*, kajian ke-4 TKAWS LFPBNU, 23 Januari 2021.
- Hanner, MS., dkk. 1976, in *Proc. of IAU Colloq 31* (eds. Elsaesser & Fechtig), Heidelberg, pp. 29.
- Schulz, R., dkk. 2015, *Nature*, 518 (7358), 216–218.
- Jorgensen, JL., dkk. 2020, *J. of Geoph. Res. Planet*, 126 (3), doi10.1029/2020JE006509.
- Shariff, NNM., dkk. 2013, *Dimensi Penyelidikan Astronomi Islam*, Universiti Malaya, Kuala Lumpur.
- Herdiwijaya, D. 2020, *Penelitian Awal Waktu Shubuh berdasarkan SQM*, Munas Tarjih Muhammadiyah XXXI, 12 Desember 2020.

Lampiran

Tabel 1. Kelompok A (data observasi dengan cahaya zodiak terdeteksi).

No	Lokasi	Tanggal	Bulan di atas ufuk?	Kondisi langit	SDA titik belok kurva	Sumber
1.	Daun	8-Jul-19	Tidak	Cerah	18,689	LFNU Gresik
2.	Mombhul	9-Jul-19	Tidak	Cerah	19,940	Basthoni
3.	Mombhul	9-Jul-19	Tidak	Cerah	19,950	Basthoni
4.	Kolbano	27-Nov-19	Tidak	Cerah	20,000	Ismail Fahmi
5.	Labuhan Bajo	25-Apr-18	Tidak	Cerah	20,690	Nugraha dkk
6.	Banyuwangi	24-Aug-20	Tidak	Cerah	20,000	LFNU Gresik
7.	Banyuwangi	25-Aug-20	Tidak	Cerah	20,000	LFNU Gresik
8.	Banyuwangi	26-Aug-20	Tidak	Cerah	20,000	LFNU Gresik
9.	Banyuwangi	28-Aug-20	Tidak	Cerah	19,600	LFNU Gresik
10.	Banyuwangi	29-Aug-20	Tidak	Cerah	20,000	LFNU Gresik
11.	Banyuwangi	17-Sep-20	Ya, fase 1 %	Cerah	20,100	LFNU Gresik
12.	Banyuwangi	18-Sep-20	Tidak	Cerah	19,800	LFNU Gresik
13.	Banyuwangi	19-Sep-20	Tidak	Cerah	19,400	LFNU Gresik
14.	Banyuwangi	20-Sep-20	Tidak	Cerah	20,000	LFNU Gresik
15.	Banyuwangi	23-Sep-20	Tidak	Cerah	20,000	LFNU Gresik
16.	Banyuwangi	24-Sep-20	Tidak	Cerah	20,000	LFNU Gresik
17.	Banyuwangi	25-Sep-20	Tidak	Cerah	20,000	LFNU Gresik

Tabel 2. Kelompok B (data observasi tanpa terdeteksinya cahaya zodiak).

No	Lokasi	Tanggal	Bulan di atas ufuk?	Kondisi langit	SDA titik belok kurva	Sumber
1.	Juwiring	11-Oct-10	Tidak	—	19,1512	Nihayatur Rohmah
2.	Juwiring	21-Jul-10	Tidak	—	19,564	Nihayatur Rohmah
3.	Juwiring	27-Jul-13	Ya, fase 77 %	—	20,875	Nihayatur Rohmah
4.	Juwiring	29-Jul-13	Ya, fase 58 %	—	21,697	Nihayatur Rohmah
5.	Pati	22-Jul-12	Tidak	Cerah	19,844	Nihayatur Rohmah
6.	Kaibon	19-Aug-10	Tidak	—	20,695	Nihayatur Rohmah
7.	Kaibon	23-Aug-10	Ya, fase 97 %	—	20,169	Nihayatur Rohmah
8.	Juwiring	23-Jul-10	Tidak	—	18,036	Nihayatur Rohmah
9.	Kaibon	20-Aug-10	Tidak	—	18,265	Nihayatur Rohmah
10.	Yogyakarta	18-Sep-12	Tidak	Awan bergerak	18,066	Nihayatur Rohmah
11.	Mayangkara	5-Jul-19	Tidak	Awan bergerak	20,691	LFNU Gresik
12.	Mayangkara	5-Jul-19	Tidak	Awan bergerak	19,577	LFNU Gresik
13.	Banyuwangi	16-Sep-20	Ya, fase 4 %	Cerah	20,200	LFNU Gresik
14.	Banyuwangi	21-Sep-20	Tidak	Cerah	20,000	LFNU Gresik
15.	Banyuwangi	29-Sep-20	Tidak	Cerah	20,000	LFNU Gresik
16.	Rembang	16-Jun-18	Tidak	—	18,407	Qusthalaani
17.	Pati	22-Jul-12	Tidak	Cerah	18,920	Fahrurrazi dkk
18.	Pati	23-Jul-12	Tidak	Cerah	18,446	Fahrurrazi dkk
19.	Pati	22-Sep-12	Tidak	Cerah	18,746	Fahrurrazi dkk
20.	Pati	23-Sep-12	Tidak	Cerah	18,193	Fahrurrazi dkk

Konsistensi Kalender Hijriah Nahdlatul Ulama Periode 1438–1442 H (2016–2021 M) Berdasarkan Data *Rukyat Hilal* yang Dihimpun Lembaga Falakiyah Nahdlatul Ulama

KH S. Wafa^{1*}, M. M. Sudibyo¹, H. Setyanto¹, KH M. Hasan⁶, KH Yahya¹, F. Muzakkin⁷, KH Nursodik⁸, U. Syahrana⁹, A. Y. Nafi¹⁰, Himaturrizza¹¹, J. Prasetyo^{10,18}, M. Arkanuddin⁴, I. Fahmi², Mujayun¹², I. Hilmi¹³, Hosen¹⁴, H. Elhas¹⁵, R. M. Lologau, A Z. Zuhdi¹⁶, KH K. Asmuni¹⁹, A. P. Salma⁵, A. Junaidi¹⁷ dan W. Ali³

¹Lembaga Falakiyah PBNU, Jakarta, Indonesia; ²Lembaga Falakiyah PWNU DKI Jakarta, Indonesia; ³Lembaga Falakiyah PWNU Jawa Barat, Indonesia; ⁴Lembaga Falakiyah PWNU DIY, Indonesia; ⁵Lembaga Falakiyah PWNU Aceh, Indonesia; ⁶Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Gresik, Jawa Timur, Indonesia; ⁷Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Lamongan, Jawa Timur, Indonesia; ⁸Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Kebumen, Jawa Tengah, Indonesia; ⁹Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Blitar, Jawa Timur, Indonesia; ¹⁰Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Kudus, Jawa Tengah, Indonesia; ¹¹Lembaga Falakiyah PCNU Kota Semarang, Jawa Tengah, Indonesia; ¹²Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Jombang, Jawa Timur, Indonesia; ¹³Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Situbondo, Jawa Timur, Indonesia; ¹⁴Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Sampang, Jawa Timur, Indonesia; ¹⁵Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Pamekasan, Jawa Timur, Indonesia; ¹⁶Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Jepara, Jawa Tengah, Indonesia; ¹⁷Lembaga Falakiyah PCNU Kab. Ponorogo, Jawa Timur, Indonesia; ¹⁸Observatorium pendidikan al-Buruuj, Kudus, Jawa Tengah, Indonesia; ¹⁹Ponpes Bumi Damai Annuriyah, Jember, Jawa Timur, Indonesia.

*E-mail: marufinsudibyo@gmail.com

ABSTRAK

Rukyat hilal adalah dasar penetapan setiap awal lunasi dalam Kalender Hijriah Nahdlatul Ulama yang dikelola Lembaga Falakiyah Nahdlatul Ulama. Lunasi Hijriah yang baru terjadi saat terlihatnya hilal dan jika sebaliknya maka lunasi Hijriah berjalan digenapkan 30 hari. Dasar penetapan tersebut membuat Kalender Hijriah Nahdlatul Ulama bersifat kalender observasional. Karena sifat observasi yang selalu membuka peluang bagi tidak terlihatnya benda langit acuan, maka terdapat asumsi bahwa kalender observasi dapat bersifat inkonsisten terhadap dasar-dasarnya. Telah terlaksana 60 aktivitas *rukyat hilal* sepanjang periode 1438–1442 H (2016–2021 M). Masing-masing melibatkan titik-titik rukyat dalam jumlah bervariasi, mulai 8 hingga 50 titik. Rukyat hilal dilaksanakan dalam 3 moda: mata telanjang, mata dengan teleskop/sejenis dan instrumen pencitra. Posisi setiap titik, jenis instrumen dan panorama langit barat dicatat lalu ditabulasikan berbasis algoritma Jean Meeus pada kondisi toposentrik, *airless* dan *geometric sunset*. Dalam 60 lunasi terdapat 26 lunasi Hijriah yang menghasilkan laporan positif dengan 81 data laporan positif. Terdiri atas 55 data kasatmata, 8 data kasat teleskop dan 18 data kasat citra. Implementasinya menunjukkan konsistensi Kalender Hijriah Nahdlatul Ulama. Umur tiap lunasi Hijriah selalu 29 atau 30 hari. Dalam periode itu terdapat tiga tahun biasa yang berdurasi 354 hari, yakni 1438, 1439 dan 1441 H. Sebaliknya terdapat dua tahun kabisat yang berdurasi 355 hari, yakni 1440 dan 1442 H.

Kata Kunci: *Nahdlatul Ulama–kalender Hijriah–rukyat*

1 PENDAHULUAN

Penanggalan Bulan adalah penanggalan berbasis pergerakan Bulan mengelilingi Bumi yang bersifat siklus dan tecermin pada periode sinodis Bulan. Periode sinodis Bulan bervariasi dari 29,2679 hari hingga 29,8376 hari (rata-rata 29,531 hari) terhitung dari konjungsi Bulan–Matahari hingga konjungsi berikutnya yang berurutan. Periode sinodis rata-rata (setelah dibulatkan) adalah dasar bagi sistem penanggalan Bulan yang digunakan lebih dari 2,7 milyar jiwa di seluruh dunia, baik dalam bentuk kala candra atau suryacandra (Ilyas, 1994 & WPR, 2021).

Kalender Hijriah adalah kala candra yang terdiri dari 12 lunasi. Setiap lunasi berumur minimal 29 hari dan maksimal 30 hari. Umur setahun Hijriah bervariasi antara 354 hari (tahun biasa) hingga 355 hari (tahun kabisat). Sebuah hari Hijriah berganti

setiap saat Matahari terbenam. Awal lunasi ditandai terlihatnya hilal. Hilal didefinisikan secara kualitatif sebagai sabit Bulan tertipis pasca konjungsi Bulan–Matahari yang sudah tampak di atas horizon barat sesaat setelah Matahari terbenam.

Kalender Hijriah Nahdlatul Ulama (KHNU) dijalankan dengan mematuhi prinsip–prinsip dasar tersebut dan pelaksanaannya diserahkan kepada Lembaga Falakiyah Nahdlatul Ulama (LFNU). Awal lunasi ditandai oleh terlihatnya hilal atas dasar *rukyat hilal* atau *istikmal* pada tanggal 29 (PBNU, 1987). Apabila hilal terlihat maka lunasi berjalan hanya berumur 29 hari dan malam itu memasuki awal lunasi yang baru. Sebaliknya jika hilal tidak terlihat maka lunasi berjalan digenapkan 30 hari dan awal lunasi ditunda sehari. Terlihatnya hilal di satu lokasi diberlakukan ke seluruh Indonesia melalui prinsip satu kesatuan wilayah hukum (*wilayatul hukmi*). *Rukyat hilal* dilaksanakan secara konsisten

untuk setiap tanggal 29 pada tiap lunasi. Sehingga tidak dibatasi hanya pada awal Ramadan, Syawal dan Zulhijjah (LFNU, 2006).

Dengan demikian KHNU merupakan kalender observasional dengan Bulan sebagai hilal menjadi benda langit acuan. Nahdlatul Ulama adalah satu-satunya organisasi kemasyarakatan Islam di Indonesia yang menyelenggarakan kalender observasional meskipun secara kuantitatif kalender ini diikuti 63 % Umat Islam di Indonesia khususnya terkait hari besar Islam (ARC, 2016). Terdapat asumsi karena hilal bisa tidak terlihat saat terjadi cuaca buruk berskala luas meski kedudukan Bulan cukup tinggi, kalender observasional dapat inkonsisten. Kasus Saudi Arabia dengan lunasi Ramadhan 1404 H berumur 28 hari dan lunasi Zulhijjah 1428 H berumur 31 hari kerap dikutip sebagai contoh inkonsistensi sejenis (ICOP, 2008).

Dalam kalender Hijriah dikenal pula kalender teoritik. Misalnya perhitungan tabular (*urfi*), yang berdasarkan umur lunasi tetap (Muharam = 30, Safar = 29, Rabiulawal = 30 dan seterusnya). Setiap 30 tahun adalah 1 daur, terbagi atas 19 tahun biasa dan 11 tahun kabisat. Jumlah hari akumulatif 1 daur adalah 10.631 hari (Khazin, 2004). Kalender teoritik tabular bersifat sederhana, tetapi tidak berlandaskan pada hilal.

Makalah ini mendiskusikan hasil kerja para pe-*rukyat* di Indonesia dalam periode 1438–1442 H (2016–2021 M). Hampir seluruh pe-*rukyat* merupakan bagian struktural–fungsional Nahdlatul Ulama dan hanya sedikit yang berasal dari jejaring luar (misalnya BMKG). Setiap laporan hilal didokumentasikan guna menguji konsistensi KHNU terhadap prinsip–prinsip dasar kalender Hijriah. Upaya dokumentasi itu juga bertujuan untuk membentuk pangkalan data hilal di Indonesia. Upaya publik seperti itu terakhir digagas lebih dari satu dasawarsa silam (Sudibyo dkk, 2009).

2 METODOLOGI

Rukyat hilal diselenggarakan dalam jejaring pe-*rukyat* LFNU yang jumlahnya bervariasi dari 8 hingga 50 titik *rukyat* dalam tiap kegiatan. *Rukyat hilal* dilaksanakan pada tanggal 29 setiap lunasi Hijriah KHNU. Tanggal 29 dinyatakan berdasarkan penetapan tanggal 1 produk *rukyat hilal* sebelumnya. Tiap penetapan tanggal 1 lunasi Hijriah dinyatakan lewat Pengumuman Awal Bulan yang dikeluarkan LFNU tingkat pusat, yaitu Lembaga Falakiyah PBNU.

Rukyat hilal diselenggarakan dengan beragam moda: mata telanjang, mata dengan teleskop dan kamera yang dirangkai teleskop. Laporan yang diperoleh menjadi laporan kasat mata, kasat teleskop

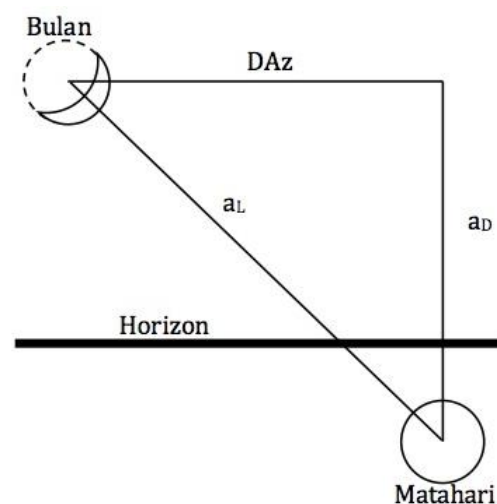
dan kasat kamera. Kondisi cuaca di horizon barat menjadi salah satu syarat pelaporan. Saksi mata laporan hilal menjalani sumpah sesuai ketentuan, khususnya pada rukyat hilal terkait awal Ramadan, Syawal dan Zulhijjah.

Laporan terlihatnya hilal diterima bila tinggi Bulan setempat $\geq 2^\circ$ (dari horizon ke pusat cakram Bulan), mengikuti kriteria *imkan rukyat* sebagai produk kesepakatan di Indonesia sejak 1998 dan masih berlaku hingga saat makalah ini ditulis. Tinggi Bulan merujuk pada perhitungan khas Nahdlatul Ulama yang disebut *hisab jama'i* (*hisab tahqiqy tadqiqy ashri kontemporer*).

Laporan hilal diklasifikasikan ke dalam laporan positif (hilal terlihat) dan laporan negatif (hilal tak terlihat). Setiap laporan positif diolah melalui algoritma Jean Meeus dengan masukan koordinat titik *rukyat*. Perhitungan pada saat Matahari terbenam mengikuti saran Audah (Odeh, 2004) yakni kondisi toposentrik, nir–atmosfer (*airless*) dan *geometric sunset*.

Keluaran laporan berupa (gambar 1):

1. beda altitude (a_D), yaitu jarak sudut vertikal antara pusat cakram Matahari dan Bulan,
2. beda azimuth (DAz), ialah jarak sudut antara pusat cakram Matahari dan Bulan yang berimpit dengan horizon,
3. elongasi (a_L), yaitu jarak sudut antara pusat cakram Matahari dan Bulan,
4. umur Bulan (Umur), yaitu selisih waktu antara konjungsi dengan Matahari terbenam,
5. lama Bulan di atas ufuk (Lag), yaitu selisih waktu dari saat Matahari terbenam hingga saat Bulan terbenam.



Gambar 1. Geometri dasar posisi Bulan dan Matahari dalam rukyat *hilal*.

Tabel 1. Jumlah hari dan tanggal 1 (awal lunasi) dalam Kalender Hijriah Nahdlatul Ulama 1438–1442 H.

No	Lunasi Hijriah	1438 H		1439 H		1440 H	
		Umur	Tanggal 1	Umur	Tanggal 1	Umur	Tanggal 1
18.	Muharam	29	3-Oct-16	29	22-Sep-17	29	11-Sep-18
19.	Safar	30	1-Nov-16	30	21-Oct-17	30	10-Oct-18
20.	Rabiulawal	30	1-Dec-16	30	20-Nov-17	30	9-Nov-18
21.	Rabiulakhir	30	31-Dec-16	29	20-Dec-17	30	9-Dec-18
22.	Jumadilawal	29	30-Jan-17	30	18-Jan-18	30	8-Jan-19
23.	Jumadilakhir	29	28-Feb-17	30	17-Feb-18	29	7-Feb-19
24.	Rajab	30	29-Mar-17	29	19-Mar-18	30	8-Mar-19
25.	Syaban	29	28-Apr-17	30	17-Apr-18	29	7-Apr-19
26.	Ramadan	29	27-Mei-17	29	17-Mei-18	30	6-Mei-19
27.	Syawal	30	25-Jun-17	30	15-Jun-18	29	5-Jun-19
28.	Zulkaidah	29	25-Jul-17	29	15-Jul-18	29	4-Jul-19
29.	Zulhijjah	30	23-Aug-17	29	13-Aug-18	30	2-Aug-19
		354		354		355	

No	Lunasi Hijriah	1441 H		1442 H	
		Umur	Tanggal 1	Umur	Tanggal 1
1.	Muharam	29	1-Sep-19	30	20-Aug-20
2.	Safar	29	30-Sep-19	29	19-Sep-20
3.	Rabiulawal	30	29-Oct-19	30	18-Oct-20
4.	Rabiulakhir	30	28-Nov-19	29	17-Nov-20
5.	Jumadilawal	29	28-Dec-19	30	16-Dec-20
6.	Jumadilakhir	30	26-Jan-20	29	15-Jan-21
7.	Rajab	30	25-Feb-20	30	13-Feb-21
8.	Syaban	29	25-Mar-20	29	15-Mar-21
9.	Ramadan	30	24-Apr-20	30	13-Apr-21
10.	Syawal	30	24-Mei-20	30	13-Mei-21
11.	Zulkaidah	29	23-Jun-20	29	12-Jun-21
12.	Zulhijjah	29	22-Jul-20	30	12-Jul-21
		354		355	

Keterangan:

- Umur dalam hari
- Jan = Januari, Feb = Februari, Mar = Maret, Apr = April, Jun = Juni, Jul = Juli, Aug = Agustus, Sep = September, Oct = Oktober, Nov = November dan Des = Desember
- Tanggal 1 Muharam 1438 H bertepatan dengan 3 Oktober 2016 (mulai 2 Oktober 2016 malam).

3 PEMBAHASAN

3.1 Data

Sepanjang periode 1438–1442 H (2016–2021 M) terdapat 60 lunasi Hijriah dengan 26 lunasi mengandung laporan positif sementara sisanya memiliki laporan negatif.

Untuk 26 lunasi dengan laporan positif, terhimpun 81 data yang terbagi atas 55 data kasat mata, 8 data kasat teleskop dan 18 data kasat kamera. Data-data tersebut dihasilkan dari rukyat 31 Oktober 2016 hingga 10 Juli 2021. Titik rukyat tersebar mulai dari P. Jawa, Sumatera, Kalimantan, Sulawesi dan P. Lombok. Laporan positif digunakan dalam penetapan tanggal 1 lunasi yang baru. Tabulasi awal lunasi Hijriah pada KHNU dapat dilihat di tabel 1.

Sementara untuk 34 lunasi yang memiliki laporan negatif, terdapat 34 data yang berasal dari satu titik, yakni titik markaz (Gedung PBNU Jakarta Pusat, koordinat 6° 11' 25" LS 106° 50' 50" BT).

Data dalam makalah ini merupakan data mentah apa adanya (sesuai laporan di lapangan). Dari sudut pandang fikih, seluruh data adalah sah. Namun analisis data dari sudut pandang ilmu falak masih dilaksanakan dan menjadi pekerjaan lanjutan dari penelitian ini.

3.2 Konsistensi kalender

Sepanjang tahun 1438–1442 H ditemukan adanya 32 lunasi berumur 30 hari dan 28 lunasi berumur 29 hari. Ditemukan pula tiga tahun biasa (1438 H, 1439 H dan 1441 H) dengan umur masing-masing 354 hari. Dan ditemukan pula dua tahun kabisat (1440 H dan 1442 H) dengan umur masing-masing 355 hari.

Sehingga prinsip jumlah hari dalam satu lunasi dan satu tahun Hijriah terpenuhi.

Jumlah hari akumulatif tahun 1438–1442 H adalah 1.772 hari. Jumlah ini sama dengan jumlah hari akumulatif untuk rentang tahun kalender teoritikal tabular. Jumlah tahun kabisatnya juga dua. Perbedaannya hanya pada nomor tahun, tahun 1439 H dan 1442 H pada kalender teoritikal tabular menjadi tahun kabisat.

Terpenuhinya jumlah hari dalam satu lunasi dan satu tahun Hijriah serta jumlah akumulatif hari dalam lima tahun Hijriah menunjukkan konsistensi KHNU meskipun sebagai kalender observasional.



Gambar 1. Contoh citra hilal pada data kasat kamera. Diabadikan dari titik rukyat Joresan Ponorogo (Jawa Timur) pada 17 Oktober 2020 dalam rukyat hilal penentuan Rabiulawal 1442 H. (Sumber : LF PCNU Ponorogo/Ahmad Junaidi, 2020)

4 KESIMPULAN

Telah dilaksanakan *rukyaat hilal* sepanjang 1438–1442 H (2016–2021 M). Hasilnya dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Terdapat 81 data laporan positif, yang terdiri atas 55 data kasat mata, 8 data kasat teleskop dan 18 data kasat kamera.
2. Penetapan tanggal 1 lunasi Hijriah pada KHNU berdasarkan data laporan positif menghasilkan 32 lunasi berumur 30 hari dan 28 lunasi berumur 29 hari dalam lima tahun.

3. Penetapan pada butir (2) tersebut juga menghasilkan 3 tahun biasa (1438, 1439 dan 1441 H) dan 2 tahun kabisat (1440 dan 1442 H) dalam lima tahun.
4. Jumlah hari akumulatif 1.772 hari, sesuai dengan jumlah hari akumulatif pada kalender teoritikal tabular yang lebih sederhana.
5. KHNU adalah konsisten.

Persembahan

Makalah ini adalah memori untuk pimpinan dan *perukyat* aktif LFNU yang telah wafat dalam periode 1438–1442 H. Yaitu KH Ahmad Ghazali Masroeri (ketua Lembaga Falakiah PBNU), kyai Uzal Syahrana (Lembaga Falakiah PCNU Blitar Jawa Timur), kyai Hosen (Lembaga Falakiah PCNU Sampang Jawa Timur) dan H Joko Prasetyo (Lembaga Falakiah PWNNU Jawa Tengah).

5 PUSTAKA

- PBNU. 1987, *Ahkamul Fuqaha Masail Diniyah Keputusan Munas Alim Ulama NU*, Cilacap, 15–18 November 1987.
- LFNU. 2006, *Pendidikan dan Latihan Pelaksana Rukyat NU*, Semarang, 17 Desember 2006.
- Ilyas, M. 1994, *Q. J. R. astr. Soc.* 35, 425–461.
- Odeh. 2004, *Exp. Astron.* 18, 39–64.
- Khazin, M. 2004. *Ilmu Falak dalam Teori dan Praktek*, Buana Putra, Yogyakarta, cetakan 1.
- Alvara Research Center (ARC). 2017, *Potret Keberagamaan Muslim Indonesia*, Jakarta, Januari 2017.
- Sudibyo, M., Arkanuddin, M., & Riyadi, ARS. 2009, in *Proc. Seminar Nasional Hilal 2009* (ed. B. Dermawan, N. Sopwan & M. Raharto), Observatorium Bosscha, Bandung.
- World Population Review (WPR). 2021, *Muslim Population 2021 & China Population of 2021* <<https://worldpopulationreview.com/>>
- ICOP. 2008, *The Official First Day Muharram 1429 AH in Different Countries* < <https://www.astronomycenter.net/icop/muh29.html>>

Lampiran. Tabel data positif 1438 – 1442 H (2016 – 2021 M)

No	Lokasi	Tanggal	a_D	a_L	DAz	Lag	Umur	Perukyat	I
1.	Tanjung Kodok	31-Okt-16	7,667	8,833	2,950	34	16,72	LFNU Lamongan	-
2.	Condrodipo	28-Mar-17	4,599	5,364	0,779	21	7,60	LFNU Gresik	-
3.	Pelabuhan Ratu	28-Mar-17	4,803	5,556	0,69	22	8,01	LF PBNU	-
4.	Condrodipo	26-Mei-17	8,986	9,912	2,094	41	14,52	LFNU Gresik	-
5.	Tanjung Kodok	26-Mei-17	8,989	9,925	2,141	42	14,55	LFNU Lamongan	-
6.	Logending	26-Mei-17	9,118	10,02	1,962	43	14,72	LFNU Kebumen	T
7.	Serang Blitar	26-Mei-17	9,024	9,910	1,897	42	14,52	LFNU Blitar	-
8.	Pelabuhan Ratu	26-Mei-17	9,212	10,12	2,040	42	14,93	LF PBNU	-
9.	Condrodipo	24-Jun-17	4,268	5,959	3,373	21	7,81	LFNU Gresik	-
10.	Watukosek	24-Jun-17	4,273	5,952	3,342	21	7,79	LFNU Pasuruan	-
11.	Kudus	24-Jun-17	4,309	6,014	3,391	22	7,94	LFNU Kudus	-
12.	Kupang	24-Jun-17	3,963	5,614	3,234	21	6,99	BMKG	K
13.	Condrodipo	22-Agt-17	7,972	8,703	0,832	35	15,94	LFNU Gresik	-
14.	Kendal	22-Agt-17	8,053	8,788	0,880	36	16,10	LFNU Semarang	-
15.	Tanjung Kodok	22-Agt-17	7,979	8,714	0,876	36	15,96	LFNU Lamongan	-
16.	Tanjung Kodok	20-Okt-17	7,578	8,742	2,851	33	15,14	LFNU Lamongan	-
17.	Kudus	20-Okt-17	7,628	8,782	2,832	34	15,24	H Joko Prasetyo	K
18.	Condrodipo	16-Apr-18	5,601	6,676	2,302	25	8,45	LFNU Gresik	-
19.	Pelabuhan Ratu	16-Apr-18	5,789	6,827	2,217	26	8,86	LF PBNU	-
20.	Condrodipo	14-Jun-18	8,184	9,013	1,479	38	14,57	LFNU Gresik	-
21.	Watukosek	14-Jun-18	8,185	9,004	1,419	39	14,56	LFNU Pasuruan	-
22.	Tanjung Kodok	14-Jun-18	8,191	9,027	1,522	39	14,6	LFNU Lamongan	-
23.	Bojonegoro	14-Jun-18	8,219	9,049	1,488	38	14,64	LFNU Bojonegoro	-
24.	Parangkusumo	14-Jun-18	8,278	9,082	1,318	40	14,7	LF PWNU DIY	K
25.	Logending	14-Jun-18	8,310	9,120	1,363	40	14,77	LFNU Kebumen	T
26.	Pulau Karya	14-Jun-18	8,398	9,252	1,644	40	15,02	LF PWNU DKI	K
27.	Condrodipo	12-Agt-18	13,84	14,56	0,374	60	24,48	LFNU Gresik	-
28.	Pamekasan	12-Agt-18	13,81	14,52	0,361	60	24,42	LFNU Pamekasan	K
29.	Sampang	12-Agt-18	13,81	14,53	0,358	60	24,44	LFNU Sampang	-
30.	Jombang	12-Agt-18	13,85	14,57	0,281	60	24,50	LFNU Jombang	K
31.	Situbondo	12-Agt-18	13,78	14,5	0,253	61	24,38	LFNU Situbondo	-
32.	Makassar	12-Agt-18	13,58	14,31	0,860	60	24,07	Raja Muda Lologau	-
33.	Kudus	12-Agt-18	13,91	14,63	0,475	60	24,61	H Joko Prasetyo	K
34.	Jepara	12-Agt-18	13,92	14,64	0,515	61	24,62	LFNU Jepara	-
35.	Yogyakarta	12-Agt-18	13,92	14,62	0,229	60	24,62	LF PWNU DIY	T
36.	Lembang	10-Sep-18	9,556	10,35	1,205	38	16,72	LF PBNU	K
37.	Condrodipo	10-Sep-18	9,362	10,17	1,361	40	16,39	LFNU Gresik	-
38.	Kudus	10-Sep-18	9,437	10,24	1,226	41	16,50	H Joko Prasetyo	K
39.	Jember	10-Sep-18	9,301	10,14	1,478	40	16,32	KH Khotib Asmuni	-
40.	Lhoknga	7-Mar-19	9,283	10,05	1,488	40	19,73	LF PWNU Aceh	K
41.	Condrodipo	5-Mei-19	6,401	7,249	1,626	29	11,55	LFNU Gresik	-
42.	Blitar	5-Mei-19	6,434	7,251	1,519	30	11,55	LFNU Blitar	-
43.	Tanjung Kodok	5-Mei-19	6,402	7,258	1,686	30	11,57	LFNU Lamongan	-
44.	Logending	5-Mei-19	6,507	7,329	1,545	30	11,75	LFNU Kebumen	K
45.	Pelabuhan Ratu	5-Mei-19	6,58	7,409	1,579	30	11,96	LF PBNU	-
46.	Ponorogo	3-Jul-19	7,752	8,505	0,610	37	15,14	LFNU Ponorogo	K
47.	Jember	3-Jul-19	7,672	8,428	0,637	36	15,01	KH Khotib Asmuni	-
48.	Condrodipo	1-Agt-19	3,745	4,788	1,571	18	7,24	LFNU Gresik	-
49.	Watukosek	1-Agt-19	3,725	4,781	1,599	19	7,23	LFNU Pasuruan	-
50.	Tanjung Kodok	1-Agt-19	3,768	4,801	1,55	20	7,27	LFNU Lamongan	-
51.	Jombang	1-Agt-19	3,744	4,798	1,596	19	7,26	LFNU Jombang	-
52.	Kudus	1-Agt-19	3,829	4,855	1,542	19	7,37	LFNU Kudus	-
53.	Joresan	29-Sep-19	9,699	10,69	2,270	43	16,00	LFNU Ponorogo	K
54.	Sidogiri	29-Sep-19	9,660	10,64	2,239	42	15,91	LFNU Pasuruan	-
55.	Jepara	29-Sep-19	9,780	10,72	2,042	42	16,05	LFNU Jepara	-

• a_D , a_L , DAZ dalam ($^{\circ}$); Lag dalam (menit) dan Umur Bulan dalam (jam)

• I : instrumen, terdiri atas K : kamera CCD/CMOS dengan teleskop , T : mata dengan teleskop, -: mata tanpa alat

Lampiran. Lanjutan...

No	Lokasi	Tanggal	a_D	a_L	DAz	Lag	Umur	Perukyat	I
56.	Lamongan	29-Sep-19	9,697	10,66	2,141	42	15,93	LFNU Lamongan	-
57.	Jombang	28-Okt-19	3,941	5,885	3,499	19	6,73	LFNU Jombang	-
58.	Condrodipo	23-Apr-20	4,425	5,448	2,063	20	7,92	LFNU Gresik	-
59.	Pasuruan	23-Apr-20	4,432	5,441	2,031	21	7,90	LFNU Pasuruan	T
60.	Bojonegoro	23-Apr-20	4,447	5,467	2,057	19	7,99	LFNU Bojonegoro	-
61.	Jember	21-Jul-20	8,432	9,557	2,673	39	16,79	KH Khotib Asmuni	-
62.	Condrodipo	21-Jul-20	8,529	9,600	2,509	39	16,87	LFNU Gresik	-
63.	Tanjung Kodok	21-Jul-20	8,557	9,612	2,462	41	16,9	LFNU Lamongan	-
64.	Joresan	21-Jul-20	8,519	9,628	2,632	39	16,93	LFNU Ponorogo	K
65.	Tuban	21-Jul-20	8,568	9,663	2,493	39	16,93	LFNU Tuban	-
66.	Pamekasan	21-Jul-20	8,496	9,570	2,515	40	16,81	LFNU Pamekasan	K
67.	Subang	21-Jul-20	8,765	9,783	2,354	42	17,22	LF PWNU Jabar	K
68.	Jombang	19-Agt-20	4,510	6,313	3,419	22	7,77	LFNU Jombang	T
69.	Jombang	17-Okt-20	8,746	9,612	1,512	39	14,84	LFNU Jombang	T
70.	Joresan Ponorogo	17-Okt-20	8,764	9,640	1,566	40	14,89	LFNU Ponorogo	K
71.	Condrodipo	17-Okt-20	8,739	9,596	1,460	39	14,81	LFNU Gresik	-
72.	Jayapura	15-Dec-20	8,476	9,268	1,174	40	16,33	BMKG	K
73.	Pelabuhan Ratu	15-Feb-21	8,755	9,460	0,798	40	16,15	LF PWNU DKI	K
74.	Jakarta	15-Feb-21	8,730	9,448	0,938	39	16,12	Hizbullah	-
75.	Condrodipo	12-Apr-21	4,279	5,138	1,524	19	7,21	LFNU Gresik	-
76.	Jember	12-Apr-21	4,279	5,119	1,463	19	7,85	KH Khotib Asmuni	-
77.	Tanjung Kodok	12-Apr-21	4,279	5,144	1,542	20	7,93	LFNU Lamongan	-
78.	Pontianak	12-Apr-21	4,186	5,231	1,989	20	8,22	LF PWNU Kalbar	-
79.	Jombang	10-Jul-21	3,640	5,569	3,410	19	9,12	LFNU Jombang	-
80.	Condrodipo	10-Jul-21	3,657	5,562	3,384	18	9,10	LFNU Gresik	T
81.	Tanjung Kodok	10-Jul-21	3,688	5,572	3,364	20	9,13	LFNU Lamongan	-

- a_D , a_L , DAZ dalam ($^{\circ}$); Lag dalam (menit) dan Umur Bulan dalam (jam)
- I : instrumen, terdiri atas K : kamera CCD/CMOS dengan teleskop , T : mata dengan teleskop, - : mata tanpa alat

Tanda Tanda Alam Sebagai Pedoman Melaut Nelayan Bugis di Pulau Kramian

Mudjijono

Balai Arkeologi DIY, Indonesia.

E-mail: ogososo@gmail.com

ABSTRAK

Pulau Kramian terdiri dari tiga desa, yaitu Desa Sudi Mampir, Wae Tuo, dan Tanjung Peleh. Tanda alam *tembus*, yaitu adanya angin dengan ditandai bergeraknya awan di langit dan bergeraknya dedaunan di ujung pohon, *pelangi buntung*, *pelangi utuh*, berkedipnya bintang *joko dolok*, dan *tabir hitam* seperti kelambu yang ada di tengah laut merupakan rambu-rambu untuk perjalanan lautnya. Tulisan dengan judul Tanda Tanda Alam Sebagai Pedoman Melaut Nelayan Bugis di Pulau Kramian akan menarik dengan mengangkat permasalahan, apa makna simbol tanda-tanda alam yang dipergunakan pegangan oleh nelayan Bugis di Pulau Kramian dan apakah cocok tanda-tanda alam itu dengan kenyataan yang terjadi? Metode partisipasi aktif digunakan dalam pengumpulan data dengan mengedepankan wawancara yang berpegangan pada pendekatan strukturalisme.

Kata kunci: Tanda-tanda alam - Nelayan - Takak - Pelangi buntung – Tembus

1 PENDAHULUAN

Pemandangan kedalaman laut dengan air yang hijau kebiruan dan barisan hutan karang setinggi dasar laut hingga permukaan air laut pada waktu tertentu akan tampak jika kita naik kapal untuk merapat di suatu pulau yang berada di tengah lautan. Kondisi semacam itu tampak mengitari setiap pulau. Masyarakat selalu memperhatikan waktu atau tanda agar tidak terhambat dengan surutnya air laut. Secara umum jika waktu menunjukkan sekitar pukul 15.00 WIB air laut di selatan Pulau Kalimantan akan berubah kemerahan, keruh mendekati kecoklatan yang berarti air dari arah daratan pulau tersebut sudah menuju ke laut utara Pulau Jawa yang berarti akan tiba waktu surut. Apabila akan mendarat sebaiknya cepat *lego jangkar*, namun jika akan bepergian harus memacu kapal ke arah selatan (laut Jawa) agar kapal tidak tersangkut di bebatuan karang.

Tanda semacam itu sangat dimengerti oleh masyarakat yang tinggal di pulau-pulau Laut Jawa paling utara, seperti Pulau Masalembu, Masakambing, dan Kramian. Kondisi itu menjadikan saya tertarik untuk mempelajari tanda-tanda alam lain yang dipakai pedoman oleh nelayan¹

di sana. Keinginan tahu itu dijawab dengan melakukan penelitian dengan permasalahan tanda-tanda alam apa yang digunakan sebagai patokan nelayan untuk *melaut*. Penelitian dilakukan pada awal bulan April, mengambil lokasi sampel Pulau Kramian², desa yang paling utara di wilayah Provinsi Jawa Timur.

Nelayan bekerja bersama-sama dalam satu kapal yang dibuat dari kayu dengan anak buah kapal (ABK) bervariasi jumlahnya antara lima hingga tujuh orang. Nelayan-nelayan tersebut berasal dari Jawa, Madura, dan Bugis³. Setiap hari sekitar pukul 16.00 WIB kapal-kapal akan ke tengah untuk memasang jala dan ditunggu semalam hingga pagi sekitar pukul 5.00 WIB diambilnya jala itu, ikan hasil *melaut* disimpan dalam kapal kemudian merapat ke pulau untuk istirahat, memperbaiki jala, dan mempersiapkan segala keperluan *melaut* di sore harinya, begitu seterusnya.

Nelayan yang mencari ikan musim itu diambil tujuh kapal yang dinahkodai orang Bugis sebagai sampel. Perlu diketahui bahwa etnis Bugis merupakan etnis yang terkenal sebagai pelaut⁴ selain etnis lain seperti Bajo atau Mandar. Mereka selalu bersama-sama baik jika istirahat atau berpindah ke daerah lainnya. Ketujuh kapal tersebut dinahkodai

¹Dalam kajian ini nelayan diartikan sebagai orang yang matapencahariannya melakukan penangkapan ikan (lihat UU RI No 31 Th 2004 Tentang Perikanan, 2005: 14). Nelayan tersebut dapat digolongkan sebagai nelayan perairan laut dan perairan umum. Lihat Effendi. I dan Oktariza.W 2008 *Managemen Agribisnis Perikanan*. Jakarta: Penebar Swadaya. Halaman: 26

²Pulau Kramian terdiri dari tiga desa, yaitu Desa Sudi Mampir, Wae Tuo (air hidup), dan Tanjung Peleh. Pulau Kramian secara administratif termasuk dalam wilayah Kecamatan Masalembu, Kabupaten Sumenep.

³Tulisan Diaspora Austronesia dan Peradaban Bahari Indonesia banyak mengutarakan data terkait bukti pelayaran yang dilakukan pelaut Nusantara ke berbagai penjuru dunia, pada Candi Borobudurpun sudah ada relief kapal. Lihat Daud Aris Tanudirjo Tanudirjo. A D 2013. *Diaspora Austronesia dan Peradaban Bahari Indonesia*. Makalah dalam Presentasi Borobudur Writer and Cultural Festival 17-20 Oktober.

⁴Masyarakat Bugis pada waktu lampau sudah memiliki undang-undang lihat Tobing. P.O. 1977. *Hukum Pelayaran Dan Perdagangan Amanna Gappa*. Ujung Pandang: Yayasan Kebudayaan Sulawesi Selatan.

oleh Tayek (belum lama almarhum), Taibek, Makmur, Fajar, Darisek, Taufik, dan Tolak. Penulis acapkali ikut di kapal Taufik, Tayek, Makmur, Fajar, dan Tolak. Mereka semua sebagai orang Bugis yang antara lain tinggal di Batulawang, Tanjung Peleh, Masalembu, dan Masakambing.

Pengumpulan data dilakukan dengan metode pengamatan, wawancara yang berbasis pada partisipasi aktif, acapkali membantu mengumpulkan ikan sehabis *tawur*⁵, membuang binatang dan barang yang tersangkut di jaring, atau memegang kemudi. Konsep kebudayaan Goodenough⁶ yang menekankan kebudayaan sebagai pengorganisasian barang-barang (ada dalam alam pikiran) yang berupa interpretasi dan pemikiran-pemikiran, dipinjam untuk memahami pemaknaan kajian ini, selain memperhatikan prinsip penulisan etnografi. Nilai budaya berupa pengetahuan tanda-tanda alam merupakan bentuk kearifan⁷ masyarakat dalam menyikapi lingkungan saat *melaut*.

Penelitian atau kajian kearifan lokal sudah banyak dilakukan, misalnya mengangkat budaya dan kearifan lokal dalam sistem konservasi tanah dan air⁸. Kajian ini mengutarakan konservasi tanah dan air dengan mengemukakan pula konsep kebudayaan Malinowski, EB Taylor, dan Herkovits. Selain itu juga mengemukakan konsep kearifan lokal. Namun paling penting kajian yang dilakukan oleh Maridi ini sangat berbeda dengan kajian kearifan lokal pada tanda-tanda alam pada nelayan Bugis di Pulau Kramian. Kemudian Kajian Kearifan Lokal Masyarakat Nelayan Perairan Pulau Abang, Kecamatan Galang, Kota Batam, Provinsi Riau yang dilakukan pada tahun 2006. Kajian ini juga mengungkapkan kearifan lokal dalam penangkapan ikan ramah lingkungan memancing *sotong* (*ngonek*) dan penggunaan *ökolonjö* untuk menangkap ikan *dingkis*⁹. Walaupun mempunyai kesamaan aktivitas nelayan yang menjadi objek kajian namun tulisan ini lebih ke cara penangkapan ikan yang berbeda dengan tanda-tanda alam yang dipakai oleh nelayan Bugis di Pulau Kramian. Pemahaman tanda-tanda alam yang dimiliki oleh nelayan di berbagai daerah merupakan kekayaan ilmu pengetahuan yang patut

untuk dipelajari dan dituangkan dalam tulisan. Tulisan ini menyajikan kajian tanda-tanda alam yang dimiliki masyarakat Pulau Kramian.

2 HASIL PENELITIAN

Nelayan Bugis di Pulau Kramian jika *melaut* masih memperhatikan tanda-tanda alam dan berpegangan pada mencari hari-hari baik dalam konsepsi kehidupannya. Mencari hari-hari baik yang dilakukan oleh masyarakat Kramian merupakan suatu perhitungan yang dilakukan oleh orang yang memahami dengan memakai simbol, mereka menyebutnya *esoso*. *Pattiro* merupakan sistem memperkirakan hari baik dengan simbol *mayat*, *isi*, *darah*, dan selamat. Cara mencari hari-hari baik lain yaitu *Epa' Tarala* (Empat Laku) dengan memakai simbol tangan yang bagian-bagiannya dinamakan *lisek* (sudah berisi/tebal), *warkeng* (di genggam kita), *copak* (ujung, kadang lepas kadang dapat dipegang), dan *monre* (punggung tangan)¹⁰.

Tanda-tanda alam yang dipakai pedoman nelayan saat *melaut*, antara lain digolongkan dalam tiga kategori, yaitu tanda (1) akan ada hujan dan angin, (2) akan lembek, dan (3) akan teduh. Hujan dengan angin antara lain ditandai dengan adanya angin tembus, mega jalan cepat, pelangi utuh, mega hitam menggulung panjang, bulan bercincin, dan bintang paling terang berkedip. Selain tanda-tanda yang berada di langit, ada pula tanda di laut antara lain permukaan laut seakan terbelah seperti ada binatang laut yang membelah bergaris dan adanya tirai hitam menghalang di laut. Angin yang lembek ditandai dengan adanya angin besar di darat, pelangi buntung, bulan purnama, dan awan putih menggulung panjang. Kemudian teduh akan ditandai dengan air laut yang membelah pendek-pendek seakan ada binatang dibalikannya dan bintang paling terang tidak berkedip.

2.1 Pembahasan

Simbol-simbol yang dilihat nelayan diterima sebagai pertanda, jika pada saat *melaut* muncul tanda yang mengisyaratkan akan ada gelombang dan angin besar, mereka akan lebih berhati-hati dan akan

⁵Menurunkan jaring yang sangat panjang (dengan ukuran antara 2-3 jambaru selesai) ke dalam laut

⁶Ahimsa. P. 1985. "Etnosains dan Etnometodologi" dalam *Masyarakat Indonesia Majalah Ilmu-Ilmu Sosial Indonesia*. Agustus Jilid XII Nomor 2. Jakarta: LIPI. Halaman: 107.

⁷Kearifan di sini diartikan sebagai perangkat pengetahuan dan praktek-praktek untuk menyelesaikan persoalan dan atau kesulitan yang dihadapi dengan cara yang baik dan benar lihat Ahimsa P. 2010 *Kearifan Lokal dan Pengetahuan Lokal. Peran dan Strategi Perlindungan*.

Ketapang: BPSNT Pontianak dan Pemerintah Provinsi Kalimantan Barat dan Disbuppapora Kabupaten Ketapang. Halaman: 2.

⁸[http S: //media.neliti.commedia](http://media.neliti.commedia) PDF.

⁹<http://coremap.oseanografi.lipi.go.id>

¹⁰Untuk lebih jelas dapat dibaca Mudjijono 2015 *Esoso: Mencari Hari- Hari Baik pada Masyarakat di Pulau Kramian dalam Patrawidya Seri Penerbitan Penelitian Sejarah dan Budaya*. Vol.16. No.4. Hal:497-514. Desember. Yogyakarta: Balai Pelestarian Nilai Budaya DIY.

mengambil jalan laut yang tidak banyak batu karang. Namun, jika ada masalah dengan kapalnya, seperti bocor atau ada masalah dengan mesin, kapal akan di arahkan ke daratan yang paling dekat. Walaupun ditengarai akan ada angin besar, akan tetapi jika perkiraan hari baiknya ada hasil mereka tetap *melaut*

Interpretasi-interpretasi semacam itu yang perlu diperhatikan sesuai dengan prinsip-prinsip kebudayaan yang dikemukakan oleh Goodenough. Selain itu dalam kajiannya tentang symbol, Leslie White menegaskan bahwa, hanya manusia yang memiliki kemampuan mengorganisasikan dan menghargai makna dari benda-benda dan peristiwa-peristiwa serta membandingkan dengan makna yang lain¹¹. Simbol-simbol di langit yang ditangkap oleh para nelayan Bugis di Pulau Kramian sudah diperhatikan berkali-kali sampai beberapa generasi yang menjadikan tiap simbol dapat ditangkap maknanya. Perlu diketahui, bahwa pemahaman para astrologer, ahli nujum, peramal memiliki konsep bahwa setiap sel manusia tercetak dengan kode genetik, setiap atom membawa pola alam mikrokosmos. Konsep ini mirip sekali dalam suatu *phrase* seperti pola-pola di atas atau di bawah, yang berarti sebagai jantung atau inti dan menjadi kepercayaan astrologi. Pola-pola dalam setiap atom tersebut tidak dapat diubah, namun dapat berulang yang dapat dilihat dan diperhatikan di langit¹².

Di satu sisi manusia merupakan tanda atom sejak lahir di Bumi, di sisi lain tanda-tanda alam yang berada di langit dan dapat dipahami oleh nelayan Pulau Kramian merupakan sinyal alam yang tidak berubah, namun akan memancarkan tanda pada waktunya. Psikiater terkenal Gustav Jung mengutarakan bahwa apapun yang lahir atau dilakukan pada waktu tersebut memiliki kualitas dari momen waktu, hal ini sebagai momen dasar dalam

prinsip astrologi¹³. Kesadaran nelayan untuk berhati-hati dan menyikapi cuaca yang akan terjadi merupakan bentuk kearifan dalam menyikapi kondisi cuaca. Merujuk pada konsep astrologi yang digunakan untuk memahami diri kita dan lingkungan agar lebih jelas dalam keunikan secara universal¹⁴, maka langkah para nelayan dalam menyikapi tanda-tanda alam tersebut sebagai bagian dari prinsip astrologi. Keuniversalan sebagai sifatnya mengingat konsepsi bintang juga dikenal oleh berbagai etnis di berbagai wilayah dalam berbagai kehidupan, misalnya di Yunani dengan adanya perhitungan tarikh Mesehi abad Julian dan Gregoriaan¹⁵, etnis Cina dengan konsep penanggalan Cina¹⁶ dan *horoscopes*¹⁷, etnis Jawa dan Bali dengan konsepsi *wuku* yang diberi nama bintang¹⁸. Terkait menghitung *wuku*, *dina*, *pasaran* dapat dibaca pada Bratakesawa¹⁹. Ritual *Gumbregan* merupakan contoh petani menyikapi tanda-tanda alam yang berdampak pada ternaknya²⁰, sedangkan Ritual Sedekah Labuh dan Membuka Bungkus Cupu Panjala di Girisekar merupakan satu contoh masyarakat petani menyikapi tanda-tanda alam untuk memulai menebar benih²¹.

3 PENUTUP DAN REKOMENDASI

Pemahaman tanda-tanda alam yang dimiliki di berbagai masyarakat merupakan kearifan lokal, karena tanda-tanda alam merupakan simbol yang berarti akan adanya kejadian baik di laut maupun di darat. Simbol dan kejadian mengalami perulangan dalam waktu tertentu dan tidak dapat diubah, karena simbol dan kejadiannya merupakan peristiwa *imajiner* yang sudah ditentukan sebagaimana kodrat manusia lahir di Bumi sebagai sebuah atom dengan koordinat yang sudah tertentu.

¹¹White, Leslie A, *Symboling: A Kind of Behavior* dalam Ideas of Culture: Sources and Uses. Edited by Frederick C Gamst dan Edward Norbeck. USA: Holt, Rinehart and Winston, 1976. Halaman: 26.

¹²Jill Davies, 1992, *Everyday Astrology A Guide to understanding your horoscope*. London: Chancellor Press. Halaman: 8.

¹³*Ibid* 1992 halaman 8

¹⁴*Ibid* 1992 halaman 8

¹⁵Astrologisch Bureau Aquarius 48° 20' 40", *Almanak Poesaka 100 Thoen Mesehi 1851 Sampe 1950 Bergoena Bagi Segala Bangsa*. Astrologisch Bureau Aquarius, Semarang. Halaman: 4-13.

¹⁶*Ibid* 48° 20' 40. Lihat juga, Wong Kam Fu, 1961, *Primbon Kelahiran*. NV Tjerman, Surabaya.

¹⁷Paula Delsol 1977 *Chinese Horoscopes* Translated from the French by Peter and Tanya Leslie. Pan Books LTD London

¹⁸R.Tanojo. 1962 *Primbon Djawa Pawukon*. Solo: Penerbit T.B. "Peladjar". Halaman 3-5. *Sawidji-widjining wuku ana arané dhéwé-dhéwé, nganggo araning lintang kang telung puluh kèhé, kaja ta kang kawitan arané Sinta, sabandjuré nganti tumeka kang wekasan arané Watugunung*

¹⁹K. Bratakesawa, 1968, *Almenak Atusan Taun Wuku, Dina, Pasaran. Almenak Masehi taun I-3200, Almenak Arab taun I H-2400H, Almenak Djawa taun Alip 1555-Djimakir 2160*. Panjebur Semangat, Surabaya.

²⁰Mudjijono, 2019, *Gumbregan dalam Prosiding Seminar Internasional Borobudur Writer And Cultural Festival Dengan Tema Tuhan dan Alam*. Borobudur Writer And Cultural Festival, Magelang.

²¹Mudjijono, 2021, *Ritual Sedekah Labuh pada Masyarakat Petani di Girisekar Panggang Kabupaten Gunungkidul DIY*. Dinas Kebudayaan Kabupaten Gunungkidul DIY, Kabupaten Gunungkidul.

Fenomena-fenomena semacam itu sebaiknya terus dikaji sehingga pada akhirnya terbentuk suatu pemahaman global yang saling terkait antara fenomena-fenomena *imajiner* dengan kejadian-kejadian di alam.

4 PUSTAKA

- Ahimsa-Putra, Heddy Shri., 1985, "Etnosains dan Etnometodologi" dalam *Masyarakat Indonesia Majalah Ilmu-Ilmu Sosial Indonesia*. Agustus Jilid XII Nomor 2. Jakarta: LIPI.
- _____. 2010, *Kearifan Lokal dan Pengetahuan Lokal. Peran dan Strategi Perlindungan*. Ketapang: BPSNT Pontianak dan Pemerintah Provinsi Kalimantan Barat dan Disbuppapora Kabupaten Ketapang.
- Astrologisch Bureau Aquarius 48° 20' 40", *Almanak Poesaka 100 Tahun Masehi 1851 Sampe 1950 Bergoena Bagi Segala Bangsa*. Astrologisch Bureau Aquarius, Semarang.
- Bratakesawa, K., 1968, *Almenak Atusan Taun Wuku, Dina, Pasaran. Almenak Masehi taun I-3200, Almenak Arab taun I H-2400H, Almenak Djawa taun Alip 1555-Djimakir 2160*. Panjebar Semangat, Surabaya.
- Davies, J., 1992, *Everyday Astrology a guide to understanding your horoscope*. London: Chancellor Press.
- Delsol, D., 1977, *Chinese Horoscopes* Translated from the French by Peter and Tanya Leslie. Pan Books LTD London
- Effendi. I. dan Oktariza. W., 2008, *Managemen Agribisnis Perikanan*. Jakarta: Penebar Swadaya.
- Leslie, W. A., 1976, *Symboling: A Kind of Behavior* dalam *Ideas of Culture: Sources and Uses*. Edited by Frederick C Gamst dan Edward Norbeck. Holt, Rinehart and Winston, USA.
- Mudjijono, 2015, *Esoeso: Mencari Hari-Hari Baik pada Masyarakat di Pulau Kramian dalam Patrawidya Seri Penerbitan penelitian sejarah dan Budaya*. Vol.16. No.4. Hal: 497-514. Desember. Yogyakarta: Balai Pelestarian Nilai Budaya DIY.
- _____. 2019, *Gumbregan dalam Prosiding Seminar Internasional Borobudur Writer And Cultural Festival dengan Tema Tuhan dan Alam*. Borobudur Writer And Cultural Festival, Magelang.
- _____. 2021, *Ritual Sedekah Labuh Pada Masyarakat Petani di Girisekar Panggang Kabupaten Gunungkidul DIY*. Dinas Kebudayaan Kabupaten Gunungkidul DIY, Kabupaten Gunungkidul.
- Tanudirjo A. D., 2013., *Diaspora Austronesia dan Peradaban Bahari Indonesia*. Makalah dalam Presentasi Borobudur Writer and Cultural Festival 17-20 Oktober.
- Tanojo, R., 1962, *Primbon Djawa Pawukon*. Solo: Penerbit T.B. "Peladjar".
- Tobing, P. O., 1977, *Hukum Pelayaran Dan Perdagangan Amanna Gappa*. Ujung Pandang: Yayasan Kebudayaan Sulawesi Selatan.
- [http S: //media.neliti.commedia PDF](http://media.neliti.commedia PDF).
<http://coremap.oseanografi.lipi.go.id>

Peran Kosmologi Islam dalam Sains Modern

K. F. Nurrahmah* dan M. I. Arifyanto

Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: hanazasky.293@gmail.com

ABSTRAK

Konsep kosmologi heliosentris-modern, di mana manusia penghuni planet Bumi secara fisik memang bukanlah pusat kosmos, menunjukkan peran keberadaan manusia di antara milyaran bintang dan galaksi tidak memberikan dampak apapun terhadap proses di alam semesta homogen-isotropik. Sebaliknya, Ibnu ‘Arabi menggambarkan manusia, dalam hal ini manusia sempurna atau *Insān Kamil*, adalah tempat kedudukan (*locus*) Tuhan yang penuh dengan kesempurnaan dan juga sebagai pemelihara alam semesta. Kemampuan *Insān Kāmil* juga menjadikannya sebagai miniatur alam atau mikrokosmos. William C. Chittick menjelaskan bahwa dalam kosmologi Islam kemunculan dan kesirnaan alam semesta berasal dari dan ke *Al-Haq* (Allah), diri manusia berperan penting karena memiliki segenap daya teoretis maupun praktis sebagai subjek yang mengetahui, mampu menyadari dan mengenali sepenuhnya kosmos sekaligus Pencipta dibaliknya. Menurut Seyyed Hossein Nasr, kosmologi Islam berfungsi sebagai jembatan antara sains duniawi dan ajaran Islam (aspek metafisik), kunci untuk memahami kosmos serta posisi dan tujuan kehidupan manusia di dalamnya dengan panduan wahyu. Pada studi ini kami akan membahas benang merah antara kosmologi geosentris-metafisik dari ilmuwan tradisional Muslim dan kosmologi heliosentris-modern dari ilmuwan rasionalis Muslim lintas zaman. Keduanya saling melengkapi dengan melibatkan keberadaan manusia Bumi yang spesial sebagai *khalifah*, yang berperan penting sebagai komponen utama untuk memahami kerja alam semesta sekaligus untuk mengenal Tuhan-nya.

Kata Kunci: *Geosentris – Heliosentris – Kosmologi Islam*

1 PENDAHULUAN

Definisi kosmologi (Inggris: *cosmology*) menurut bahasa berasal dari akar kata Yunani ‘kosmos’ yang berarti harmoni atau keteraturan. Lalu menurut istilah adalah ilmu yang mempelajari alam semesta (kosmos) secara keseluruhan.

Cabang ilmu ini berfungsi untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan seperti: ‘dari mana kita berasal?’, ‘siapakah kita?’. Lebih lanjut para ahli kosmologi mengajukan pertanyaan seperti: ‘terbuat dari apakah alam semesta?’, ‘apakah ia memiliki awal di masa lalu dan akan berakhir beberapa waktu di masa depan?’. Alhasil ilmu ini mampu menggambarkan masa lalu, menjelaskan masa kini, dan memprediksi masa depan dari kosmos.

Sejauh ini properti dari alam semesta yang telah diungkap oleh kosmologi terkini adalah homogen (sama di seluruh tempat/lokasi) dan isotropik (sama pada segala arah). Maka tidak ada arah dan lokasi yang istimewa di alam semesta, dengan kata lain tidak ada pusat. Terlihat sama, tidak peduli ke arah mana pengamat di Bumi mengarahkan dan mengatur teleskopnya. Namun ada kualifikasi yang sangat penting: alam semesta isotropik dan homogen dalam skala besar. ‘Skala besar’ berarti bahwa alam semesta hanya isotropik dan homogen pada skala sekitar 100 Mpc atau lebih. Kosmos juga mengembang dipercepat, galaksi-galaksi menunjukkan pergeseran merah yang proporsional dengan jarak (Hukum Hubble-Lemaître).

Sejak zaman kuno ilmu ini telah didasarkan pada pengamatan alam semesta di sekitar kita. Walaupun seringkali tidak sempurna dan tidak lengkap (Ryden 2017).

Ilmu kosmologi ini berkembang pesat sejak terjadinya revolusi sains yang dicetuskan astronom sekaligus pendeta Polandia, Nicolaus Copernicus (1473-1543 M). Ia mengubah konsep pemahaman alam semesta yang tadinya berpusat pada Bumi, planet yang dihuni manusia (geosentris) menjadi berpusat ke Matahari (heliosentris). Namun setelahnya diketahui pula bahwa sistem heliosentris bersifat lokal di tata surya saja. Triliunan bintang selain Matahari juga menjadi pusat bagi sistem keplanetan mereka tersendiri.

Geosentris secara bahasa berasal dari akar kata Yunani ‘geo’ yang berarti Bumi dan ‘sentris’ yang berarti pusat. Sedangkan secara istilah geosentris adalah teori mengenai alam semesta yang menyatakan bahwa Bumi sebagai pusat tata surya.

Sementara heliosentris, secara bahasa berasal dari akar kata Yunani ‘helio’ yang bermakna Matahari dan ‘sentris’ (pusat). Istilah heliosentris berarti teori yang menyatakan Matahari sebagai pusat alam semesta, di mana seluruh planet termasuk Bumi beredar mengelilingi Matahari (Butar-Butar 2016).

Konsep heliosentris terbukti benar berdasarkan pengamatan astronomis secara fisik, terlihat secara visual oleh mata manusia. Namun dalam Islam yang terlihat secara fisik tidak selalu penting, terdapat aspek gaib atau metafisik yang selalu menyertai.

Indra manusia tidak mampu merasakannya, oleh karena itu seorang Muslim harus mengakui keberadaan alam metafisik tersebut dengan keimanan dan kecerdasan.

Dengan demikian dapat diketahui bahwa (permasalahan) kosmologi modern yang hanya membenarkan sistem heliosentris, mengabaikan pentingnya peran manusia Bumi. Sebab posisinya bukanlah pusat dan keberadaannya hanyalah satu planet berpenghuni di antara milyaran sistem bintang di alam semesta.

Maka tujuan penulisan makalah ini adalah mencari benang merah antara kosmologi geosentris-metafisik dari ilmuwan tradisional Muslim dan kosmologi heliosentris-modern dari ilmuwan rasionalis Muslim lintas zaman. Kemudian merumuskan seperti apa peran yang akan manusia Bumi jalankan di alam semesta berdasarkan kombinasi waktu dan sains modern.

2 LANDASAN TEORI DAN METODOLOGI

2.1 Kosmologi Islam Tradisional

Landasan utama kosmologi Islam bersumber Al-Qur'an & Hadits. Salah satu ayat tentang alam semesta adalah Surat Al-A'raf (7) ayat 54:

“Sesungguhnya Tuhanmu (adalah) Allah yang menciptakan langit dan bumi dalam enam masa, lalu Dia bersemayam di atas 'Arsy. Dia menutupkan malam kepada siang yang mengikutinya dengan cepat. (Dia ciptakan) matahari, bulan, dan bintang-bintang tunduk kepada perintah-Nya. Ingatlah! Segala penciptaan dan urusan menjadi hak-Nya. Mahasuci Allah, Tuhan semesta alam.”

Landasan kedua berasal dari salah satu hadits *qudsi*. Yaitu hadits berupa wahyu yang diturunkan kepada Nabi Muhammad tanpa perantara malaikat, melainkan secara langsung melalui ilham atau mimpi. Berbunyi:

‘Aku adalah harta terpendam; Aku ingin dikenal. Oleh karena itu, Aku menciptakan dunia agar Aku akan dikenal,’

Dari dua dalil di atas para ilmuwan Muslim abad pertengahan mencoba merumuskan definisi kosmologi Islam. *Pertama*. Ibnu Sina alias Avicenna (980-1037 M) mengonsep hierarki alam semesta berdasarkan konsep geosentris Aristotelian-Ptolemaeus, Plotinus, dan karya-karya Al-Farabi. Ibnu Sina menganggap penggabungan total dunia fisik dan metafisik tidak hanya masuk akal namun juga menyeluruh (Guessoum 2011).

Ibnu Sina menjabarkan kosmos berupa hierarki intelek (kecerdasan) tertentu yang mengendalikan sembilan bola langit terbatas (*finite*) mengorbit mengelilingi Bumi. Gerak melingkar dari bola langit

dimaksudkan untuk pemuliaan (tasbih) dan karena Perintah Ilahi (Nasr 1978).

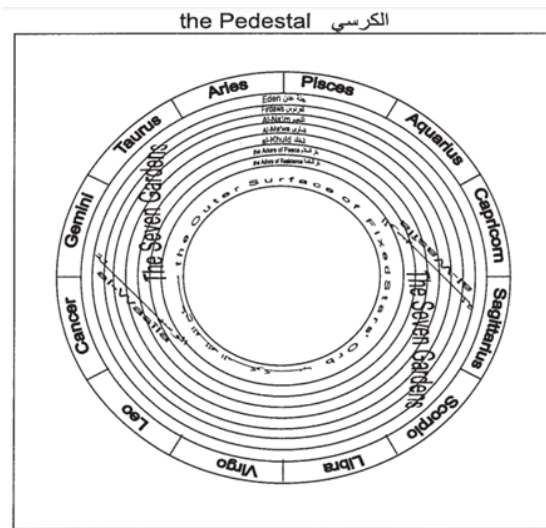
Kedua. Ikhwan Ash-Shafa adalah komunitas ilmuwan di abad ke-10 di Irak yang mengabdikan diri untuk mempelajari sains, terutama seputar alam, kosmik, dan politik. Kelompok aliran pemikiran yang kompleks, sering digolongkan sebagai kaum rasionalis, kaum peripatetik, dan juga kaum pra-Sufi. Mengikuti prinsip emanasi (pancaran) Platonis dan perspektif Sufi lalu mengonsep seluruh eksistensi kosmos merupakan hierarki *great chain of being* menurun dari Intelek dan Tuhan menjadi satu kesatuan tunggal yang tersusun dalam sistem numerologi alam semesta (0 sampai 9). Penciptaan kosmos terjadi seketika.

Ketiga. Ibnu Rusyd alias Averroes (1126-1198 M) terpengaruh Aristoteles namun setia kepada ajaran Al-Qur'an. Ia memperkenalkan sebuah tilikan baru yang menarik terhadap konsep lama mengenai kesatuan kosmos. Ibnu Rusyd mengembangkannya dari sudut pandang perubahan (atau ketiadaan) dan menganut doktrin keabadian kosmos, tetapi menegaskan bahwa alam semesta sedang dan terus ada dalam atau evolusi konstan. Selama Tuhan masih meneruskan proses penciptaan-Nya, dapat disimpulkan bahwa karena isi dan bentuk tidak dapat dipisahkan serta keduanya kekal, maka kosmos pastilah statis meskipun ia terus mengembang (cikal bakal teori alam semesta *Steady State*).

Menurut Rusyd pula Sang Pencipta adalah Yang Terdahulu atau Zat yang Abadi, Tuhan mengajarkan perubahan kepada makhluk-makhluk-Nya melalui berbagai media (yaitu akal, malaikat, jiwa). Ia sangat sepakat dengan teori Aristoteles tentang sebab final yang menyatakan bahwa alasan di balik setiap fenomena pasti ditemukan dalam tujuan akhir yang ingin dicapai setiap makhluk. Menyiratkan sebuah evolusi ke atas dibandingkan proses *top-down* di kosmos.

Keempat. Ibnu 'Arabi (1165-1240 M) seperti kaum Sufi lainnya, menggunakan kosmologi untuk merujuk pada cara kita memperoleh lebih banyak pengetahuan tentang Allah.

Alam semesta digambarkan Ibnu 'Arabi sebagai bagian dari *Al-Kursiy*, di dalamnya terbagi bola langit berlapis-lapis. Bola langit terluar adalah milik 12 zodiak yang melingkupi tujuh taman surgawi yang disebutkan dalam Al-Qur'an lalu di bawahnya terdapat bola dari bintang tetap (menurutnya bintang tetap berada di galaksi kita sedangkan bintang dari zodiak berasal dari galaksi jauh lainnya). Barulah setelah bola ini di dalamnya terdapat tujuh bola langit dari lima planet ditambah Bulan dan Matahari serta tujuh lapisan Bumi.



Gambar 1. Kursi (Ilahi) & apa yang dikandungnya hingga bola langit rasi bintang. Sumber: Yousef, Mohamed H. 2008, *Ibn 'Arabi - Time and Cosmology*.

2.2 Motif Ilmuwan Muslim Mempertahankan Konsep Geosentris

Tahun 1350 M, dua abad sebelum Nicolaus Copernicus, konsep geosentris Ptolemaeus dipatahkan oleh Ibnu Syathir dengan model gerak planetnya. Astronom Damaskus itu pun berkata:

"Saya meminta Tuhan yang Mahakuasa memberi saya inspirasi dan membantu saya untuk menciptakan model yang akan mencapai apa yang diperlukan, dan Tuhan - semoga dia dipuji dan ditinggikan - memang memungkinkan saya untuk merancang model universal untuk gerakan planet dalam garis bujur, lintang, dan semua fitur lain yang dapat diamati dari gerakan mereka, yang bebas dari keraguan sekitarnya." (Gingerich 1986)

Baik Syathir dan astronom Muslim lainnya tidak menetapkan Matahari sebagai pusat alam semesta, mereka fokus membuat sistem geosentris yang sempurna, kurang lebih karena tiga motif:

1. Menjaga keseimbangan dan keharmonisan sistem 'pohon' ilmu
2. Menjaga hubungan manusia dengan langit yang menjadi sumber segala sesuatu terutama turunnya wahyu firman Allah
3. Mencegah timbulnya sains materialisme yang tidak melibatkan peran Tuhan

Keengganan para astronom Muslim untuk melakukan revolusi total terhadap konsep geosentris kepada heliosentris ini adalah sebagai konsekuensi logis dari pandangan integrasi-holistik serta pandangan dunia tauhid sebagaimana diyakini di

dalam dada para astronom Muslim (Heriyanto 2011; Butar-Butar 2016).

3 HASIL DAN ANALISIS

3.1 Kosmologi Islam di Era Modern

Menurut Nasr (1978) kosmologi Islam merupakan penerapan dari prinsip-prinsip tatanan metafisik (yang diturunkan dari wahyu Islam) untuk memahami domain realitas kosmik termasuk dunia fisik namun tidak dibatasi olehnya.

Senada dengan Guessoum (2011) yang menganggap kosmologi Islam tidak membatasi diri pada penafsiran ilmiah-semu terhadap teks-teks suci, harus ada ruang bagi kreativitas dan kebebasan berpikir dalam nilai Islam yang mampu menyerap kemajuan pengetahuan manusia sehingga dapat menghasilkan sintesis bernilai. Prinsip-prinsip kosmologi ini dalam Al-Qur'an ditafsirkan Guessoum sebagai berikut:

1. Alam semesta diciptakan Tuhan yang memiliki kekuasaan mutlak dan eksklusif
2. Alam semesta diciptakan karena sebuah tujuan
3. Keberlangsungan alam semesta dijaga Tuhan
4. Kosmos dicirikan dengan sifat keutuhan, ketertiban, dan harmoni antara semua elemen serta peristiwa di dalamnya
5. Waktu dan kronologi kosmos dalam Al-Qur'an bersifat kualitatif (misal hari-hari atau *ayyam*), jadi tidak dijelaskan durasinya secara khusus

Sementara Agus Purwanto (2017) mencoba mengaitkan kosmologi Islam dengan peristiwa perjalanan *mi'raj* 1400 tahun yang lalu. *Mi'raj* merupakan perjalanan Nabi Muhammad dengan cara lenyap dari dunia material untuk menerima perintah salat. Dapat 'dijelaskan' dengan teori relativitas umum.

Menurut Purwanto isyarat kosmologi Islam terdapat pada QS. Al-Isra (17) ayat 1 tentang tiga komponen pentingnya yaitu waktu (*lailan*), materi-jiwa (*'abdi*), dan ruang (*asra*). Purwanto (2021) kemudian menjelaskan pembagian lapisan langit berdasarkan interpretasi ayat Qur'an dan sains secara umum dengan menempatkan Bumi sebagai pusat alam semesta metafisik, *starting point* dari perjalanan *mi'raj*. Posisi Matahari yang menjadi pusat secara fisik namun diabaikan karena tidak dilalui Rasulullah ketika *mi'raj*.

Langit lapisan 1-2 masih berada di dalam atmosfer Bumi, lalu langit lapisan 3-6 berturut-turut berada di orbit Bulan, planet di ujung tata surya, bintang terdekat (Alpha Centauri), dan ruang antarbintang. Barulah langit ketujuh yang terakhir berada di dimensi nonmaterial atau lebih tinggi (dimensi keempat), tempat adanya malaikat dan jin.

Tidak dapat dilihat manusia, makhluk dunia dimensi ketiga.

4 KESIMPULAN

Studi tentang alam semesta merupakan alat untuk mencapai tujuan akhir yang sebenarnya, yakni memperoleh pengetahuan mengenai Sang Pencipta. Diperoleh dengan mempelajari kebijaksanaan-Nya yang tercermin dalam ciptaan-Nya.

Kosmologi Islam/teistik modern yang sepenuhnya kompatibel dengan sains sangat mungkin dibangun selama aktor intelektualnya tetap terbuka, kreatif, dan tidak kaku, baik dalam pengetahuan religius maupun saintifiknya. Karena itu diri manusia penting, hanya dirinya sendiri yang bisa mengenal Allah dan kosmos.

Peran manusia adalah menjadi makhluk sempurna (*insān kamil*), lokus/wadah Tuhan yang berkedudukan sebagai khalifah dan wali tertinggi pemelihara kosmos, memanifestasikan kemakmuran, keadilan, dan kedamaian. *Insān kamil* juga mampu menjadi mikrokosmos yang merealisasikan citra Tuhan secara utuh. Lebih tinggi dan sempurna kualitas mental spiritualnya dibanding manusia lain sehingga Allah menjadikan insan kamil sebagai khalifah-Nya.

Ucapan Terima Kasih

Riset ini mendapat dukungan sumber literatur dari koleksi buku Islami perpustakaan *Salman Reading Corner*, Masjid Salman ITB.

5 PUSTAKA

- Al-Qur'an Tajwid dan Terjemahnya. 2006, Departemen Agama Republik Indonesia. PT Syaamil Cipta Media
- Arif, Syamsuddin. 2009. *The Universe as a System: Ibn Sīnā (Avicenna)'s Cosmology Revisited*. Research Gate.
- Butar-Butar, Arwin J. R. 2016, *Khazanah Astronomi Islam Abad Pertengahan*. UMP Press.
- Chittick, William C. 2007, *Kosmologi Islam dan Dunia Modern: Relevansi Ilmu-Ilmu Intelektualisme Islam*. Mizan Publika
- Gingerich, Owen. 1986, *Islamic Astronomy*. Scientific American Inc.
- Guessoum, Nidhal. 2011, *Islam dan Sains Modern*. Mizan.
- Heriyanto, Husain. 2011, *Menggali Nalar Saintifik Peradaban Islam*. Mizan.
- Mahmud, Akilah. *Insan Kamil Perspektif Ibnu Arabi*. Jurusan Aqidah dan Filsafat Fakultas Ushuluddin dan Filsafat UIN Alauddin Makassar. Sulesana Volume 9 Nomor 2 Tahun 2014
- Nasr, Seyyed Hossein. 1978, *Introduction to Islamic Cosmological Doctrines*. The Pitman Press.
- Nasr, Seyyed H. 2016, *The Different Aspects of Islamic Culture Volume 1: Foundations of Islam - Chapter 1.5 Islamic View of Universe*. UNESCO Publishing.
- Nasr, Seyyed H. 2001, *The Different Aspects of Islamic Culture Volume 4: Science and Technology in Islam – Chapter 3.1 Cosmology*. UNESCO Publishing.
- Purwanto, Agus. 2015, *Nalar Ayat-Ayat Semesta*. Mizan.
- Purwanto, Agus. 2021, Komunikasi pribadi.
- Ryden, Barbara. 2017, *Introduction to Cosmology Second Edition*. Cambridge University Press
- Yousef, Mohamed H. 2008, *Ibn 'Arabi - Time and Cosmology*. Taylor and Francis e-library

Studi Arkeoastronomi Candi Sukuh dan Cetho, Jawa Tengah

T. H. Pramono^{1*} dan Aprilia¹

¹Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: theofilushobba22@gmail.com

ABSTRAK

Candi Sukuh dan Cetho merupakan candi termuda di Indonesia yang dibangun pada akhir masa Majapahit di lereng barat Gunung Lawu. Keunikan arsitekturnya yang berupa punden berundak dengan candi induk berbentuk piramida terpancung dan usianya yang muda menjadikan keduanya objek penelitian arkeoastronomi yang menarik, yaitu untuk mencari kesegarisasi orientasi candi dengan benda langit tertentu. Orientasi dalam nilai azimut diukur menggunakan Google Earth untuk sepuluh arah di Candi Sukuh dan enam di Candi Cetho. Nilai tersebut ditransformasi menjadi deklinasi dan dicocokkan dengan deklinasi benda-benda langit untuk pengamatan tahun 1475 M. Dari pencocokan diperoleh sepuluh kesegarisasi di Candi Sukuh dan dua kesegarisasi di Candi Cetho. Semua kesegarisasi kemudian diuji signifikansinya untuk memperoleh nilai *global* dan *local p-value* yang bila lebih kecil dari 0,05 menandakan keyakinan di atas 95% bahwa kesegarisasi yang terukur disengaja oleh pembangun masa lalu. Hasil perhitungan menunjukkan *global p-value* Candi Sukuh sebesar 0,13 dan untuk Candi Cetho sebesar 0,06. Keduanya lebih besar dari 0,05 sehingga nilai *local p-value* tidak perlu ditinjau. Dapat dikatakan bahwa kedua candi tidak dibangun dengan mengacu pada posisi benda langit tetapi mungkin lebih mengacu pada puncak gunung atau disebut konsep *chthonic*.

Kata Kunci: Cetho - Sukuh – kesegarisasi

1 PENDAHULUAN

Arkeoastronomi adalah keilmuan gabungan dari astronomi dan arkeologi yang bertujuan untuk menganalisis kesegarisasi atau kecocokan orientasi monumen dan bangunan kuno dengan posisi benda langit (Baity dkk., 1973). Kesegarisasi tersebut kemudian dapat digunakan sebagai jembatan untuk memahami persepsi masyarakat kuno tentang posisi benda langit dalam kebudayaan mereka. Banyak bangunan kuno di dunia yang sudah diteliti secara arkeoastronomis, seperti Stonehenge (mis. Ruggles, 1997; Meaden, 2017), dan Angkor Wat (mis. Barnhart & Powell, 2013; Sparavigna, 2016).

Di Indonesia, penelitian arkeoastronomi mayoritas dilakukan untuk bangunan candi yang tersebar di Pulau Jawa. Soekmono (1974/1995, hlm. 1) mendefinisikan candi sebagai bangunan untuk tempat ibadah penganut agama Hindu dan Budha masa lalu. Pembangunan sebuah candi tidak bisa dilakukan sembarangan. Degroot (2009) mendapati bahwa candi-candi di Jawa Tengah diorientasikan ke sekitar arah timur dan barat. Penelitian lanjutan oleh Aini (2018) mengonfirmasi hubungan 34 candi dari yang pernah diteliti Degroot dengan benda langit, khususnya Matahari.

Penelitian arkeoastronomi dapat diperluas untuk candi-candi Jawa Timur. Dua candi yang menarik adalah Candi Sukuh yang pernah diteliti oleh Rodhiyah dan Hidayat (2019) dan Candi Cetho. Keduanya merupakan dua candi peninggalan masa akhir Kerajaan Majapahit di lereng barat Gunung

Lawu dengan sisi barat terbuka menghadap dataran rendah dan empat gunung, yakni Gunung Merapi, Merbabu, Telomoyo, dan Ungaran. Kedua candi Hindu ini dibangun memanjang mengikuti kemiringan lereng dari barat ke timur. Bangunan utama candi berbentuk piramida terpancung didirikan di sisi timur. Selain itu, terdapat dua tiang batu di sisi kanan dan kiri candi utama Candi Sukuh yang fungsinya masih belum diketahui. Keduanya diduga dulu difungsikan untuk lokasi upacara penyucian (Darmosoetopo dkk., 2016) atau tempat tinggal kaum resi (Purwanto, 2017; Purwanto & Titasari, 2020). Keunikan kedua candi menjadikan penelitian arkeoastronomi menarik untuk dilakukan, terutama untuk memastikan apakah keduanya memiliki hubungan dengan benda langit.

2 METODE

Perhitungan kesegarisasi pada kedua candi memanfaatkan metode transformasi koordinat. Nilai orientasi/azimut diukur terhadap 10 orientasi di Candi Sukuh dan 6 di Candi Cetho. Pengukuran di sekitar area candi memanfaatkan *software* Google Earth Pro seperti yang sudah digunakan oleh Magli (2017) dan Aini (2018) sementara untuk yang mengacu pada gunung di horizon sebelah barat diukur menggunakan laman heywhatsthat.com. Hasil pengukuran kemudian diubah menjadi nilai deklinasi menggunakan persamaan

$$\sin(\delta) = \sin(\Phi) \sin(a) + \cos(\Phi) \cos(a) \cos(A), \quad (1)$$

dengan δ adalah deklinasi, Φ adalah lintang pengamat, A adalah azimut, dan a adalah *altitude*

Tabel 2. Nilai dugaan kesegarisan yang diperoleh untuk seluruh arah di kedua candi. Az adalah azimut, δ adalah deklinasi, dan σ_δ adalah galat deklinasi.

Candi	Arah	Az (°)	δ (°)	σ_δ (°)	Benda langit	δ_{benda} (°)
Sukuh	Puncak utara candi induk	78,43	8,59	2,07	Betelgeuse	7,35
					Altair	7,51
	Puncak tengah candi induk	94,64	-6,84	1,23	<i>Zenith passage</i>	-7,63
					Alphard	-6,36
	Puncak selatan candi induk	107,32	-18,76	1,92	<i>Min. south. lun.</i>	-18,29
					Mirzam	-17,67
	Tiang selatan	141,49	-51,62	2,05	Alsephina	-52,79
					Canopus	-52,39
Cetho	Gapura paduraksa	274,64	4,69	1,31	Bellatrix	5,91
	Gunung Ungaran	299,47	29,17	0,47	Pollux	29,33
	Gapura pertama	288,71	18,59	0,48	<i>Min. north. lun.</i>	18,29
					Alhena	16,88
	Gunung Telomoyo	287,14	17,00	0,23		

yang telah dikoreksi terhadap refraksi, bentang alam, dan *angle of dip*. Nilai tersebut kemudian dicocokkan dengan deklinasi benda-benda langit yang sudah dikoreksi terhadap presesi dan gerak diri untuk tahun pengamatan 1397 Saka/1475 M berdasarkan terjemahan Darmosoetopo (dalam Purwanto, 2020) untuk ungkapan “*wiku goh anahut ikut*” di gapura ketujuh Candi Cetho yang merupakan prasasti termuda di antara kedua candi.

Kesegarisan yang diperoleh kemudian dapat diperiksa berdasarkan metode yang dikembangkan oleh Silva (2020), yakni uji signifikansi untuk mengukur keyakinan kesegarisan yang dihitung sebagai yang dimaksud oleh orang-orang zaman dahulu. Metode ini mempertimbangkan faktor profil horizon untuk membangun dua jenis kurva *sum of probability density* (SPD), pertama untuk semua arah azimut yang ditinjau di candi dan kedua adalah hasil simulasi acak untuk semua arah azimut di sepanjang horizon. Keduanya lalu dibandingkan dengan melihat luas daerah di bawah kurva SPD arah azimut yang ditinjau yang memiliki kurva lebih tinggi dari kurva simulasi acak. Perbandingan tersebut memanfaatkan persamaan

$$p = 1 - \frac{x+1}{n+1}, (2)$$

dengan x adalah jumlah SPD dari kesegarisan acak yang memiliki nilai statistik lebih rendah dari SPD yang menggunakan arah azimut candi dan n adalah jumlah seluruh SPD dari kesegarisan acak untuk memperoleh p -value global. Sebuah nilai lain yang dapat digunakan untuk mengeliminasi *false positive*, yakni p -value lokal, dapat diperoleh menggunakan metode serupa, hanya saja menggunakan SPD untuk satu arah azimut candi dan hanya dapat digunakan bila p -value global lebih kecil dari nilai yang dipilih sebagai ambang keyakinan.

Profil horizon yang digunakan untuk uji kesegarisan menggunakan data *Shuttle Radar Topographic Mission* dengan resolusi tertinggi $1'' \times 1''$ yang kemudian dimodelkan menggunakan *software* Horizon (Smith, n.d.). Dilakukan 5000 kali simulasi acak untuk membangun SPD kesegarisan acak sehingga SPD yang dihasilkan membentuk sebuah jangkauan yang menyatakan bahwa semua SPD arah azimut yang ketinggiannya sama atau lebih rendah dari jangkauan ini dapat dikatakan merupakan bagian dari keacakan yang sama. P -value yang dipilih untuk menyatakan keyakinan adalah 0,05 sehingga semua p -value $\leq 0,05$ menandakan keyakinan di atas 95% bahwa kesegarisan tersebut memang dimaksud oleh orang-orang zaman dahulu.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

Kesegarisan yang terhitung dari kedua candi diberikan pada Tabel 1. Terlihat bahwa Candi Sukuh memiliki sepuluh dugaan kesegarisan sementara Candi Cetho hanya memiliki dua dugaan kesegarisan. Dari sekian benda langit, beberapa yang menarik meliputi Matahari, Bulan, serta dua bintang penyusun rasi Orion, Betelgeuse dan Bellatrix. Hal ini disebabkan karena Matahari dan Bulan merupakan dua benda paling terang di langit yang memiliki makna signifikan dalam beragam kebudayaan, sementara rasi Orion telah diketahui memiliki peran dalam penandaan musim tanam dalam kebudayaan Jawa.

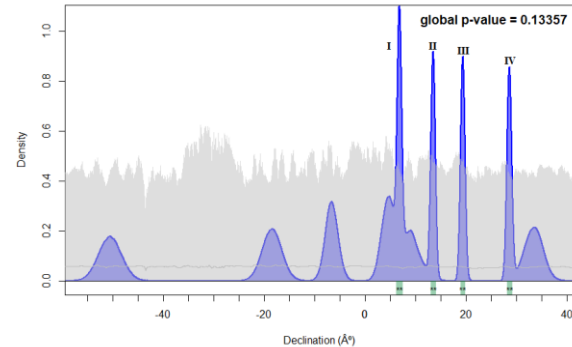
Belum ada informasi terkait makna kesegarisan keempatnya dengan kedua candi dalam konteks kebudayaan Jawa kuno yang diperoleh melalui penelusuran yang telah dilakukan. Berdasarkan wawancara, meskipun beberapa kegiatan keagamaan masih dilangsungkan di kedua candi, tidak ada di

antaranya yang memanfaatkan posisi kesegarisan benda langit dengan bangunan candi sebagai patokan pelaksanaannya. Selain itu, pemaknaan letak benda langit yang berhasil diketahui juga tidak berpatokan pada hubungan benda langit dengan candi, melainkan lebih ke arah pemaknaan posisi terbit terbenam secara umum serta fase untuk Bulan. Sebagai contoh, arah hadap candi ke barat dapat dimaknai sebagai masa akhir kejayaan Majapahit karena Matahari, yang dimaknai sebagai lambang kekuasaan dan kejayaan serta menjadi lambang kerajaan Majapahit, terbenam di arah barat. Dugaan kesegarisan yang terkait dengan Matahari sendiri, yakni antara bagian tengah puncak candi induk Suku dengan Matahari saat *zenith passage*, sulit untuk dianggap istimewa. Hal ini disebabkan karena kesegarisan ini hanya ditemukan di Candi Suku dan tidak di Candi Cetho. Bila peristiwa *zenith passage*, yakni ketika Matahari transit melewati zenit pengamat, bermakna penting pada masa lalu, serta memperhatikan bahwa kedua candi berada pada lokasi yang berdekatan, memiliki arsitektur dan umur yang serupa, serta diduga memiliki fungsi yang sama, seharusnya kesegarisan tersebut dapat ditemukan di kedua candi.

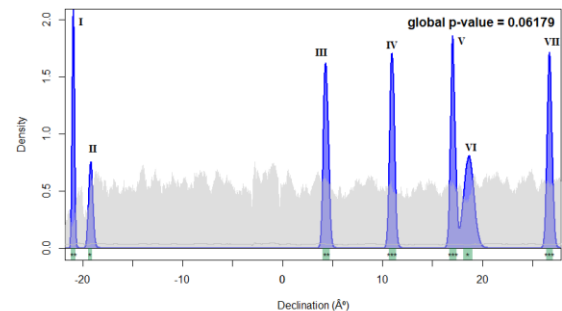
Semua kesegarisan yang dihitung kemudian diuji signifikansinya dan menghasilkan dua grafik yang terlihat pada Gambar 1 dan 2. Keduanya menampilkan kurva SPD untuk semua kesegarisan yang terukur di kedua candi serta kurva jangkauan yang merupakan gabungan dari SPD hasil simulasi orientasi acak terhadap seluruh arah horizon. *Global p-value* untuk kedua candi bernilai lebih tinggi daripada nilai 0,05 yang adalah nilai ambang batas keyakinan 95%. Hal ini menandakan bahwa tidak diperoleh cukup keyakinan untuk menyatakan bahwa kesegarisan-kesegarisan yang diperoleh untuk kedua candi adalah kesegarisan yang disengaja. Temuan ini juga mendukung kemungkinan keduanya dibangun mengacu pada puncak gunung/konsep *chthonic*, khususnya Gunung Lawu, daripada posisi benda langit.

Meskipun *global p-value* kedua candi lebih besar dari nilai ambang batas, ditinjau lebih lanjut untuk mengetahui benda langit yang terwakili oleh puncak-puncak kesegarisan yang lebih tinggi dari jangkauan kesegarisan acak pada kedua candi dengan cara menghitung *local p-value*. Hasil perhitungan yang disajikan dalam Tabel 2 mengungkap hanya tiga benda langit yang memiliki *local p-value*, yakni Pollux dan Alhena yang merupakan bintang di rasi Gemini serta Bulan. Kembali mengacu pada *global p-value* yang tidak memenuhi kriteria, maka *local p-value* yang dihasilkan tidak memiliki makna apapun, terlebih

bila ditilik lebih lanjut, belum ditemukan makna apapun terkait kesegarisan dengan Pollux dan Alhena.



Gambar 3. Hasil uji signifikansi untuk candi Suku. Terlihat daerah abu-abu adalah jangkauan kesegarisan acak dan empat kurva biru di atasnya yang merupakan kesegarisan yang bisa dianggap signifikan tergantung pada *global p-value*.



Gambar 4. Hasil uji signifikansi untuk Candi Cetho.

4 SIMPULAN

Hasil perhitungan memberikan dugaan kesegarisan antara Candi Suku dengan Matahari saat peristiwa *zenith passage*, Bulan saat peristiwa *minor southern lunistice*, Betelgeuse, Altair, Alphard, Mirzam, Alsephina, Canopus, Bellatrix, dan Pollux, serta antara Candi Cetho dengan Bulan ketika peristiwa *minor northern lunistice*, Pollux, dan Alhena. Meskipun cukup banyak benda langit yang diduga segaris, belum ditemukan informasi makna terkait kesegarisan-kesegarisan tersebut. Kemudian, berdasarkan *global p-value* yang diperoleh, kesegarisan yang bisa saja bukan yang dimaksud oleh pembangun kedua candi pada masa lalu. Dari peninjauan lebih lanjut terhadap hasil uji signifikansi, khususnya terkait puncak signifikan dan *local p-value*, hanya Pollux, Alhena, dan Bulan yang memiliki nilai tersebut. Tetapi melihat bahwa *global p-value* berada di atas ambang batas, tidak ada makna yang dapat diambil dari *local p-value*.

Tabel 3. Perhitungan *local p-value* untuk kedua candi.

Candi	Arah	Puncak	δ_{awal} (°)	δ_{akhir} (°)	Local p-value	Benda langit	δ_{benda} (°)
Sukuh	Gn. Merapi	I	6,14	7,56	0,0012		
	Gn. Merbabu	II	13,02	14,04	0,0046		
	Gn. Telomoyo	III	18,92	19,91	0,0042		
	Gn. Ungaran	IV	28,12	29,19	0,0028	Pollux	29,33
Cetho	Candi induk	I	-21,17	-20,72	0,0080		
	Candi induk	II	-19,44	-19,07	0,0236		
	Gn. Merapi	III	4,03	4,73	0,0040		
	Gn. Merbabu	IV	10,65	11,36	0,0010		
	Gn. Telomoyo	V	16,74	17,45	0,0006	Alhena	16,88
	Gapura pertama	VI	18,29	19,04	0,0166	Min. north. lun.	18,29
	Gn. Ungaran	VII	26,42	27,11	0,0010		

Ucapan Terima Kasih

Kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan baik, khususnya kepada pihak BPCB Jawa Tengah, Pak Sunarto dan Pak Mahardika selaku narasumber wawancara terkait Candi Sukuh dan Cetho, serta Dr. Fabio Silva yang sudah bersedia menjelaskan metode uji signifikansi yang dikembangkan.

5 PUSTAKA

- Aini, N. 2018, Studi Arkeoastronomi: Kesegarisan Candi-Candi di Jawa Tengah dengan Objek Langit. Tugas Akhir. Institut Teknologi Bandung.
- Baity, E.C., Aveni, A.F., Berger, R., Bretternitz, D.A., Clark, G.A., Dow, J.W., Giot, P.-R., Kelley, D.H., Klejn, L.S., Loops, H.H.E., Muller, R., Pittioni, R., Pleslova-Stikova, E., Pohorecky, Z.S., Reyman, J.E., Roy, S.B., Smiley, C.H., Snow, D.R., Swauger, J.L., & Vermeersch, P.M. 1973, *Current Anthropology*, 14(4), 389-449. <<http://www.jstor.org/stable/2740842>>
- Barnhart, E. & Powell, C. 2013, The Importance of Zenith Passage at Angkor, Cambodia. <<http://www.mayaexploration.com/pdf/angkorzenithpassage.pdf>>
- Darmosoetopo, R., dkk. 2016, Peninggalan Arkeologi di Lereng Barat Gunung Lawu, Balai Pelestarian Cagar Budaya Jawa Tengah, Klaten.
- Degroot, V.M.Y. 2009, Candi Space and Landscape: A Study on the Distribution, Orientation and Spatial Organization of Central Javanese Temple Remains. PhD Thesis, Univ. Leiden. <<https://scholarlypublications.universiteitleiden.nl/handle/1887/13781>>
- Magli, G. 2017, *Studies in Digital Heritage*, 1(1). <<https://doi.org/10.14434/sdh.v1i1.22846>>
- Meaden, G.T. 2017, *Journal of Lithics Studies*, 4(4), 39-66. <<http://dx.doi.org/10.2218/jls.v4i4.1920>>
- Purwanto, H. 2017, *Berkala Arkeologi*, 37(1), 69-84. <<https://doi.org/10.30883/jba.v37i1.127>>
- Purwanto, H. 2020, *Candra Sangkala*, 2(1). <<http://dx.doi.org/10.23887/jcs.v2i1.28806>>
- Purwanto, H. & Titasari, C.P. 2020, *Pendidikan dan Kebudayaan*, 5(1), 13-42. <<https://doi.org/10.24832/jpnk.v5i1.1505>>
- Rodhiyah A.K. & Hidayat T. 2019, dalam *Astrophysics and Space Science Proceedings* (eds. W. Orchiston, A. Sule, & M. Vahia), 54, Springer, Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-13-3645-4_29>
- Ruggles, C.L.N. 1997, dalam *The British Academy*, 92, 203-229.
- Silva, F. 2020, *Journal of Archaeological Science*, 118. <<https://doi.org/10.1016/j.jas.2020.10513>>
- Smith, A.G.K. n.d., *Horizon*. <<http://agksmith.net/horizon/default.html>>
- Soekmono, R. 1995, *The Javanese Candi Function And Meaning* (D. E. Weatherbee, terj.) Disertasi, Univ. Indonesia, Brill, Leiden. (Karya asli dipublikasikan tahun 1974).
- Sparavigna, A.C. 2016, *Philica*, 591. <<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01312473/document>>

Jejak Suryacandra (*Lunisolar*) pada Dasawarsa Pertama Kalender Hijriah, Berdasarkan Peristiwa Langit dan Kondisi Cuaca dalam Beberapa Peristiwa Sejarah

M. M. Sudibyo^{1*}

¹The Ekliptika Institute, Depok, West Java, Indonesia

*E-mail: marufinsudibyo@gmail.com

ABSTRAK

Kalender Hijriah saat ini merupakan kala candra (*lunar*) yang berkembang dari kalender Quraisy pra-Islam. Terdapat dugaan kalender tersebut merupakan kala suryacandra (*lunisolar*) dengan sistem interkalasi khas yang disebut *Naasi'*. Dugaan tersebut berdasarkan kehidupan ritual, agraris dan pastoralisme Makkah pra-Islam yang bergantung musim. *Naasi'* tetap diterapkan pada dasawarsa pertama kalender Hijriah sebelum diabolisi pada tahun 10 H. Makalah ini mencoba menelusuri jejak kala suryacandra pada masa itu berdasarkan peristiwa gerhana dan kondisi cuaca dalam peristiwa sejarah tertentu. Gerhana Bulan merujuk pada *Canon of Lunar Eclipses* dan peristiwa sejarah merujuk *Sirah Nabawiyah*. Hasil analisis memperlihatkan terjadinya pergeseran lunasi Hijriah pada peristiwa Gerhana Bulan Sebagian 17 Mei 626 TU serta Pertempuran Badar, Khandak dan Tabuk bila dibandingkan catatan sejarah. Pergeseran mengindikasikan *Naasi'*. Terdapat tujuh tahun *Naasi'* sepanjang 2 H hingga 10 H. Hal ini mirip dengan Kalender Romawi menjelang reformasi Julian. Perbedaan interkalasi pada dasawarsa pertama Kalender Hijriah tidak disengaja oleh otoritas saat itu.

Kata Kunci: *suryacandra–Naasi–Hijriah*

1 PENDAHULUAN

Penanggalan Bulan adalah penanggalan yang berdasarkan pergerakan Bulan mengelilingi Bumi dan mengeksploitasi periode sinodis Bulan, yaitu selang waktu di antara dua konjungsi Bulan–Matahari yang berurutan. Periode sinodis Bulan tecermin pada siklus fase Bulan yang mudah disaksikan. Periode sinodis Bulan rata-rata 29,531 hari menjadi dasar bagi sistem penanggalan dalam berbagai peradaban, baik sebagai kala candra atau suryacandra (Ilyas, 1994).

Kalender Hijriah merupakan penanggalan Bulan yang diturunkan langsung dari kalender Makkah (Quraisy)–pra Islam. Haji adalah peristiwa terpenting di Makkah, yang terjadi pada lunasi Zulhijjah bertepatan dengan musim semi saat air dan bahan makanan melimpah (Ioh, 2014). Kehadiran peziarah haji juga menggerakkan aktivitas perdagangan di pasar–pasar Makkah dan sekitarnya. Penduduk Makkah menjual produk–produk pertanian, pastoralisme, logam mulia dan sumberdaya lain. Sebaliknya peziarah membawa komoditi berupa senjata, pakaian, bahan makanan dan barang–barang lainnya.

Peperangan antarsuku dilarang selama musim haji dan selanjutnya meluas ke 3 lunasi lainnya. Maka terbentuk 4 lunasi haram (suci): Zulkaidah, Zulhijjah, Muharam dan Rajab. Sehingga musim haji era pra-Islam tidak hanya aktivitas ritual, tetapi juga sarat muatan ekonomis dan politis.

Sifat penanggalan Bulan bisa menyebabkan Zulhijjah berangsur–angsur bergeser dari musim semi. Meskipun Makkah merupakan daerah yang beriklim gurun (*arid*) namun memiliki empat musim (NMEC, 2010). Maka pergeseran Zulhijjah dapat menyebabkan musim haji di era pra-Islam terjadi pada musim panas/dingin yang tidak menguntungkan dengan resiko dapat terjadi kekurangan air dan bahan makanan. Untuk mengatasinya maka diterapkan *Naasi'* yang menjamin Zulhijjah akan tetap terjadi di sekitar musim semi yang lebih menguntungkan.

Terdapat dua pendapat terkait sifat *Naasi'*. Pertama, *Naasi'* hanya menggeser nama lunasi sementara kalender tetap kala candra / *lunar* (Effendi, 1958 dalam Ioh, 2014). Kedua, terjadi penyisipan lunasi interkalasi sehingga kalender menjadi kala suryacandra (*lunisolar*). Menurut al–Biruni, *Naasi'* terinspirasi dari kalender Yahudi yang lunasi interkalasinya disisipkan tiap 2 atau 3 tahun dan telah diterapkan sejak 2 abad sebelum peristiwa hijrah.

Pendapat *Naasi'* sebagai kala suryacandra didukung oleh nama–nama lunasi kalender Hijriah, yang berakar dari masa pra-Islam. Beberapa nama lunasi menggambarkan kondisi cuaca tertentu. Misalnya Rabiulawal (musim semi), Jumadilawal (musim dingin), Syaban (musim kering) dan Ramadan (musim panas) (Jannah, 2015).

Naasi' diawasi pejabat *qalmas* yang dipegang turun–temurun dalam satu keluarga di Bani Kinanah dengan pejabat terakhir bernama Abu Tumama. *Qalmas* akan mendeklarasikan terjadi tidaknya

Naasi' melalui pengumuman di depan Ka'bah dan selanjutnya di Mina tepat saat musim haji berakhir.

Kalender Makkah turut dibawa ke Madinah seiring peristiwa hijrah dan memperoleh nama baru sebagai kalender Hijriah. Madinah juga beriklim gurun dan memiliki empat musim. Suhu udara terpanas ($> 40^{\circ}\text{C}$) terjadi pada Juni–Agustus. Sedangkan suhu udara terdingin ($< 15^{\circ}\text{C}$) terjadi pada Desember–Februari. Curah hujan rata-rata 60 mm/tahun dengan hari hujan tertinggi (> 3 hari) pada November dan Maret. Tetapi hujan deras–ekstrem kadang terjadi dan menyebabkan banjir bandang. Intensitas hujan ekstrem Madinah diperhitungkan mencapai 50 mm/hari, 57 mm/hari dan 65 mm/hari masing–masing pada periode ulang 25, 50 dan 100 tahun (al–Saleem, 2017)

Naasi' tetap berjalan dalam dasawarsa pertama tahun Hijriah hingga diabolisi lewat turunnya Surat at–Taubah [9]:36 pada saat haji *wada'* (10 H). Sejak itu kalender Hijriah bersifat kala candra. Bagaimana dinamika *Naasi'* saat itu telah dikaji Caussin de Perceval, Amir Ali dan Hamidullah (Ioh, 2014). Perceval mengasumsikan *Naasi'* terinspirasi dari siklus kalender Yahudi sehingga mengusulkan penyisipan lunasi interkalasi setiap 3 tahun Hijriah. Diperoleh 3 tahun *Naasi'*, masing–masing tahun 1 H, 4 H dan 7 H. Meskipun hasilnya telah dicocokkan dengan kronologi tertentu dalam sejarah kehidupan Rasulullah SAW, namun hipotesis itu tidak berakar kukuh, salah satunya karena kurangnya sumber tertulis.

Makalah ini mendiskusikan *Naasi'* sebagai kala suryacandra dengan pendekatan peristiwa langit tertentu berupa gerhana yang dapat disaksikan dari Madinah. Pendekatan ini bukan hal baru. Emil Khalisi memanfaatkan peristiwa Gerhana Matahari Total 30 September 1131 Sebelum Tarikh Umum (STU) dalam menganalisa Pertempuran Gibeon yang menentukan upaya penaklukan Kanaan oleh Bani Israil (Khalisi, 2021).

2 METODOLOGI

Riset dilaksanakan dengan analisis pustaka terhadap sumber–sumber sekunder riwayat hidup Rasulullah SAW yang disebut *Sirah Nabawiyah* khususnya kompilasi dari an–Nadwi (Nadwi, 2001). Analisis juga dilakukan terhadap *The Five Millenium Canon of Lunar Eclipses* (Esenak & Meeus, 2009). Data klimatologi Saudi Arabia khususnya Madinah dan sekitarnya dalam 25 tahun (1985–2010) dari *Surface Annual Climatological Report* yang dipublikasikan Kementerian Udara dan Pertahanan Saudi Arabia (NMEC, 2010).

Peristiwa gerhana yang dapat disaksikan dari Madinah dilacak khususnya pada periode 620–630

Tarikh Umum (TU). Hasilnya dibandingkan dengan data tercatat dan *islamic lunation number* (ILN) dari Ilyas sehingga besarnya pergeseran lunasi dapat diketahui (Ilyas, 1991). Pergeseran tersebut lalu dirunut dari tahun ke tahun guna dibandingkan dengan peristiwa sejarah yang memuat catatan klimatologi.

3 PEMBAHASAN

3.1 Gerhana Bulan 17 Mei 626 TU

Salat gerhana bulan pertama kali diperintahkan pada Jumadilakhir 5 H berdasarkan pendapat yang kuat (al–Baijuri, 2007). Terdapat satu kandidat untuk gerhana tersebut, yakni Gerhana Bulan Sebagian (GBS) 17 Mei 626 TU (tabel 2).

GBS mulai bisa disaksikan sejak kontak U1 hingga Bulan terbenam (Matahari terbit), yaitu diperhitungkan selama 123 menit. Magnitudo gerhana 95 % terjadi 23 menit sebelum Matahari terbit. GBS terjadi pada saat Subuh di akhir musim semi, yang membuka peluang langit cerah.

Konversi kalender menemukan GBS terjadi pada Zulhijjah 4 H (ILN 48). Maka terdapat selisih enam lunasi terhadap data sejarah. Selisih tersebut diinterpretasikan sebagai terjadinya penyisipan 6 lunasi interkalasi yang membentuk 6 tahun *Naasi'*. Yaitu tahun 5 H, 6 H, 7 H, 8 H, 9 H dan 10 H.

3.2 Pertempuran Khandak

Tabel 2. Perhitungan peristiwa GBS 17 Mei 626 TU untuk Madinah (dalam waktu lokal)

Parameter	Waktu
Kontak awal penumbra (P1)	02:22
Kontak awal umbra (U1)	03:31
Puncak gerhana	05:11
Kontak akhir umbra (U4)	06:51*
Kontak akhir penumbra (P4)	08:00*
Matahari terbit	05:34

* = terjadi setelah Matahari terbit

Pertempuran Khandak adalah pertempuran penentuan dalam konflik Makkah–Madinah yang bertujuan penaklukan total Madinah melalui serangan umum singkat. Rencana itu diwujudkan dengan jumlah pasukan berlebih bertumpu pada kavaleri dan waktu perang pada akhir musim gugur.

Secara tak terduga Madinah menerapkan taktik pertahanan parit, sehingga rencana perang Makkah berantakan. Medan berubah menjadi perang atrisi yang berlangsung sebulan (Syawal–Zulkaidah 5 H) dalam kondisi udara yang dingin.

Interkalasi yang diusulkan riset ini menemukan pertempuran terjadi pada ILN 53–54, yakni pada Oktober–November 626 TU yang berdekatan

dengan musim dingin Madinah. Lunasi interkalasi tahun 5 H mungkin disisipkan sebelum Jumadilakhir.

3.3 Pertempuran Tabuk

Pertempuran Tabuk adalah upaya menghentikan invasi Romawi ke Jazirah Arabia bagian utara. Pertempuran berlangsung pada Rajab 9 H dan terjadi pada udara yang panas.

Interkalasi yang diusulkan riset ini menemukan pertempuran terjadi pada ILN 101, yakni pada Agustus–September 630 TU yang bertepatan dengan puncak musim panas Madinah.

3.4 Haji pertama

Ibadah haji pertama kali diperintahkan tahun 9 H dengan Abu Bakar RA menjadi *amirul haj*. Al-Qurthubi dalam tafsir *al-Jami' li Ahkam al-Qur'an* menyatakan sesungguhnya haji pertama terjadi pada Zulkaidah 9 H (Jannah, 2015).

Interkalasi yang diusulkan riset ini menemukan haji pertama terjadi pada ILN 107, yakni pada Februari 631 TU atau 13 lunasi sebelum haji *wada'*. Lunasi interkalasi tahun 9 H mungkin disisipkan di antara Rajab dan Zulkaidah.

3.5 Pertempuran Badar

Pertempuran Badar adalah benturan besar pertama konflik Makkah–Madinah. Pertempuran terjadi pada Jumat 17 Ramadhan 9 H dalam udara yang panas.

Ekstrapolasi interkalasi yang diusulkan riset ini menemukan pertempuran terjadi pada ILN 14, yakni pada Jumat 19 Agustus 623 TU yang bersamaan dengan puncak musim panas Madinah. Peristiwa ini juga menandakan tahun 2 H adalah tahun *Naasi'* dan lunasi interkalasinya mungkin disisipkan di akhir tahun.

3.6 Perbandingan interkalasi

Tujuh tahun *Naasi'* dalam periode 2–10 H (tabel 1) jauh lebih banyak daripada usulan Percevall. Perbedaan mencolok ini mengugurkan hipotesa kalender Yahudi menginspirasi *Naasi'* hingga dasawarsa pertama Kalender Hijriah.

Sebaliknya interkalasi beruntun pada dasawarsa pertama kalender Hijriah mirip interkalasi kalender Romawi menjelang berlakunya reformasi Julian pada 45 STU. Dalam upaya mengubah kalender dari semula kala suryacandra menjadi kala surya, otoritas Romawi menyisipkan 90 hari tambahan yang menciptakan “era bingung.” Tambahan itu untuk menciptakan siklus kabisat yang stabil sehingga kalender Romawi pasca reformasi menjadi lebih stabil dan tetap selaras dengan periode tropis

Matahari sebagai acuan barunya setelah semula berdasar periode sinodis Bulan.

Pada kalender Hijriah, interkalasi beruntun mungkin juga bertujuan untuk menciptakan kalender yang lebih stabil pasca transformasi kala suryacandra menjadi kala candra. Meskipun dalam kalender Hijriah dikontrol oleh intervensi ilahiah, bukan oleh otoritas saat itu (yakni Rasulullah SAW). *Wallahua'lam*.

4 KESIMPULAN

Telah dilaksanakan riset sifat *Naasi'* dalam dasawarsa pertama kalender Hijriah berdasarkan. Hasilnya dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. GBS 17 Mei 626 TU membuktikan pergeseran 6 lunasi dalam kalender Hijriah dan menjadi indikasi dasawarsa pertama kalender Hijriah merupakan kala suryacandra.
2. Pertempuran Khandak dan Tabuk serta haji pertama membuktikan tahun 5 H dan 9 H adalah tahun *Naasi'*.
3. Ekstrapolasi *Naasi'* bagi tahun 2 H bersesuaian dengan waktu Pertempuran Badar pada Jumat 17 Ramadhan..
4. Pada periode 2–10 H terjadi 7 tahun *Naasi'* (2 H, 5 H, 6 H, 7 H, 8 H, 9 H dan 10 H), jauh lebih besar dari usulan 3 tahun *Naasi'* menurut hipotesa Percevall. Sehingga *Naasi'* tidak terinspirasi dari kalender Yahudi.
5. Interkalasi beruntun pada dasawarsa pertama kalender Hijriah mungkin intervensi ilahiah guna menciptakan kalender yang lebih stabil dalam bentuk kala candra.

5 PUSTAKA

- Ilyas, M. 1994, *Q. J. R. astr. Soc.* 35, 425– 461.
Ilyas, M. 1991, *J. Br. astr. Assoc.* 101 (3), 175– 176.
Ioh, H. 2014, *Arabica* 61 (2014), 471– 513.
Jannah, EU. 2015, *Kalender Hijriah Kriteria 29 dalam Tinjauan Astronomi dan Fikih*, UIN Walisongo, Semarang, tesis.
al-Saleem, S. 2017, *Arab. J. Sci. Eng.*, 23 Oct 2017, doi 10.1007/s13369-017-2892-5.
Khalisi, E. 2021, *Joshua's Total Solar Eclipse at Gibeon*, Univ. of Heidelberg, habilitation thesis.
Espenak, F., & Meeus, J. 2009, *Five Millenium Canon of Lunar Eclipses –1999 to +3000 (2000 BCE to 3000 CE)*. Maryland, NASA GSFC, NASA/TP-2009-214172.
National Meteorology & Environment Center (NMEC). 2010, *Surface Annual Climatological Report 1985–2010*. Saudi Arabia, Ministry of Defence & Aviation.
an-Nadwi, AHH. 2001, *as-Sirah an-Nabawiyah*, Damaskus, Darul Qalam.
al-Baijuri, I. 2007, *Hasyiyah al-Baijuri, Hasyiyatus Syekh Ibrahim al-Baijuri*, Indonesia, Darul Kutub al-Islamiah, 1428 H/2007.

Tabel 1. Korelasi ILN, durasi lunasi, nomor lunasi, nama lunasi dan lunasi interkalasi dasawarsa pertama Kalender Hijriah.

<i>ILN</i>	<i>Durasi Lunasi (dalam Kalender Gregorian)</i>	<i>Nomor Lunasi</i>	<i>Nama Lunasi</i>	<i>Peristiwa</i>
120	28 Feb – 28 Mar 632	13	Zulhijjah	Haji wada' (<i>amirul haj</i> Rasulullah SAW)
119	29 Jan – 27 Feb 632	12	Zulkaidah	
•	•	•		
108	11 Mar – 9 Apr 631	1 (10 H)		
107	9 Feb – 10 Mar 631	13	Zulhijjah	Haji pertama (<i>amirul haj</i> Abu Bakar RA)
106	10 Jan – 8 Feb 631	12	Zulkaidah	
•	•	•		
101	16 Aug – 13 Sep 630	7	Rajab	Pertempuran Tabuk
•	•	•		
95	20 Feb – 21 Mar 630	1 (9H)		
94	21 Jan – 19 Feb 630	13		
93	22 Dec – 20 Jan 630	12		
•	•	•		
82	1 Feb – 2 Mar 629	1 (8H)		
81	2 Jan – 31 Jan 629	13		
80	4 Dec – 1 Jan 629	12		
•	•	•		
69	14 Jan – 12 Feb 628	1 (7H)		
68	16 Dec – 13 Jan 628	13		
67	16 Nov – 15 Dec 627	12		
•	•	•		
56	26 Dec – 24 Jan 627	1 (6H)		
55	27 Nov – 25 Dec 626	13		
54	28 Oct – 26 Nov 626	12	Zulkaidah	Pertempuran Khandak
53	28 Sep – 27 Oct 626	11	Syawal	Pertempuran Khandak
•	•	•		
48	3 May – 1 Jun 626	6	Jumadilakhir	Gerhana Bulan Sebagian 17 Mei 626
•	•	•		
43	7 Dec – 5 Jan 626	1 (5H)		
42	8 Nov – 6 Dec 625	12		
•	•	•		
31	18 Dec – 15 Jan 624	1 (4H)		
30	18 Nov – 17 Dec 624	12		
•	•	•		
19	29 Dec – 27 Jan 624	1 (3H)		
18	30 Nov – 28 Dec 623	13		
•	•	•		
14	4 Aug – 1 Sep 623	9	Ramadhan	Pertempuran Badar (Jumat 19 Agustus 623)
•	•	•		
6	10 Dec – 8 Jan 623	1 (2H)		

ROWOT SASAK (Interpretasi Kultural Perbintangan Masyarakat Lombok)

M. Awaludin¹

¹*Prodi Ilmu Falak, Universitas Islam Negeri (UIN) Mataram, Mataram, Indonesia*
E-mail: muhammad.awaludin92@gmail.com

ABSTRAK

Masyarakat Nusantara telah lama mengenal keilmuan astronomi, salah satunya yaitu keberadaan bintang Polaris yang berfungsi untuk menandai arah utara. Selain itu masyarakat Nusantara juga mulai memaknai serta menamai gugus-gugus bintang, planet, dan galaksi dengan interpretasi kulturalnya sendiri. Salah satu yang paling terkenal di wilayah Nusantara terkait dengan astronomi dan masyarakat adalah pranata mangsa. Pranata mangsa kemudian menggunakan satu gugus bintang yang dijadikan pedoman musim, yaitu gugus Lintang Kartika. Salah satu peradaban nusantara yang mengalami perkembangan ilmu astronomi cukup baik adalah Suku Sasak di Pulau Lombok. Mereka mengenali rasi dan gugus bintang dengan cara tradisi, bahkan Lintang Kartika mereka namai secara tradisi dengan nama Bintang Rowot. Maka tulisan ini ingin mengungkap bagaimana sejarah keastronomian masyarakat Suku Sasak di Pulau Lombok. Metodologi yang penulis gunakan yaitu field research dengan pengumpulan data melalui observasi, wawancara dan dokumentasi. Sementara analisis data menggunakan tipe analisis deskriptif. Hasil penelitian ini bahwa masyarakat Suku Sasak memiliki interpretasi kultural terhadap beberapa benda langit (bintang). Bentuk interpretasi yang mereka lakukan, yaitu dengan memberi nama-nama bintang tersebut sesuai dengan kondisi/peristiwa yang terjadi saat itu. Sehingga dapat disimpulkan bahwa sesungguhnya interpretasi kultural yang dilakukan oleh masyarakat Suku Sasak ini adalah upaya pengenalan terhadap keilmuan astronomi dengan cara tradisi.

Kata Kunci: *Template - Naskah - Panorama*

1 PENDAHULUAN

Masyarakat Nusantara telah lama mengenal astronomi dan mengapresiasinya dalam bentuk sistem penanggalan dan pendirian bangunan. Pembangunan Candi Borobudur pada abad ke-8 tidak terlepas dari pengetahuan lokal tentang astronomi. Peletakan batu pertama Candi Borobudur memperhitungkan keberadaan sebuah bintang bernama Polaris (Bintang Utara). Keberadaan Polaris berfungsi untuk menandai arah utara, kemudian keberadaan Polaris ini memudahkan para pekerja Borobudur meneruskan tahap pembangunan berikutnya. Dalam *pranoto wongso*, bagian dari Serat Centhini juga banyak ditemukan penamaan terhadap gugus-gugus bintang, planet, dan galaksi. Salah satu gugus bintang bahkan menjadi pedoman musim adalah gugus Lintang Kartika. Dalam bahasa Latin terkenal sebagai Pleiades. Gugus bintang ini termasuk dalam rasi bintang Taurus. Salah satu peradaban yang mengalami perkembangan ilmu astronomi yang baik adalah *Bangse Sasak* di Pulau Lombok. Mereka mengenal rasi dan gugus bintang dengan cara tradisi, sehingga tulisan singkat ini mencoba memaparkan pengetahuan tradisi masyarakat Suku Sasak di Lombok pada bidang astronomi terutama perbintangan.

2 PAPARAN DATA

Di tanah Nusantara, berabad-abad lampau ketika peradaban baru dimulai, catatan dan cerita turun

temurun dalam budaya masyarakat sudah menunjukkan berbagai kisah rakyat yang terkait astronomi. (Hendaru Tri Hanggoro, 2019). Sejarah Astronomi di dunia sejak milenia lalu telah membuktikan bahwa keilmuan astronomi yang kita terima saat ini merupakan sebuah sejarah nan panjang dan tak berujung. Selain itu, masyarakat juga dituntut untuk terus bisa berinteraksi dengan alam astronomi ke dalam akulturasi sosial-budaya. Bumi Nusantara sejak dahulu telah lekat dengan kosa kata mitos dan legenda, tanpa terkecuali tentang Jagad Raya. Mitos dan legenda yang disampaikan melalui tutur lisan secara turun temurun ini sesungguhnya merupakan usaha untuk mengurai fenomena yang ada di sekitarnya, termasuk hubungan dirinya dengan langit. (Widya Sawitar, 2015).

Sejalan dengan jejak peradaban, lahirlah beragam mitos seputar jagad raya dan alam semesta. Berawal dari budaya lisan yang turun temurun, dari generasi demi generasi yang berlanjut hingga era kini. Tidak bisa disangkal pula bahwa astronomi yang kini kita pahami tidak dapat lepas dari suatu tahapan, yaitu tahap mitos, yang pada akhirnya justru menjadi cikal bakal lahirnya astronomi sebagai ilmu sains. Sehingga bisa disimpulkan bahwa astronomi adalah sketsa kebudayaan manusia. Tak bisa disangkal bahwa mitos adalah cikal bakal lahirnya ilmu pengetahuan yang saat ini serba modern. Pertanyaannya, apakah itu mungkin? *Please, sit silently at your contemplating site, then think – how small your*

body, how big your mind-exploration-imagination-with your inner-core of the heart. (Widya Sawitar, 2017).

Kiranya astronomi juga dapat dijadikan media perenungan untuk menapaki jalan menuju sains yang modern secara terintegrasi. Hal ini harusnya menggiring ke kesadaran bahwa apa yang dipelajari dengan ragam teknik terkait pemahaman tradisi terhadap langit berupa mitos adalah cara masyarakat membangun pengetahuan dan terapannya tentang langit, yang akhirnya melahirkan pola pikir yang seragam secara massal (kolektif) lalu membentuk karakter unik dari sebuah budaya. Ilmu perbintangan yang menjadi salah satu kandungan sains kini dikenal dengan astronomi pun akhirnya harus diakui sebagai gambaran budaya manusia. (Widya Sawitar, 2016).

Astronomi tradisi Nusantara minimal dapat dilihat dari dua sisi yang berdampingan secara harmonis, yaitu budaya astronomi yang berlandas agraris dan astronomi tradisi kelautan. Salah satu bukti kuat bahwa astronomi tradisi sudah bercokol cukup lama dan beriringan dengan peradaban manusia terutama di Nusantara, yaitu adanya penamaan nama-nama benda langit yang beragam di seluruh wilayah Indonesia. Penamaan rasi bintang berdasarkan nama lokal menunjukkan bahwa masyarakat Indonesia di masa lampau juga melakukan pengamatan langit.

2.1 Lombok dan Etno-Astronominya

Lombok adalah sebuah pulau di kepulauan Sunda Kecil atau Nusa Tenggara, tepatnya di provinsi Nusa Tenggara Barat. Nusa Tenggara Barat (NTB) sendiri secara geografis terletak antara 115° - 119° Bujur Timur dan 8° - 9° Lintang Selatan (Badan Pusat Statistik, 2020). Sekitar 80% penduduk Pulau Lombok adalah Suku Sasak (Zul Hidayah, 2015).

Salah satu daerah yang juga mengalami fase perkembangan ilmu pengetahuan di bidang astronomi adalah Pulau Lombok. Perkembangan keilmuan astronomi di Pulau Lombok cukup menggairahkan. Masyarakat Suku Sasak dalam berkomunikasi di samping menggunakan bahasa Indonesia sebagai bahasa nasional, penduduk Pulau Lombok (terutama Suku Sasak) menggunakan bahasa Sasak (bahasa asli) sebagai bahasa utama dalam percakapan sehari-hari. (Departemen Pendidikan dan Kebudayaan, 2002).

Lombok atau Gumi Sasak memiliki penamaan rasi bintang yang dilakukan secara tradisi. Kemudian ilmu ini berkembang dan hidup sebagai kepercayaan bagi masyarakat tradisi di Lombok. Patut diduga kuat bahwa salah satu patokan yang lekat di dalam kepercayaan masyarakat Suku Sasak terkait dengan

keilmuan astronominya, yaitu kisah Legenda Putri Mandalika. Kisah Putri Mandalika benar-benar hidup sebagai mitologi yang berkaitan erat dengan perbintangan dan perhitungan waktu dalam masyarakat Suku Sasak. Di dalam kisah Putri Mandalika, Sang Putri sempat menyebutkan janji bahwa ia akan terus kembali kepada rakyatnya (Suku Sasak) pada saat “Tanggal 20 Bulan 10 Penanggalan Sasak” dalam bentuk Nyale (cacing laut). (Ari Irawan, 2014).

2.2 Interpretasi Kultural Perbintangan Masyarakat Sasak

Masyarakat tradisional Sasak secara turun-temurun mengajarkan kepada generasi berikutnya cara mengamati rasi bintang Rowot dan Tenggale yang digunakan sebagai patokan penting menentukan suatu satuan masa. Masyarakat Sasak tradisi menaruh perhatian yang tinggi pada benda-benda langit dan mereka menamai beberapa rasi bintang yang kemudian dijadikan sebagai pedoman. Salah satu budaya masyarakat Sasak yang masih lekat dengan objek langit adalah hadirnya kisah tentang Putri Mandalika yang konon merupakan cikal bakal keberadaan Bintang Rowot. Sosok Putri Mandalika dianggap menjelma menjadi sebuah bintang yang sangat terkenal di tradisi masyarakat Lombok, yaitu bintang Rowot (Pleiades). Rowot merupakan nama tradisi yang diberikan masyarakat Lombok dalam memahami rasi bintang yang keilmuannya cukup berkembang pesat saat itu.

Penamaan bintang secara tradisi dalam masyarakat Sasak antara lain (Ari Irawan, 2014) : *Rowot* (Pleiades), *Tenggale* (Orion), *Bintang Basong* (Sirius), *Bintang Pai* (Crux), *Bintang Jaran* (Pegasus), *Bintang Kukus* (Komet) dan *Bintang Sok* (Scorpion). Diantaranya rasi bintang tersebut, dua kelompok gugusan yang memiliki peran penting dalam menentukan masa tahun dalam masyarakat Lombok adalah rasi bintang Rowot (Pleiades) dan Tenggale (Orion).

2.3 Bintang Tradisi

Rasi bintang yang dimaknai secara tradisi oleh masyarakat Lombok dapat dilihat pada penjelasan di bawah ini:

a. Bintang Rowot

Rasi bintang Rowot atau Lintang Kartika atau dalam bahasa ilmiahnya disebut Pleiades, yang dikenal juga dengan julukan *seven sister*, berjarak sekitar 541 tahun cahaya dari Bumi. (Gunawan Admiranto, 2017). Bagi masyarakat Sasak tradisi, bintang ini merupakan penanda utama untuk mengenali perpindahan mangse (mangsa atau musim) dari ketaun (penghujan) ke kebalit (kemarau).

b. Bintang Tenggalé

Bintang Tenggalé yang juga dikenal dengan nama bintang Orion, adalah suatu rasi bintang yang sering disebut-sebut sebagai “Sang Pemburu”. Dalam masyarakat Sasak tradisi, perhitungan penampakan pada posisi tertentu dan terbenamnya rasi bintang ini dengan bintang Rowot / Pleiades dijadikan sebagai acuan penentu perjalanan tahun atau taun (musim penghujan).

c. Bintang Basong

Masyarakat Sasak lebih mengenalnya dengan sebutan bintang Basong. Nama Basong ini digunakan karena diyakini pada jam-jam tertentu saat bintang ini telah membentuk formasi melingkar (terangnya bulat sempurna), anjing tidak bisa mengeluarkan suara gonggongannya. Jika kita melihat ke arah tenggara, akan terlihat bintang paling terang berwarna biru keputihan, yang di dalam dunia astronomi modern dikenal dengan nama bintang Sirius. (Gunawan Admiranto, 2000).

d. Bintang Pai

Bintang Pai dalam astronomi Indonesia dikenal dengan bintang Salib Selatan (*Southern Cross* atau *Crux*). Bagi masyarakat Sasak tradisi, ketika bintang ini jelas penampakannya (sepenuhnya terlihat di zenith pengamat), hal ini menandakan waktu tanggal 5 bulan enem (6) penanggalan Sasak.

e. Bintang Jaran

Pada masyarakat Nusantara, rasi bintang ini akan tampak jelas pada sekitar pukul 21:00 WIB tau 22:00 WITA selama bulan Oktober sehingga bisa digunakan sebagai penanda waktu. Begitupun yang dilakukan oleh masyarakat Sasak dalam menandai waktu. Penamaan *Jaran* ini, dikarenakan formasi rasi bintang ini mirip seperti kuda. Pegasus sendiri dalam bahasa Yunani memiliki arti kuda terbang dan bahasa Sasaknya kuda adalah *Jaran*.

f. Bintang Kukus/komet

Di dalam masyarakat Sasak sendiri hadirnya komet atau bintang kukus ini diartikan sebagai pertanda bahwa akan datangnya musibah. Tidak disebutkan musibah yang akan terjadi dalam bentuk apa, namun sebagian besar masyarakat percaya bahwa musibah itu berupa bencana alam seperti gempa bumi dan gunung meletus. Hal ini selaras dengan keilmuan terkini di mana Lombok berada pada lingkaran api (*ring of fire*). Salah satu yang paling dekat yaitu saat terjadinya Gempa Bumi Lombok 2018 lalu, beredar cerita bahwa beberapa orang masyarakat di Utara melihat “bintang jatuh” pada malam sebelum gempa terjadi.

g. Bintang Sok

Bintang Sok adalah salah satu bintang yang juga dijadikan sebagai petunjuk arah. Bintang Sok ini biasanya menjadi petunjuk arah tenggara. Bagi

masyarakat Sasak tradisi, kenampakan yang jelas dari bintang Sok adalah waktu yang bertepatan dengan tanggal 5 bulan *pituq* (7) penanggalan Sasak.

3 PENUTUP

Perkembangan astronomi di Pulau Lombok cukup mengagumkan, hal ini terbukti dengan adanya catatan dan peninggalan berupa pengetahuan astronomi dasar yang dibalut dengan cara tradisi. Keilmuan Astronomi masyarakat Lombok dalam bahasan di atas merupakan salah satu cabang Astronomi yang dikategorikan sebagai Etnoastronomi. Hal ini juga menjadi bukti bahwa masyarakat Sasak telah mengalami perkembangan ilmu pengetahuan yang maju di bidang astronomi sejak lama. Walaupun kini keilmuan astronomi masyarakat Lombok itu masuk dalam kategori etno-astronomi dan kepercayaan. Namun, keilmuan itu tetap hidup hingga saat ini di dalam masyarakat Suku Sasak. Selain itu, hal ini juga menjadi bukti bahwa perkembangan keilmuan dan peradaban masyarakat Suku Sasak cukup tinggi, dengan adanya bukti bahwa masyarakat Suku Sasak telah melakukan interpretasi keilmuan astronomi dengan sangat baik walau dengan cara tradisi.

Ucapan Terima Kasih

Riset ini merupakan riset mandiri peneliti dalam rangka menambah khazanah pengetahuan terkait dengan keilmuan peneliti di bidang Ilmu Falak dan Astronomi. Kami menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah membantu dalam penelitian ini, diantaranya: Lembaga RONTAL (Rowot Nusantara Lombok), Bencingah Institut dan MAS (Majelis Adat Sasak). Serta terimakasih kepada semua pihak yang telah menyelenggarakan kegiatan Seminar Panorama Antariksa.

4 PUSTAKA

- Admiranto, Gunawan. (2000). *Menjelajahi Bintang, Galaksi, dan Alam Semesta*. Yogyakarta: Kanisius.
- Admiranto, Gunawan. (2017). “Eksplorasi Tata Surya”, Bandung: Mizan.
- Badan Pusat Statistik Provinsi Nusa Tenggara Barat. (2017) “Letak Geografis daerah Nusa Tenggara Barat”, diakses pada 5 September 2020, dari <http://ntb.bps.go.id/linkTabelStatis/view/id/113>.
- Departemen Pendidikan dan kebudayaan. (2002). *Sejarah Daerah Nusa Tenggara Barat*. Mataram: Depdikbud.
- Hanggoro, Hendaru Tri. (2019). “Mengenal Budaya Astronomi Nusantara”, pada 5 September 2020, dari <https://historia.id/sains/articles/menggali-budaya-astronomi-nusantara-vJNap>

Seminar Panorama Antariksa 2021

Hidayah, Zulyani. (2015). *Ensiklopedi Suku Bangsa Di Dindonesia*. Jakarta: yayasan Pustaka Obor Indonesia.

Irawan, Lalu Ari., dkk. (2014). *Mengenal Kalender Rowot Sasak*. Mataram: Genius.

Sawitar, Widya, 2015, *Astronomi dalam Cerita Rakyat Nusantara*, Makalah pada Seminar Astronomi dalam Budaya Nusantara (SINDARA) di Universitas Ahmad Dahlan Yogyakarta

Sawitar, Widya., 2016, *Etnoastronomi dalam Astronomi Budaya Nusantara*, pada acara Kuliah Umum di Jurusan Fisika – Universitas Tadulako – Palu – Sulawesi Tengah dalam rangka fenomena Gerhana Matahari Total tanggal 9 Maret 2016 di Palu dan sekitarnya.

Potensi Wilayah untuk Pengembangan Astrowisata di Kabupaten Bangka, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung

F. Zainuddin^{1*} dan C. Kunjaya²

¹SMA Negeri 1 Mendo Barat Kepulauan Bangka Belitung Indonesia

²Astronomi Institut Teknologi Bandung Indonesia

*E-mail: febrizainuddin6@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian lokasi potensial pengembangan astrowisata dilaksanakan di Kabupaten Bangka, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung menggunakan pendekatan kuantitatif melalui observasi, studi dokumentasi, dan wawancara. Parameter alami berupa keadaan klimatologi meteorologi dan elevasi. Sedangkan parameter non alami adalah kecerahan langit malam dan faktor-faktor antropogenik berupa aksesibilitas jalan, sarana wisata, fasilitas pendukung wisata, tersedianya pramuastrowisata, kedekatan dengan daya tarik wisata lainnya, dan keberadaan losmen/hotel. Studi dokumentasi untuk mengumpulkan data klimatologi meteorologi dari Badan Meteorologi dan Klimatologi Republik Indonesia. Data elevasi diukur menggunakan Global Positioning System (GPS). Data kecerahan langit malam diukur menggunakan Sky Quality Meter (SQM) dan data antropogenik merupakan hasil observasi. Hasil penelitian menunjukkan keadaan klimatologi dan meteorologi Provinsi Kepulauan Bangka Belitung dikategorikan baik dan nyaman untuk kegiatan astrowisata dan lokasi potensial astrowisata dengan poin pembobotan tertinggi untuk parameter elevasi, kecerlangan langit, dan antropogenik dari Bukit Tujuh, Desa Sempan, Kecamatan Pemali dengan nilai pembobotan sebesar 61 poin sehingga Bukit Tujuh menjadi destinasi wisata potensial untuk pengembangan astrowisata di Kabupaten Bangka, Provinsi Kepulauan Bangka Belitung.

Kata Kunci: Astrowisata – Kecerahan langit malam – Kabupaten Bangka

1 PENDAHULUAN

Individu maupun kelompok melakukan perjalanan untuk menikmati fenomena benda-benda langit sembari berwisata dilengkapi dengan fasilitas pengamatan berupa teleskop. Mereka terlibat dalam satu kegiatan yakni astrowisata. Untuk memuaskan rasa keingintahuan dan ketertarikan mereka terhadap astronomi, perlu adanya upaya mencari lokasi potensial untuk astrowisata.

Tahap awal penentuan lokasi potensial astrowisata yakni menghitung indeks kenyamanan iklim lokasi berdasarkan data klimatologis dan meteorologis Provinsi Kepulauan Bangka Belitung. Tahap berikutnya menemukan dimanakah wilayah potensial pengembangan astrowisata terhadap delapan kawasan geowisata Kabupaten Bangka. yaitu (1) Danau Red Hill Kampung Reklamasi, Desa Riding Panjang Kecamatan Merawang; (2) Pantai Batu Dinding, Desa Air Jukung, Kecamatan Belinyu; (3) Puri Tri Agung, Desa Rebo, Kota Sungailiat; (4) Pantai Tikus Emas, Desa Rebo, Kota Sungailiat; (5) Pantai Matras, Desa Matras, Kota Sungailiat; (6) Bukit Siam, Kota Sungailiat; (7) Bukit Tujuh Desa Sempan Kecamatan Pemali; dan (8) Bukit Maras, Desa Berbura, Kecamatan Riausilip.

Penentuan wilayah potensial pengembangan astrowisata dengan mengukur kecerlangan langit, mengukur elevasi, serta observasi data antropogenik di sekitar lokasi astrowisata menjadi pertimbangan

penting bagi wisatawan khususnya yang membawa keluarga (*Family Tourist*).

2 TEKNIK ANALISIS DATA

2.1 Indeks kenyamanan iklim untuk wisata

Indeks kenyamanan iklim berwisata menggunakan *Holiday Climate Index* (HCI) oleh Manto Tang (2013) diawali dengan menghitung *Temperatur Humidity Index* (THI) dari persamaan Nieuwolt (1998) berikut ini:

$$THI = (0.8 \times T) + \left\{ \frac{RH \times T}{500} \right\} \quad (1)$$

THI adalah nilai indeks kenyamanan, T adalah suhu udara (°C) dan RH adalah kelembaban relatif (%).

Hasil penghitungan THI dikategorikan berdasarkan rentang nilai menurut Emmanuel (2005), yaitu < 8 sensasi termal tidak nyaman terlalu dingin, $8 \leq THI \leq 21$ sensasi termal 50% wisatawan merasa nyaman, $21 \leq THI \leq 24$ sensasi termal 100% wisatawan merasa nyaman, $24 \leq THI \leq 26$ sensasi termal 50% wisatawan merasa nyaman, dan $THI > 26$ sensasi termal tidak nyaman terlalu hangat.

Pembagian bobot parameter HCI, yakni komponen termal (THI) berupa temperatur udara rata-rata harian (°C) dan kelembaban relatif harian (%) adalah 40%, komponen estetis berupa cakupan awan (%) adalah 20%, lalu komponen fisik (P) berupa curah hujan harian (mm) adalah 30% dan kecepatan angin harian (km/jam) adalah 10%.

Sehingga indeks *HCI* dihitung dengan rumus berikut:

$$HCI = (T \times 4) + (A \times 2) + (R \times 3) + (W \times 1) \quad (2)$$

T adalah kenyamanan termal yang dirasakan wisatawan, A adalah cakupan awan harian dalam jangka waktu tertentu (%), R adalah curah hujan harian dalam jangka waktu tertentu (mm); dan W adalah kecepatan angin harian (km/jam). Cakupan awan memiliki pengaruh besar terhadap visibilitas pengamatan benda langit. Maka disusun penyesuaian terhadap pembobotan dalam *HCI* terhadap cakupan awan harian (%) menggunakan sub indeks cakupan awan harian dari penelitian Wacker, *et al* (2015).

Perhitungan *HCI* dikategorikan menurut Mieczkowski (1985) yakni indeks *HCI* 90-100 kategori ideal keterangan nyaman, indeks *HCI* 80-89 kategori sangat bagus keterangan nyaman, indeks *HCI* 70-79 kategori baik keterangan nyaman, indeks *HCI* 60-69 kategori cukup baik keterangan nyaman, dan <60 dikategorikan tidak nyaman.

2.2 Lokasi potensial astrowisata

Lokasi potensial astrowisata ditentukan oleh tiga faktor, yakni elevasi, kecerlangan langit, dan faktor-faktor antropogenik. Masing-masing faktor tersebut disusun berdasarkan subkriteria dan pembobotan. Pengukuran elevasi menggunakan GPS Montana 280 dengan skor maksimum 10, kecerlangan langit diukur menggunakan SQM LU-DL selama 10 menit diarahkan ke zenit 90°, utara 60°, utara 30°, timur 60°, timur 30°, selatan 60°, selatan 30°, barat 60°, dan barat 30° dengan skor maksimum sebanyak 60, serta faktor antropogenik dengan skor maksimum sebanyak 30 sehingga skor paling ideal untuk penentuan lokasi astrowisata adalah 100.

3 HASIL DAN KESIMPULAN

3.1 Indeks kenyamanan iklim Kepulauan Bangka Belitung untuk astrowisata

Data BMKG Provinsi Kepulauan Bangka Belitung tahun 1980 – 2020 tercatat kelembaban udara relatif harian rata-rata mencapai 83%, temperatur udara harian rata-rata mencapai 27 °C, cakupan awan rata-rata per tahun mencapai 50%, curah hujan rata-rata mencapai 7 mm/hari, kecepatan angin rata-rata harian mencapai 6 km/jam sehingga hasil perhitungan *THI* adalah 26 berada pada rentang $24 < THI \leq 26$ dimana 50% astrowisatawan akan merasa nyaman dengan keadaan kelembaban udara dan temperatur udara di Kepulauan Bangka

Belitung. Perhitungan poin *HCI* Kepulauan Bangka Belitung adalah 73, berdasarkan indeks *HCI* berada pada rentang 70-79 maka dikategorikan baik dengan keterangan nyaman. Ini berarti tidak ada hal ekstrim yang terjadi terhadap keadaan klimatologi dan meteorologi Kepulauan Bangka Belitung yang mengganggu astrowisata. Cakupan awan hanya sebagian (50%) berarti masih ada peluang menikmati atraksi astrowisata tanpa terhalang oleh awan, dan kecepatan angin tidak terlalu kuat sehingga astrowisatawan dapat menikmati atraksi astrowisata.

3.2 Lokasi potensial astrowisata di Kabupaten Bangka

Pengukuran kecerlangan langit terhadap delapan area geowisata menunjukkan bahwa Bukit Tujuh, Desa Sempan memiliki nilai rata-rata tertinggi kecerlangan langit mencapai 21.94 mag/arcsec² masuk kelas Bortle 2 dengan pembobotan 40 poin. Pengukuran elevasi terhadap delapan kawasan geowisata menunjukkan Bukit Tujuh, Desa Sempan berada pada elevasi 109 mdpl dengan pembobotan 5 poin. Hasil observasi faktor-faktor antropogenik Bukit Tujuh, Desa Sempan adalah 16 poin.

Berdasarkan pengukuran kecerlangan langit, pengukuran elevasi, dan observasi faktor antropogenik delapan lokasi potensial astrowisata di Kabupaten Bangka ditemukan wilayah dengan jumlah poin pembobotan tertinggi adalah Bukit Tujuh, Desa Sempan sebanyak 61 poin. Adanya dukungan nilai kecerlangan langit yang baik, berada pada elevasi yang cukup tinggi dan mudah dijangkau serta poin pembobotan antropogenik yang cukup tinggi menjadikan Bukit Tujuh, Desa Sempan menjadi lokasi potensial astrowisata di Kabupaten Bangka.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Pemerintah Provinsi Kepulauan Bangka Belitung yang telah mendukung kegiatan penelitian ini.

4 PUSTAKA

- Emmanuel, R., (2005). *Build. Environ.*, hal 1591-1601.
S. Nieuwolt dan R.G. McGregor. (1998). *Buku. John Wiley & Sons Ltd. England (UK)* hal. 339.
Tang, Mantao. (2013). *Geography - Tourism Policy and Planning University Waterloo Kanada* hal. 20.
Wacker, S., *et al*. (2015). *J.Geophys. Res. Atmos.* hal. 699.



TEMA 6:
Popularisasi, Komunikasi, & Public
Outreach Astronomi

Kegiatan Observasi Langit Malam Komunitas Astronom Amatir se-Indonesia dalam Rangka Edukasi Astronomi kepada Masyarakat: Tinjauan Sebelum dan Saat Pandemi

N. Kafilah^{1,2*}, A. Faradila^{1,3}, M.Z.S. Mutaqin^{1,4}, dan T.N. Aminudin^{1,5}

¹Astronom Amatir Bandung Raya (Astrada), Bandung, Indonesia

²Astronom Persis, Bandung, Indonesia

³Himpunan Mahasiswa Astronomi (Himastron) ITB, Bandung, Indonesia

⁴Astrophile, Bandung, Indonesia

⁵Komunitas Pendongak Langit (Kapella) Unpad, Bandung, Indonesia

*E-mail: astrada.bandung@gmail.com

ABSTRAK

Observasi langit malam yang dilaksanakan oleh komunitas astronomi bertujuan untuk memberikan pengalaman mengamati benda langit secara langsung dan edukasi terkait astronomi baik kepada anggotanya maupun kepada masyarakat. Kami telah melakukan survei terhadap 52 dari 102 komunitas astronomi se Indonesia selaku penyelenggara dan 100 astronom amatir selaku peserta. Sebelum pandemi, 46 dari 52 komunitas (88%) mengadakan observasi langit malam. Selama pandemi komunitas yang mengadakan kegiatan observasi langit malam mengalami penurunan 47% menjadi 24 komunitas. Rentang peserta kegiatan tersebut sebelum pandemi adalah 5-200 orang, sedangkan saat pandemi 1-50 orang. Edukasi astronomi saat kegiatan observasi langit malam di luar topik pengamatan sebelum pandemi dilaksanakan oleh 38 komunitas; saat pandemi 10 komunitas. Dari 100 orang responden 80 orang menyatakan bahwa kegiatan observasi langit malam memberikan pengalaman mengamati benda langit dan edukasi terkait astronomi. Keseluruhan responden berpendapat jika kegiatan astronomi, khususnya observasi langit malam, lebih nyaman dilaksanakan secara luring. Dapat disimpulkan bahwa kegiatan observasi langit malam yang diselenggarakan oleh komunitas astronomi, baik sebelum maupun saat pandemi, dapat menjadi jalan untuk memberikan pengalaman mengamati benda langit dan edukasi astronomi kepada masyarakat.

Kata Kunci: komunitas astronomi - observasi - pandemi

1 PENDAHULUAN

1.1 Komunitas Astronomi

Komunitas astronom amatir adalah wadah bagi sekelompok masyarakat dari berbagai kalangan usia yang mempelajari astronomi karena hobi. Kegiatan komunitas bersifat edukatif dan lebih banyak bersinggungan dengan masyarakat langsung. Bahkan beberapa dari komunitas astronom amatir memiliki *tagline* “Memasyarakatkan Astronomi”.

Komunitas astronomi memiliki kaitan erat dengan pengamatan langit. Sebelum pandemi, jenis kegiatan pengamatan dari komunitas astronomi beragam. Namun sejak pandemi, kegiatan pengamatan mendapatkan kendala. Kegiatan pengamatan astronomi biasa dilakukan secara berkerumun di sebuah tempat, tetapi saat pandemi hal-hal tersebut tidak dapat dilakukan karena dapat meningkatkan resiko penyebaran Covid-19.

Sejak kegiatan Jambore Nasional Klub Astronomi (JANAKA) pada 22-24 September 2017 geliat para astronom amatir untuk berkomunitas meningkat. Terbukti dari sebaran data komunitas per Desember 2020 jumlah komunitas astronomi peserta

jambore baik berbasis wilayah, perguruan tinggi maupun sekolah meningkat dari yang awalnya 39 komunitas (tahun 2017) menjadi 116 komunitas (tahun 2020). Tetapi sejak pandemi banyak dari komunitas tersebut yang memiliki kendala sehingga memilih untuk vakum sementara atau tidak menyelenggarakan kegiatan.

1.2 Observasi Langit Malam

Berbagai kegiatan yang dilaksanakan oleh astronom amatir dapat dikelompokkan menjadi 4 macam kegiatan yaitu observasi objek langit, pengabdian dan edukasi masyarakat, keilmuan astronomi, dan falakiah. Tetapi jika ditelisik lebih jauh, dari ke 4 macam pengelompokan tadi terdapat irisan kegiatan yaitu observasi objek langit seperti: teleskop keliling, pengamatan gerhana, *International Observe the Moon Night* (InOMN), pengamatan hilal, dll.

Observasi objek langit memiliki daya tarik yang tinggi karena memberikan pengalaman yang tidak terlupakan. Peserta mendapat pengalaman pertama kali memakai teleskop, pertama kali melihat galaksi bima sakti secara langsung, pertama kali mengamati



Gambar 1. Data peserta JANAKA 2017 (atas) dan data persebaran komunitas astronomi amatir di Indonesia tahun 2020 (bawah). (sumber: JANAKA)

cincin saturnus, dll. Dibandingkan observasi langit siang hari, observasi langit malam sangat digandrungi masyarakat karena objek yg diamati lebih bervariasi.

Pandemi Covid-19 yang melanda Indonesia sejak Maret 2020 memiliki pengaruh yang besar terhadap kegiatan *outdoor* observasi objek langit. Tetapi hal tersebut tidak mengurangi semangat komunitas astronomi untuk berkegiatan khususnya



Gambar 2. Sosialisasi pengamatan gerhana Matahari tahun 2016. (sumber: Kapella Unpad)



Gambar 3. Kegiatan hunting komet neowise dan pengamatan hujan meteor perseid. (sumber: Astrada)

dalam pengamatan. Pandemi memungkinkan komunitas-komunitas astronomi untuk berinovasi melakukan pengamatan dengan gaya baru, berkolaborasi dengan melakukan pengamatan bersama dari berbagai tempat. Sebagai contoh peringatan InOMN pada Oktober 2020, Himastron ITB melakukan pengamatan virtual dan webinar bekerjasama dengan Pesantren Persatuan Islam Tarogong Garut, ASTRADA, Cirebon Astronomi Club (CAC) dan Forum Kajian Ilmu Falak (ForKIF) Cianjur.



Gambar 4. Kegiatan InOMN 2020 secara daring. (sumber: Himastron ITB)

Dari paparan tersebut perlu dilakukan penelitian terkait kegiatan observasi langit malam komunitas astronomi amatir se-Indonesia dalam rangka edukasi astronomi kepada masyarakat dengan meninjau sebelum pandemi Covid-19 dan saat pandemi.

2 TUJUAN PENELITIAN

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui model observasi langit malam sebelum pandemi dan saat pandemi.
2. Mengetahui topik edukasi saat observasi sebelum pandemi dan saat pandemi.

- Mengetahui respon peserta terhadap metode observasi dan edukasi yang dipakai komunitas astronom amatir sebelum pandemi dan saat pandemi.

3 METODE PENELITIAN

Adapun metode yang digunakan adalah deskriptif kualitatif melalui survei terhadap komunitas-komunitas astronom amatir se- Indonesia dan peserta pengamatan. Angket diisi oleh 52 komunitas dari 102 komunitas yang kami hubungi (14 komunitas lainnya tidak kami hubungi karena tidak ditemukan kontak komunitas baik nomor WA maupun sosial media lainnya). Serta 100 peserta pengamatan atau astronom amatir. Data diolah menggunakan pendekatan statistik.

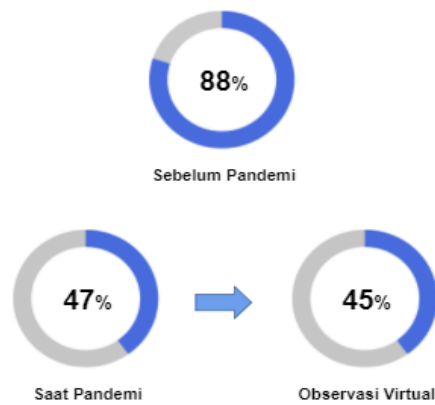
4 ANALISIS DAN HASIL

Berdasarkan survei yang dilakukan terhadap 52 komunitas astronomi di Indonesia diperoleh hasil sebanyak 88% komunitas mengadakan observasi langit malam sebelum pandemi, sedangkan pada saat pandemi terdapat 47% komunitas yang mengadakan observasi langit malam. 45% dari 24 komunitas mengadakan observasi secara virtual. Observasi malam yang dilakukan oleh komunitas-komunitas astronomi tersebut juga mencakup edukasi seputar astronomi dengan berbagai macam topik.

Kegiatan observasi malam yang dilakukan sebelum pandemi memberikan topik edukasi seputar objek pengamatan, teknik pengamatan, dan pengetahuan umum seputar astronomi, sedangkan topik edukasi yang diberikan ketika kegiatan observasi langit malam saat pandemi lebih beragam diantaranya astrofisika, dasar dasar astronomi, kosmologi, etnoastronomi, dll.

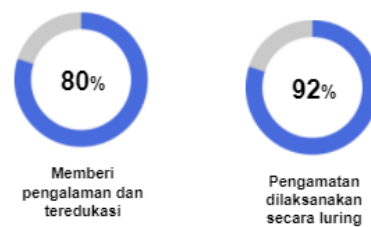
Observasi langit malam yang dilakukan oleh komunitas-komunitas astronom amatir sebelum pandemi secara umum menghadapi kendala sebagai berikut:

- Transportasi dan akomodasi, karena jarak rumah anggota berjauhan.
 - Instrumen terbatas, sebagian komunitas masih belum memiliki teleskop.
 - Polusi cahaya.
- Sedangkan kendala yang dihadapi untuk melakukan observasi langit malam pada saat pandemi sebagian besar komunitas adalah sebagai berikut:
- Keterbatasan akses tempat dan waktu pengamatan.
 - Terkendala protokol kesehatan dan keterbatasan untuk tatap muka.
 - Kesulitan untuk melakukan observasi secara virtual (keterbatasan alat dan keahlian)



Gambar 5. Diagram hasil survei kegiatan observasi langit malam terhadap 52 komunitas

Survei yang dilakukan terhadap peserta menyatakan bahwa 80% peserta memperoleh pengalaman dalam mengamati benda langit dan teredukasi terkait astronomi selama sesi pengamatan berlangsung. 92% peserta memberikan saran terhadap kegiatan observasi langit malam agar dapat dilaksanakan kembali secara luring.



Gambar 6. Diagram hasil survei respon peserta kegiatan observasi langit malam

5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil riset yang telah dilakukan, pandemi Covid-19 memberikan dampak bagi kegiatan komunitas astronomi di Indonesia, salah satunya kegiatan pengamatan langit. Dapat disimpulkan banyak komunitas astronomi yang tidak dapat melaksanakan kegiatan pengamatan. Namun terdapat juga komunitas-komunitas astronomi yang tetap mampu melaksanakan kegiatan pengamatan langit dengan beradaptasi terhadap situasi dan kondisi yang ada.

Sebelum pandemi, model pengamatan yang dilakukan oleh komunitas astronomi di Indonesia adalah pengamatan secara langsung atau luring. Ketika pandemi, terdapat beberapa adaptasi yang dilakukan yaitu pengamatan langit secara daring, pengamatan langit secara luring dengan protokol kesehatan yang ketat, serta pengamatan *hybrid* atau kombinasi dari keduanya.

Secara garis besar, kegiatan pengamatan langit yang dilakukan, baik sebelum maupun saat pandemi, oleh komunitas astronomi di Indonesia memiliki dampak positif yaitu adanya edukasi terkait astronomi kepada para peserta pengamatan yang terdiri dari anggota komunitas maupun masyarakat umum. Sebelum pandemi, topik edukasi saat pengamatan langit berkisar seputar objek pengamatan serta pengetahuan umum seputar astronomi tetapi ketika pandemi topik edukasi yang diberikan saat pengamatan pun lebih dalam dan beragam. Meski begitu, para peserta cenderung memilih pengamatan luring atau observasi langit secara langsung karena pengalaman yang diperoleh lebih terasa daripada pengamatan daring atau jarak jauh.

Ucapan Terima Kasih

Kami menyampaikan terima kasih kepada Bapak Dr. Judistira Aria Utama, S.Si, M.Si selaku

pembina kami di Komunitas Astronom Amatir Bandung Raya (ASTRADA). Serta kepada panitia Seminar Panorama Antariksa 2021, Bapak Dr. Anton Timur Jaelani, S.Si, M.Si yang sudah menyediakan tema Popularisasi, Komunikasi dan Public Outreach Astronomi: memberikan kepercayaan kepada kami untuk dapat turut berkontribusi, dan kepada komunitas astronomi maupun astronom amatir amatir yang sudah mengisi survei sehingga karya tulis ini dapat lahir.

6 PUSTAKA

- Toyib, M., Yusuf, A., 2021, Astronomy as a Tool in Community Building, Promoting Social Unity, and Solidarity: First-hand Experience in East Java, Indonesia, CAPjournal
- Rollinde, E. 'Learning Science Through Enacted Astronomy', International Journal of Science and Math Education

Menjangkau Publik selama Pandemi: Pelajaran dan Potensi Baru Penjangkauan Publik Astronomi

Y. Yulianty^{1*}, P. W. Premadi^{1,2}, M. Yusuf¹, Luthfiandari¹, dan T. H. Pramono¹

¹Observatorium Bosscha FMIPA ITB, Bandung, Indonesia

²Program Studi Astronomi, FMIPA ITB, Bandung, Indonesia

*E-mail: yulianty@as.itb.ac.id

ABSTRAK

Pada makalah ini kami akan paparkan beberapa kegiatan pendidikan dan penjangkauan publik yang dilakukan oleh Observatorium Bosscha selama masa pandemi Covid-19, termasuk kegiatan pengamatan virtual, upaya penjangkauan pendidikan formal, pelatihan guru. Kami akan paparkan tantangan, proses, inovasi apa yang diambil dan bagaimana potensi keberlanjutan program daring pasca pandemi.

Kata Kunci: penjangkauan publik, komunikasi sains

1 PENDAHULUAN

Observatorium Bosscha (OB) merupakan tempat bagi masyarakat untuk mengenal dan menghargai sains. Melalui ceramah, diskusi dan kunjungan terpandu ke fasilitas teropong untuk melihat objek-objek langit, masyarakat diperkenalkan pada keindahan dan gambaran ilmiah alam semesta. Pandemi Covid-19 memberikan pukulan yang berat karena sejak Maret 2020, observatorium menutup semua program kunjungan langsung. Dorongan untuk terus melakukan pendidikan dan penjangkauan publik menuntut observatorium untuk cepat beradaptasi mengalihkan program kepada format daring. Hilangnya kesempatan berkomunikasi secara tatap muka (*in person*) dan pengamatan langsung memberikan tantangan tersendiri untuk tetap memastikan ketersediaan substansi, memberikan pengalaman yang positif, serta membangun koneksi interpersonal antara astronom komunikator dan audiens. Di sisi lain, potensi pengembangan sumber daya manusia dan bentuk penjangkauan dengan sistem komunikasi daring menjadi lebih terbuka lebar.

2 AKTIVITAS

Kegiatan mengomunikasikan sains kepada publik telah dilakukan oleh OB sejak awal pendirian di tahun 1920-an. Peran mengomunikasikan sains dengan bahasa yang dapat dipahami publik ini diperkuat saat status OB berada di bawah perguruan tinggi, yang menjadikan OB bertanggung jawab terhadap tri darma perguruan tinggi.

Aktivitas-aktivitas bersama publik dilanjutkan hingga beberapa dekade terakhir kita melihat exposure terhadap astronomi sangat meningkat pesat, yang menjadikan perhatian dan minat publik terhadap astronomi juga bertumbuh.



Gambar 1. Sesi pengamatan virtual yang dipandu oleh astronom dengan teleskop Bosscha Robotic Telescope (BRT).

2.1 Pre Covid-19

OB menyambut antusiasme tersebut dengan mensekusi pekerjaan di ranah publik. Berkunjung ke observatorium dan ingin menggunakan teleskop masih menjadi tujuan utama publik sehingga program kunjungan ini menjadi satu program yang paling dikenal. Selain itu OB proaktif menjemput bola melalui program-program kunjungan ke sekolah atau ke komunitas dan melaksanakan kegiatan bersama masyarakat pada peristiwa istimewa astronomi. Pada dua dekade terakhir, OB dapat menerima kunjungan masyarakat sebanyak 40-60 ribu setia tahunnya. Diversifikasi program, metode komunikasi dan delivery terus dilakukan.

2.2 Program Daring

Program pendidikan untuk publik ini semakin berkembang, mendorong kami terus beradaptasi dan berinovasi merespon keadaan terkini. Pada saat pandemi Covid-19 melanda Indonesia, kami memutuskan untuk menutup segala bentuk kegiatan tatap muka bersama masyarakat per-Maret 2020. Kondisi ini membuat kami mengalihkan seluruh



Gambar 2. Sesi kelas astronomi yang dipandu oleh komunikator astronomi dari Observatorium Bosscha melalui platform Zoom meeting.

bentuk komunikasi dan program publik ke bentuk virtual.

Kami hadir dengan program-program yang ditujukan untuk sekolah, event-event yang bisa diikuti publik dan melalui platform dan media komunikasi digital.

Kegiatan Pengamatan Virtual Langit Malam (PVLM) merupakan program daring pertama yang kami buat dan dilaksanakan pada bulan Agustus-Oktober 2020 dengan jumlah kegiatan sebanyak 13 kali. Program 120 menit berisi paparan populer topik astronomi dan sesi pengamatan langsung dengan teleskop berhasil menampung antusiasme masyarakat yang ingin datang dan mengamati langsung dengan teleskop. Program yang mendapat respon cukup baik ini berhasil kami selenggarakan kembali pada tahun 2021 selama periode April – Oktober dengan frekuensi 1 kali perbulan.

Program lain dikembangkan untuk target yang lebih spesifik, siswa dan guru sekolah. Kelas Daring Astronomi (KDA) merupakan layanan kelas astronomi untuk siswa sekolah menggunakan Zoom Meeting sebagai penunjang pembelajaran astronomi di sekolah dan pengayaan terhadap topik serta profesi astronom. Konten yang dibangun untuk disampaikan adalah konten yang memiliki kaitan kuat dengan topik astronomi yang ada di dalam kurikulum sekolah, disampaikan dengan berbagai mode belajar menggunakan (*software*, *video*), *storytelling*, *bernyanyi*, dan aktivitas *hands-on*.

Selama Januari-Oktober 2021 KDA telah berhasil terselenggara sebanyak 50 kali dengan audiens dari level prasekolah hingga menengah atas.

Melalui dukungan dari IAU-OAD, proyek berjudul “Memberdayakan Kapasitas Rasional melalui Astronomi: Pendekatan Pembelajaran Jarak Jauh dari Observatorium Bosscha” dilaksanakan pada tahun 2021. Melalui proyek target-target diantaranya perpustakaan materi belajar astronomi yang dapat membantu guru telah berhasil dibangun



Gambar 3. Alih fungsi ruangan tempat menerima kunjungan menjadi studio untuk kegiatan daring.

dan dikurasi di website resmi OB. Melalui proyek ini kami mendapatkan bantuan dana untuk membangun fasilitas baru untuk mendukung produksi program daring (Gambar 3).

Kegiatan workshop dan pengembangan kapasitas ditujukan kepada guru dan fasilitator pendidikan sebagai upaya menyiapkan pendidik yang kompeten dan termotivasi dalam berbagai keahlian untuk menyelenggarakan berbagai aspek pendidikan.

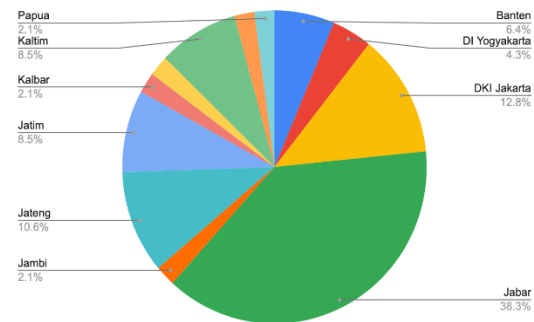
3 PENGALAMAN DAN PELAJARAN

Dalam pelaksanaan kegiatan bersama publik selama dua tahun ini, ada beberapa pengalaman dan pelajaran yang dapat kami ambil:

1. Pandemi Covid-19 telah mengubah mode komunikasi tatap muka menjadi tidak mungkin dilakukan, namun demikian untuk melakukan kegiatan pendidikan dan penjangkauan publik tetap membutuhkan jalinan koneksi di mana orang sekarang berada. Ruang virtual menjadi satu-satunya pilihan.
2. Pentingnya adaptasi dan inovasi. Perubahan drastis mode interaksi ke format virtual mengubah juga paradigma orang belajar. Dengan cepat orang dituntut untuk menguasai berbagai platform dan metode komunikasi baru. Tidak terkecuali dari bagaimana aktivitas penjangkauan publik dilakukan. Adaptasi fisik dilakukan berupa alih fungsi ruangan yang sebelumnya digunakan untuk menerima kunjungan publik menjadi sebuah studio siaran dimana kegiatan KDA, PVLM dan kegiatan daring lain dilakukan. Tahun ke-dua pelaksanaan program daring, kami masih melakukan eksplorasi bentuk program dan platform. Cepatnya perubahan di dunia komunikasi virtual membuat kita harus bersedia menyediakan waktu dalam menyiapkan program dan terus berupaya mempertahankan keterlibatan audiens dalam jangka panjang.

Kedua faktor ini penting dalam membangun kepercayaan masyarakat dan memastikan keberlanjutan program.

3. Penting menetapkan target untuk setiap aktivitas. 50 ribu audiens adalah kehilangan besar dalam sebuah program penjangkauan, namun pandemi memberikan batasan yang cukup jelas seberapa feasible aktivitas daring dapat efektif dijalankan. Membuat kegiatan dengan target audiens yang spesifik akan lebih efektif dibandingkan membuat kegiatan yang ditujukan untuk semua orang. Tidak hanya membantu untuk lebih menjernihkan objektif, namun juga ketercapaian dan efikasi.
4. *Co-creation*. Berada di dunia virtual membuka banyak kesempatan untuk dapat meluangkan waktu cukup banyak berkolaborasi dan bersama-sama mengembangkan kegiatan. Adalah penting mengenali dengan siapa kita bisa bekerja sama membangun dan mengembangkan program. Pada program KDA, Guru adalah tokoh kunci dalam ikut memastikan ketersampaian konten dan menjaga keberlanjutannya di kelas. Kegiatan PVLMM membuka pintu kerjasama dengan komunitas astronomi dan dengan menerapkan pengamatan jejaring, membuka sisi bagaimana kolaborasi terjadi pada sektor pengamatan astronomi.
5. Pandemi menyoroti banyak ketimpangan di masyarakat kita, tidak terkecuali di dunia pendidikan. Program-program berbasis dalam jaringan dan dalam format digital akan lebih mudah dijangkau dan diakses oleh masyarakat yang sudah terbiasa atau memiliki dukungan infrastruktur yang cukup. Hal ini dapat jelas terlihat pada program yang diselenggarakan oleh Observatorium Bosscha selama pandemi (Gambar 4.). Audiens yang masih terpusat di daerah-daerah kota besar datang dari latar belakang yang cukup mapan dan memiliki akses kepada teknologi, sebagai contoh pada program KDA (Gambar 4), sekolah yang mengajukan permohonan untuk KDA adalah sekolah yang sudah terbiasa dengan format belajar daring dan memiliki dukungan infrastruktur dan akses yang baik. Sebaran audiens yang lebih luas untuk sebuah kegiatan/program tidak selalu menunjukkan keberhasilan dari program. Merupakan peluang dan tantangan yang besar untuk memastikan masyarakat mendapat kesempatan yang sama untuk mendapatkan layanan dan informasi.



Gambar 4. Sebaran daerah sekolah yang melaksanakan KDA.

6. Munculnya kebutuhan infrastruktur yang dapat mengakomodir program daring diikuti dengan kebutuhan SDM yang dapat mengoperasikannya memberikan pelajaran akan munculnya kompetensi-kompetensi baru yang sebelumnya tidak ada. Peningkatan kapasitas SDM diperlukan tidak hanya untuk menangani hal teknis namun juga dari penguasaan substansi sains dan kecakapan dalam berkomunikasi. Mode komunikasi secara virtual memberikan banyak keterbatasan dalam membangun interaksi dan hubungan antar personal. Kondisi yang dihadapi ini menegaskan akan pentingnya peran komunikator sains yang handal dalam mendiseminasikan sains kepada publik.

4 PENUTUP

Melaksanakan kegiatan penjangkauan publik selama pandemi Covid-19 telah memberikan tantangan dan pengalaman yang berharga. Inovasi bentuk maupun *metode delivery* terbukti dapat mengisi kebutuhan akan aktivitas dan substansi astronomi yang masyarakat butuhkan. Memastikan keterjangkauan masih menjadi tantangan besar yang perlu diatasi. Di sisi lain, kami berpendapat dengan kondisi pandemi yang semakin membaik membuat aktivitas tatap muka mulai dijalankan, program-program selama pandemi ini tetap dapat dijalankan walaupun Observatorium Bosscha sudah membuka kembali program kunjungan dan tatap muka.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Ibu Premana W. Premadi Ph.D. atas bantuan pengadaan infrastruktur dan SDM program ini yang berasal dari pendanaan proposal IAU OAD 2020 dan P2MI 2021.

Astronomi dalam Bungkus Media Sosial Sebagai Pemantik Budaya Bernalar

Sulistiyowati^{1*}, H. R. Erwanda¹, Luthfiandari^{1,2}, H. Albanna¹, dan D. S. Oktaviani¹

¹*SkyLabs Org, Depok, Indonesia*

²*Observatorium Bosscha-FMIPA ITB, Bandung Barat, Indonesia*

*E-mail: sulistiyowati@skylabs.org

ABSTRAK

Media sosial mempunyai peluang besar untuk dijadikan sebagai sarana promosi, termasuk untuk kegiatan pendidikan. Data interaksi pengguna dengan pemberi informasi pun menarik untuk ditelaah guna mengidentifikasi minat publik terhadap sains, khususnya Astronomi. Dalam makalah ini, kami paparkan *insight* awal yang diperoleh dari data unggahan artikel singkat bertema Astronomi di akun Instagram SkyLabs Org sebagai salah satu jenis media sosial, selama 33 bulan sejak Januari 2019 melalui pendekatan statistika deskriptif. Selama kurun waktu tersebut, SkyLabs Org secara rutin rata-rata mengunggah 2–3 artikel Astronomi per pekan. Artikel-artikel tersebut dapat diklasifikasikan menjadi tiga kelompok: *trending topic*, *fun fact*, dan *scientific concept*. Dengan *engagement rate* tiga bulan terakhir 3,36%, data menunjukkan bahwa artikel jenis *scientific concepts* ternyata memiliki respon tertinggi ~5,8 *engagement/post*, disusul *fun fact*, lalu *trending topic*. Hasil ini menunjukkan tingginya minat publik terhadap konsep sains serta potensi media sosial sebagai sarana untuk mengajak publik bernalar, dengan catatan terdapat kontrol kualitas serta konsistensi yang baik pada setiap unggahan materi.

Kata Kunci: astronomi - media sosial – bernalar

1 PENDAHULUAN

Asosiasi Penyelenggara Jasa Internet Indonesia (2020) menyebutkan bahwa 64,8% populasi Indonesia adalah pengguna harian internet. Sementara itu, kebanyakan pengguna internet mengakses informasi dari media sosial dengan pengakses terbanyak berasal dari kalangan remaja (Alhabash & Ma, 2017). Rata-rata pengguna internet terutama di Asia mendedikasikan setidaknya 2 jam per hari untuk mengakses media sosial dan sebagian besar dari mereka berselancar di media sosial untuk (1) menemukan konten menarik serta membagikannya, (2) mengisi waktu luang, dan (3) mengikuti berita serta berbagai kejadian terkini (GlobalWebIndex, 2019).

Menilik demografi audiens dan kebiasaan mereka dalam menggunakan sosial media, kami melihat adanya peluang untuk melakukan kegiatan penulisan sains ringkas, baik berita aktual maupun konsep sains yang mendasar. Bahkan, jika informasi yang disajikan cukup menarik atau relevan, audiens akhirnya akan menjadi perpanjangan tangan kami dalam memopulerkan bahasan melalui komentar, diskusi, hingga pembagian konten.

Instagram, sebagai salah satu media sosial terpopuler secara global (Vinaika & Manik, 2017) mendorong penggunaannya sebagai media promosi (Turanci, 2019) yang pertama kami pilih. Di Indonesia, Instagram menduduki nomor 3, setelah Facebook dan YouTube (Statcounter, 2021). Instagram berbasis gambar dan video singkat yang menarik secara visual dan memancing rasa

penasaran (Simangunsong, 2016). Instagram tergolong mudah untuk diakses, terutama untuk audiens. Hingga 81% pengguna mengenal *brand* yang menarik melalui Instagram (Ipsos, 2018). Instagram pun memiliki fitur-fitur seperti kolom komentar, dapat menandai (*tag*) akun teman dalam diskusi, dan dapat menyimpan konten untuk dilihat ataupun dibagikan (*share*) kembali. Pun bagi kami sebagai tim yang penyedia informasi, aksesnya dengan tersedianya fitur *Insights* yang mendukung kami dalam proses persiapan dan perilisan materi. Untuk itu, berikut kami paparkan *insight* yang bisa diperoleh dari data *post* kami setelah 33 bulan beroperasi yang diperoleh melalui analisis statistika deskriptif.

2 DATA

Data yang digunakan dalam analisis ini berasal dari *IG Posts Inventory* SkyLabs Org yang memuat tanggal, judul, jumlah *slide*, keberadaan video, jumlah komentar, jumlah komentar yang relevan, klasifikasi, serta *tag*. Data yang diambil mencakup *post* dari tanggal 15 Januari 2019 hingga 12 September 2021. Dalam rentang waktu tersebut, diperoleh 298 *post* dengan identitas 27 *tag*. Di antara data ini, sekitar 11,07% atau 33 *post* mengandung video berdurasi pendek sedangkan sisanya hanya mengandung gambar dan tulisan saja.

3 METODOLOGI

Data yang tersedia kemudian diklasifikasikan secara manual menggunakan mata dan justifikasi tim penulis.

3.1 Klasifikasi Data Menurut Jenis

Menurut jenis *post*, kami mengklasifikasi data menjadi tiga:

1. *Fun fact*. *Post* jenis ini berisi fakta-fakta Astronomi/sains yang menarik untuk diketahui masyarakat. Fakta tersebut tidak harus selalu merupakan sesuatu yang mutakhir atau kekinian. Contoh: “Makan Apa di Luar Angkasa?”, “Mars Tourism”.

2. *Trending topic*. *Post* jenis ini cenderung berisi berita aktual yang tengah ramai di media atau diperbincangkan masyarakat, baik secara luring maupun daring. Contoh: “Betelgeuse, Supernova Akhir Tahun?”, “Bintang yang Terlempar dari Pusat Galaksi Bima Sakti”.

3. *Scientific concept*. *Post* jenis ini berisi penjelasan terhadap konsep Astronomi, Fisika, maupun sains secara umum. Meskipun seluruh *post* SkyLabs Org dibuat semaksimal mungkin untuk menggelitik nalar para pembacanya, *post* jenis ketiga ini adalah yang paling kental bernuansa menalar. Contoh: “Paradoks Malam Gelap”, “Paralaks Bintang”.

3.2 Klasifikasi Data Menurut Tag

Pengelompokan data juga dilakukan berdasarkan *tag*. *Tag* memuat topik yang lebih spesifik dibandingkan jenis, antara lain: *friends*, *figure*, *astrophotography*, *news*, *gravity*, dan *galaxy*.

3.3 Engagement Rate

Customer engagement rate (CBE) atau *engagement rate* saja bisa didefinisikan sebagai keterlibatan, partisipasi, dan ekspresi diri dari seorang konsumen (Leckie *et al.*, 2016), atau dalam konteks kami: pembaca. Sementara itu, Khan (2015) mengelompokkan aksi dan metrik dalam bersosial media menjadi: *like*, *dislike*, *share*, *visit*, *view*, *click*, *tagging*, *mention*, *hovering*, *check-in*, *pinning*, *embedding*, *endorsement*, *uploading*, dan *downloading*. Di samping itu, beberapa referensi menyebutkan juga bahwa jumlah komentar dan *follower* juga turut diperhitungkan dalam menganalisis CBE (Rapp *et al.*, 2013; Kabadayi & Price, 2014; Maiz *et al.*, 2016; Howard *et al.*, 2016; Oh *et al.*, 2017; Schivinski *et al.*, 2016). Dalam pekerjaan ini, kami menggunakan tolok ukur sebagai berikut.

$$CBE = \frac{\text{Jumlah like} + \text{Jumlah komentar}}{\text{Jumlah follower}} \times 100\% \quad (1)$$

3.4 Normalisasi Data

Secara natural, jumlah *post* pada masing-masing kelompok, baik menurut jenis maupun menurut *tag*, akan berbeda. Untuk itu, perlu dilakukan normalisasi

terhadap masing-masing kelompok data agar komparasi popularitas dan CBE berada pada skala yang sama. Untuk itu, *Jumlah like* dan *Jumlah komentar* yang dimasukkan ke Persamaan (1) harus dinyatakan dalam satuan ‘jumlah per *post*’.

4 HASIL DAN DISKUSI

Dengan langkah-langkah yang telah dilakukan, diperoleh nilai CBE 3 bulan terakhir sebesar 3,36%. Selain CBE standar, kami juga mencoba menerapkan filter secara ketat, yaitu dengan hanya melibatkan komentar yang dinilai relevan dengan topik yang diunggah. Sebagai tambahan, kami juga memberi batas atas = 500 bagi jumlah *like* di *post* yang dipromosikan. Untuk *post* dengan *engagement* yang diperoleh secara organik (tidak dipromosikan), seluruh jumlah *like* dan komentar kami ambil. Setelah diterapkan filter ketat tersebut, diperoleh CBE 3 bulan terakhir sebesar 1,29%.

Tabel 1. Standar CBE industri secara umum.

Kelas	CBE
Rendah	< 1%
Baik/rata-rata	1% - 3,5%
Tinggi	3,5% - 6%
Sangat tinggi	> 6%

Sebagai gambaran, Rival IQ (2021) menyampaikan bahwa CBE sehat/baik berada pada kisaran nilai 0,82% dan 1,41% bagi industri media dan nonprofit secara berturut-turut. Kelompok industri ini cocok dengan aktivitas SkyLabs Org yang bergerak di industri media nonprofit untuk memopulerkan Astronomi atau sains secara umum sehingga ukuran ini relevan untuk dibandingkan dengan kegiatan yang SkyLabs Org telah lakukan. Di samping itu, standar industri secara umum pun memiliki standar seperti tercantum pada Tabel 1. Dengan standar ini, CBE SkyLabs Org bisa dimasukkan ke kelas Baik/rata-rata, bahkan setelah filter ketat diterapkan.

Selanjutnya, dilakukan evaluasi popularitas masing-masing jenis *post*. Hasilnya dirangkum dalam Tabel 2. Di tabel tersebut, *Np* menyatakan jumlah *post*, *Nl* jumlah *like*, *Nlf* jumlah *like* yang telah difilter dengan batas atas, *Nk* jumlah komentar, *Nkr* jumlah komentar yang telah difilter sesuai relevansi, CBE menyatakan *engagement rate* total, dan CBEf *engagement rate* setelah difilter berdasarkan komentar yang relevan. Tampak bahwa

Tabel 2. Rekapitulasi data dan nilai CBE untuk masing-masing kategori *post*.

Klasifikasi	Np	NI	Nlf	Nk	Nkr	CBE	CBEf
Fun fact	129	33615	24617	573	329	4,4	2,6
Trending topic	80	33039	19108	498	225	6,2	2,8
Scientific concept	89	51767	24437	885	514	9,9	5,8

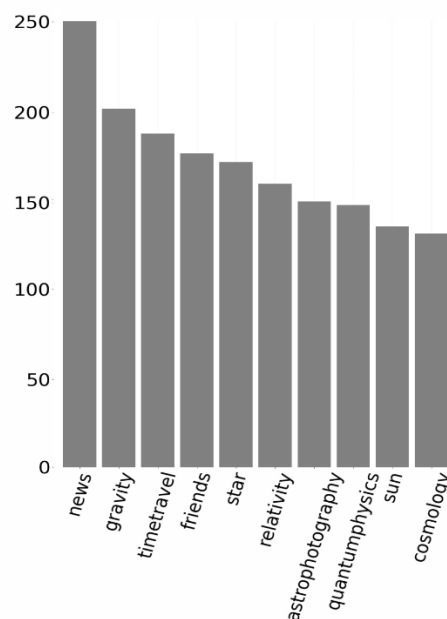
**Gambar 1.** Visualisasi tag/topik berdasarkan popularitas. Makin besar ukuran huruf, makin besar populer tag/topik tersebut.

audiens SkyLabs Org paling berminat terhadap jenis *Scientific Concept*. Meskipun jumlah *post*-nya tidak banyak, tetapi *engagement* per *post* sangat tinggi.

Terakhir, kami menerapkan analisis serupa dengan analisis pada jenis *post*, tetapi dilakukan pada *tag*. Dengan total 27 *tag* yang ada, kami tampilkan hasilnya dalam bentuk visualisasi seperti pada Gambar 1. Sebagai rangkuman, enam topik yang paling diminati audiens SkyLabs secara berurutan yakni: *gravity*, *timetravel*, *friends*, *star*, dan *relativity*. Dalam hal ini, *news* tidak kami masukkan sebagai topik. Kami tampilkan pula plot popularitas untuk sepuluh data tertinggi, ditunjukkan dalam Gambar 2. Sumbu vertikal pada Gambar 2 menyatakan jumlah *engagement* per *post*.

5 PENUTUP

Telah kami paparkan hasil rekapitulasi *post* yang diunggah di akun Instagram SkyLabs Org dalam kurun waktu 33 bulan dari bulan Januari 2019 hingga September 2021. Dengan misi mengampanyekan budaya bernalar serta nilai *engagement* yang berada dalam kelas baik/rata-rata, kami bisa nyatakan

**Gambar 2.** Plot sepuluh Tag/topik paling populer berdasarkan data *post* SkyLabs Org Januari 2019 - September 2021.

bahwa media sosial berpotensi besar untuk dijadikan sebagai sarana untuk mengajak masyarakat mengembangkan budaya bernalar. Simpulan ini dikhususkan bagi penggunaan Instagram yang penyajiannya berbasis visual gambar/video serta aksesnya mudah bagi penyedia informasi maupun audiens.

Masyarakat yang diwakili oleh audiens kami pun ternyata tertarik dengan jenis *Scientific Concept* yang selama ini dianggap sebagai materi yang berat. Beberapa topik di antaranya yakni konsep tentang gravitasi dan perjalanan waktu (relativitas dan fisika kuantum). Selanjutnya, kajian mengenai pengaruh promosi Astronomi melalui Instagram terhadap pemahaman masyarakat dan perilaku bernalar dalam kehidupan sehari-hari menarik untuk ditelaah lebih lanjut dan dijadikan proyek pekerjaan berikutnya. kurun waktu 33 bulan dari bulan Januari 2019 hingga September 2021. Dengan misi mengampanyekan budaya bernalar serta nilai

engagement yang berada dalam kelas baik/rata-rata, kami bisa nyatakan bahwa media sosial berpotensi besar untuk dijadikan sebagai sarana untuk mengajak masyarakat mengembangkan budaya bernalar. Simpulan ini dikhususkan bagi penggunaan Instagram yang penyajiannya berbasis visual gambar/video serta aksesnya mudah bagi penyedia informasi maupun audiens.

Masyarakat yang diwakili oleh audiens kami pun ternyata tertarik dengan jenis *Scientific Concept* yang selama ini dianggap sebagai materi yang berat. Beberapa topik di antaranya yakni konsep tentang gravitasi dan perjalanan waktu (relativitas dan fisika kuantum). Selanjutnya, kajian mengenai pengaruh promosi Astronomi melalui Instagram terhadap pemahaman masyarakat dan perilaku bernalar dalam kehidupan sehari-hari menarik untuk ditelaah lebih lanjut dan dijadikan proyek pekerjaan berikutnya.

6 PUSTAKA

- Alhabash, S. & Ma, M. 2017, *SM+S*, 3(1)
doi:[10.1177/2056305117691544](https://doi.org/10.1177/2056305117691544)
- GlobalWebIndex 2019, 2019 Q2-Q3 *Social Report*
<<https://www.gwi.com/reports/social-2019>>
- Howard, P. N. *et al.* 2016, *J. Int. Aff.* 1, 55
- Ipsos 2018, diakses 20 November 2021
<<https://www.ipsos.com/en>>
- Irawan, A. W., *et al.* 2020, *Laporan Survei Internet APJII 2019-2020 (Q2)*
<<https://apjii.or.id/survei2019x>>
- Kabadayi, S. & Price, K. 2014. *J. Res. Interact. Mark.* 3, 203
- Khan, G. F. 2015 *Seven Layers of social media analytics: Mining Business Insights from Social Media Text, Actions, Networks, Hyperlinks, Apps, Search Engine, and Location*, CreateSpace, Scotts Valley
- Leckie, C., Nyadzayo, M.W., & Johnson, L.W. 2016, *J. Mark Manag.* 32 (5-6), 558
- Maiz, A., Arranz, N., & Fdez. de Arroyabe 2016, *J. Enterp. Inf. Manag.* 5, 630
- Oh, C. *et al.* 2017, *Inf. Manag.* 1, 25
- Rapp, A. *et al.* 2013, *J. Acad. Mark. Sci.* 41(5), 547
- Rival IQ 2021, 2021 *Social Media Industry Benchmark Report* <<https://www.rivaliq.com/blog/social-media-industry-benchmark-report/>>
- Schivinski, B., Christodoulides, G., & Dabrowski, D. 2016, *J. Advert. Res.* 1, 64
- Simangunsong, E. 2016, *JMK* 18(2), 145
- Statcounter 2021, diakses 20 November 2021
<<https://gs.statcounter.com/>>
- Turanci, E. 2019, *IJHMT* 4(1) 44
- Vinaika, R. & Malik, D. 2017, *Int. J. Manag. Bus.* 7(4), 12

Aplikasi Sonifikasi sebagai Alternatif Aksesibilitas Citra Astronomi bagi Tuna Netra

A. Deandra^{1*}, M. Putra¹, M. I. Mandasari², C. Kunjaya¹, D. Herdiwijaya¹, dan Aprilia¹

¹Program Studi Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung, Jawa Barat, Indonesia

²Program Studi Fisika Teknik, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Bandung, Jawa Barat, Indonesia

*E-mail: deandra.aurellio@gmail.com

ABSTRAK

Ketergantungan ilmu astronomi akan indra penglihatan membuat ilmu astronomi sulit diakses untuk penyandang tuna netra. Meskipun demikian, terdapat upaya untuk mengomunikasikan astronomi kepada penyandang tuna netra melalui indra pendengaran dan indra peraba. Aplikasi *screen reader* merupakan alat aksesibilitas bagi tuna netra untuk mempersepsi gambar dengan mendeskripsikan apa yang terdapat pada gambar menggunakan kata-kata. Kekurangan dari *screen reader* adalah konsep astronomi yang asing untuk awam sulit untuk dikenali, terutama bagi penyandang tuna netra sejak lahir. Pada penelitian ini dirancang sebuah program sonifikasi citra sebagai alternatif dari aplikasi *screen reader* untuk mengomunikasikan citra astronomi kepada penyandang tuna netra dengan pendekatan bentuk. Program dirancang menggunakan bahasa pemrograman Python 3.8 dan mampu untuk mensonifikasi bentuk secara otomatis serta responsif terhadap perubahan dan perbedaan bentuk. Hasil sonifikasi dari program terancang berupa *file* MIDI yang kemudian dipoles dan diekspor dengan DAW menjadi musik dalam bentuk *file* audio MP3. Setelah dilakukan evaluasi kepada enam penyandang tuna netra, metode sonifikasi ini dinilai berpotensi sebagai alternatif aksesibilitas citra astronomi kepada tuna netra dengan latihan yang cukup.

Kata Kunci: Citra Astronomi – Sonifikasi – Tuna Netra

1 PENDAHULUAN

Astronomi adalah ilmu yang bergantung pada persepsi visual. Observasi langit, baik menggunakan teleskop atau hanya melalui mata telanjang, apresiasi citra astronomi, dan analisis data melalui grafik atau tabel menjadi contoh penggunaan persepsi visual dalam ranah astronomi. Ketergantungan akan persepsi visual dalam astronomi ini menyebabkan astronomi sulit diakses bagi penyandang tuna netra. Akan tetapi, apakah ketidakmampuan seseorang menjadi alasan untuk membatasi ilmu pengetahuan?

Ada beberapa proyek yang bertujuan mengomunikasikan astronomi kepada penyandang tuna netra menggunakan indra lain. Salah satu contohnya adalah proyek *Tactile Universe* dari *University of Portsmouth*¹ yang menggunakan model *3d-printed* dari berbagai benda langit untuk memperkenalkan konsep astronomi kepada penyandang tuna netra menggunakan indra peraba. Astronom tuna netra Diaz-Merced memberikan salah satu aplikasi sonifikasi untuk melakukan sonifikasi data astronomi (Diaz-Merced, *et al.*, 2011).

Sonifikasi dapat didefinisikan sebagai penyajian data menggunakan media suara (Lunn & Hunt, 2011). Kramer (1999) mendefinisikan sonifikasi

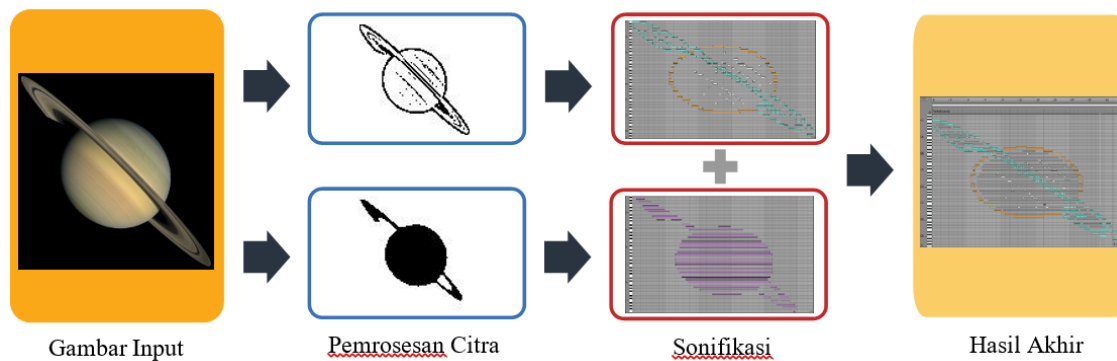
secara lebih spesifik sebagai “penggunaan audio non-wicara untuk menyalurkan informasi.” Definisi dari Kramer inilah yang membedakan sonifikasi dari penggunaan aplikasi *screen reader* yang mendeskripsikan apa saja yang terdapat dalam sebuah citra.

Pada riset ini, potensi sonifikasi untuk mengomunikasikan astronomi kepada penyandang tuna netra diuji. Riset ini menempatkan fokus kepada penyandang tuna netra yang awam terhadap ilmu astronomi sehingga yang akan dilakukan adalah sonifikasi citra astronomi, dan bukan sonifikasi data ilmiah. Dalam pengujian ini, dirancang suatu program sonifikasi citra yang mampu mensonifikasi citra secara semi-manual. Hasil sonifikasi menggunakan metode tersebut kemudian akan dipaparkan kepada penyandang tuna netra.

2 METODE SONIFIKASI

Sonifikasi yang dilakukan memberikan fokus kepada bentuk dan posisi objek yang terdapat pada citra. Sonifikasi menggunakan pendekatan bentuk, yang merepresentasikan bentuk dan posisi objek secara analogis dengan tinggi rendahnya nada atau *pitch*, bukan menggunakan pendekatan warna, yang merepresentasikan warna objek secara analogis dengan *pitch*. Secara garis besar, sonifikasi yang

¹<https://tactileuniverse.org>



Gambar 1. Ilustrasi metode sonifikasi yang dilakukan, dengan memberikan citra Saturnus yang disonifikasi sebagai contoh. Selain gambar input, gambar yang ditunjukkan pada setiap langkah hanya untuk keperluan ilustrasi saja. Gambar yang ditunjukkan pada

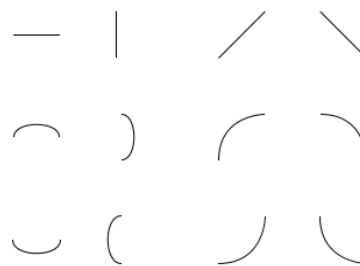
dilakukan dapat dibagi menjadi dua tahap, yaitu tahap pemrosesan citra dan tahap sonifikasi. Gambar 1 memberikan ilustrasi, sekaligus contoh, dari sonifikasi yang dilakukan.

Tahap pemrosesan citra mencakup penyesuaian citra masukan sebelum sonifikasi diberlakukan. Dua langkah yang dilakukan pada tahap pemrosesan citra adalah sebagai berikut:

1. Langkah praproses mengubah mode gambar menjadi *grayscale* serta mengubah ukuran citra menjadi $w \times 88 \text{ px}$ dengan 88 piksel adalah tinggi citra setelah diubah dan w adalah lebar citra yang baru sehingga *aspect ratio* citra tetap terjaga.
2. Langkah *image thresholding* dilakukan untuk menentukan objek dan latar belakang pada citra. Dua tipe *thresholding* yang dilakukan adalah *adaptive thresholding* dan *global thresholding*. *Adaptive thresholding* memberikan *outline* dari objek pada citra, sekaligus beberapa aksens detil yang terdapat di dalam objek, sedangkan *global thresholding* memberikan kepenuhan dari objek pada citra.

Tahap sonifikasi yang dilakukan terinspirasi dari MIDI Art, dengan membayangkan hasil dari tahap pemrosesan citra seolah-olah “dijiplak” ke MIDI *Piano Roll*. Terdapat 88 nada yang merepresentasikan tinggi citra. Dasar pemilihan angka 88 adalah asosiasinya dengan instrumen piano, yang pada umumnya memiliki 88 tuts nada dengan rentang A-1 hingga C7². Durasi dari audio yang dihasilkan merepresentasikan lebar citra. Untuk mengurangi disonansi dilakukan penyaringan nada yang didasari oleh tangga nada C pentatonik mayor.

Tahap pemrosesan citra dan tahap sonifikasi yang telah dijelaskan dilakukan secara otomatis menggunakan program yang ditulis dalam bahasa Python 3.8. Tahap sonifikasi dilanjutkan secara manual menggunakan DAW³. Tahap manual ini dilakukan untuk menambahkan instrumen, serta memoles musik yang dihasilkan. Secara spesifik pada citra Saturnus yang terdapat pada Gambar 1, nada sama yang dimainkan berurutan digabung sehingga menghasilkan nada yang dimainkan sekali dengan durasi yang lebih panjang. Selain itu dilakukan pemisahan untuk mendapatkan bagian cincin, tubuh *spheroid*, dan aksens dari hasil sonifikasi *adaptive thresholding*. Hasil pemisahan ini, ditambah dengan hasil *global thresholding* diberikan instrumen yang berbeda, digabungkan menjadi satu dan diekspor menjadi bentuk *file* MP3.



Gambar 2. Garis yang menjadi bahan latihan partisipan.

3 EVALUASI METODE SONIFIKASI

Evaluasi dilakukan di Panti Tuna Netra Titipan Anak Bangsa di Cimahi, Jawa Barat, Indonesia.

²Penamaan register nada (oktaf) mengikuti cara penamaan pada program DAW Ableton. Jika mengikuti penamaan dari ISO, rentang nada adalah A0 hingga C8

³Penjelasan singkat mengenai DAW (*Digital Audio Workstation*) dapat dilihat pada laman berikut: <https://www.masterclass.com/articles/what-is-a-daw>

Evaluasi ini terdiri atas tiga tahap, yaitu tahap latihan, tahap pengujian bentuk, dan tahap pengujian citra. Tahap latihan dilakukan pada 30 Juli 2021 hingga 21 Agustus 2021. Kedua tahap pengujian dilakukan pada tanggal 21 Agustus 2021 dan diikuti oleh enam partisipan dengan rentang usia 16-21.

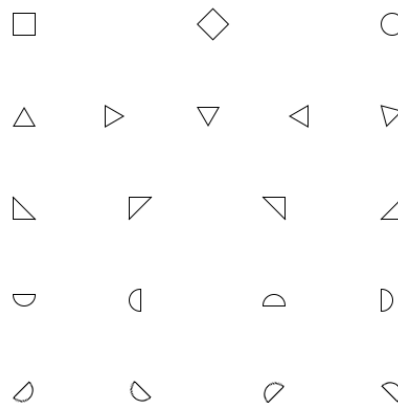
Tahap latihan dilakukan untuk melatih familiaritas partisipan dalam mengenali sonifikasi garis-garis sederhana. Pada tahap ini, partisipan diberikan 12 sonifikasi garis yang dapat dilihat pada Gambar 2. Untuk mengenali garis yang disonifikasikan, partisipan diberikan alat peraga dalam bentuk kertas yang digurat dengan pena tumpul sehingga terbentuk timbunan garis. Pada akhir tahap latihan, dilakukan penilaian kesuksesan tahap latihan. Sebagai penilaian, partisipan diberikan keduabelas sonifikasi garis secara acak, lalu diminta untuk mengidentifikasi garis mana yang tersonifikasi dengan bantuan alat peraga. Banyaknya jawaban yang benar dari setiap partisipan dicatat.

Tahap pengujian bentuk dilakukan untuk menguji apakah partisipan mampu mengenali bentuk yang merupakan gabungan dari garis yang diperkenalkan pada tahap latihan. Partisipan diberikan sonifikasi bentuk bentuk pada Gambar 3 dan diminta untuk mengidentifikasi bentuk yang tersonifikasi dengan bantuan alat peraga yang serupa dengan alat peraga pada tahap latihan. Jawaban partisipan untuk setiap sonifikasi bentuk yang diberikan dicatat, baik jawaban partisipan yang benar maupun jawaban partisipan yang salah.

Tahap pengujian citra dilakukan untuk menguji apakah partisipan mampu mengenali sonifikasi suatu citra sebagai gabungan dari bentuk-bentuk. Pada tahap ini, diberikan sonifikasi Saturnus pada Gambar 1. Partisipan diminta untuk mengenali berapa bentuk yang terdapat pada sonifikasi tersebut dan mendefinisikan salah satu bentuk yang didapat. Banyaknya bentuk yang dapat dipersepsi dan deskripsi dari salah satu bentuk tersebut dicatat.

Dalam tahap pengujian bentuk didapati bahwa kesuksesan persepsi citra menggunakan metode sonifikasi ini bergantung pada keberhasilan pada tahap latihan, yang telah membentuk kesesuaian antara persepsi bentuk dengan suara. Didapati pula bahwa partisipan lebih mudah mempersepsi sonifikasi garis lurus dibandingkan garis lengkung.

Akan tetapi, dalam tahap pengujian citra, didapati bahwa partisipan lebih perseptif terhadap garis lengkung dibanding garis lurus. Selain dari bentuk objek Saturnus yang memiliki bentuk-bentuk melengkung yang dominan, pemilihan instrumen dan penyesuaian volume yang kurang seimbang dapat berperan dalam ketidaksesuaian ini.



Gambar 3. Bentuk yang diujikan ke partisipan pada tahap pengujian bentuk.

Diakui bahwa evaluasi yang dilakukan belum sempurna. Tahap latihan dirasa kurang efektif, dikarenakan latihan yang tidak dilakukan secara intensif dan waktu yang diberikan untuk latihan kurang. Kondisi pengujian yang kurang kondusif serta jumlah partisipan yang terlalu sedikit berpotensi memberikan data yang kurang baik.

4 KESIMPULAN DAN POTENSI

Dalam riset ini, telah dirancang sebuah metode sonifikasi yang mampu untuk mensonifikasi bentuk dan citra secara semi-otomatis. Dengan melatih asosiasi suara dengan bentuk, metode sonifikasi ini dapat menjadi sarana untuk mengomunikasikan astronomi kepada penyandang tuna netra.

Riset ini hanya memberikan salah satu metode sonifikasi yang dapat digunakan untuk mengomunikasikan astronomi kepada penyandang tuna netra. Tidak menutup kemungkinan bahwa metode sonifikasi yang lain lebih baik dalam mengomunikasikan astronomi dibandingkan metode yang diberikan dalam riset ini. Diharapkan adanya inovasi-inovasi baru yang dapat membantu aksesibilitas astronomi kepada masyarakat, bukan hanya penyandang tuna netra, tetapi kepada seluruh masyarakat.

Komunikasi astronomi kepada penyandang tuna netra dapat dilakukan secara *multi-sensory* menggunakan sonifikasi dan indra sentuhan. Salah satu idenya adalah sebuah metode sonifikasi dengan persepsi sentuhan yang menangani persepsi bentuk dan sonifikasi yang menangani persepsi warna. Akan tetapi, kondisi *multi-sensory* dengan indra sentuhan mungkin akan sulit dikembangkan dalam keadaan yang mengharuskan untuk membatasi kontak fisik, sehingga komunikasi harus dilakukan secara jarak jauh.

Ucapan Terima Kasih dan Tautan *File* Audio

Ucapan terima kasih terkhususnya disampaikan kepada penulis pendamping yang berperan sebagai dosen pembimbing dan dosen penguji dalam riset yang menjadi dasar dari dokumen prosiding ini (Deandra, 2021) dan teman-teman partisipan dari Panti Tuna Netra Titipan Anak Bangsa. Hasil MP3 sonifikasi dari citra Saturnus pada Gambar 1 tersedia pada tautan berikut: <https://bit.ly/SaturnSonification>.

5 PUSTAKA

- Deandra, A. (2021). *Aplikasi Sonifikasi sebagai Alternatif Aksesibilitas Citra Astronomi bagi Tuna Netra*. (Tugas Akhir Sarjana). Institut Teknologi Bandung.
- Diaz-Merced, W., et al.. (2011) dalam *Proceedings of the International Astronomic Union*, 7(s285), 133-136. <doi:10.1017/S1743921312000440>
- Kramer, G., et al.. (1999) dalam *International Community for Auditory Display*.
- Lunn, P., & Hunt, A. (2011) dalam *Proceedings of the ADS-VIS 2011: Making visible the invisible: art, design, and science in data visualisation*, 93-99. <<http://eprints.hud.ac.uk/12775/>>

