

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.