

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*.

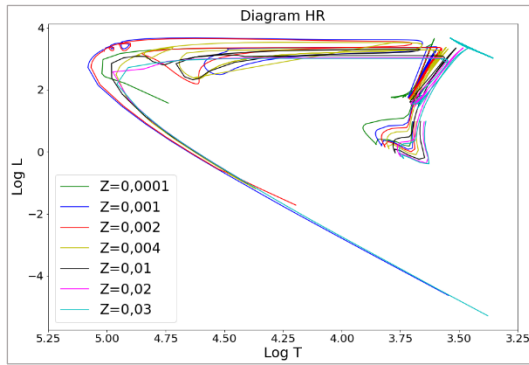
Aspek lainnya yang dapat berpengaruh pada kondisi metalisitas tinggi adalah perubahan pada transpor energi. Pada kondisi tersebut, transpor energi melalui proses konveksi menjadi lebih dominan dibandingkan dengan transpor energi secara radiasi. Hal ini disebabkan karena pada

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_f) 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

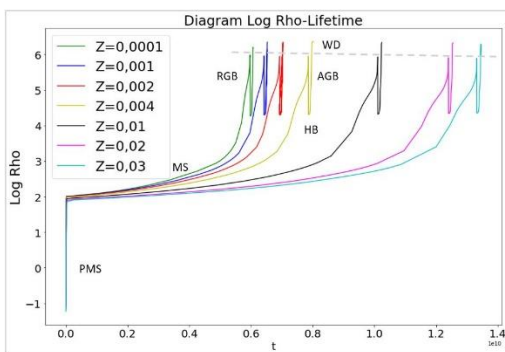


Gambar 2. Diagram HR bintang bermassa $1 M_{\odot}$ dengan tujuh variasi metalisitas 0,0001 (hijau); 0,001 (biru tua); 0,002 (merah); 0,004 (kuning); 0,01 (hitam); 0,02 (ungu); dan 0,03 (biru muda) dari fase PMS hingga WD.

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,



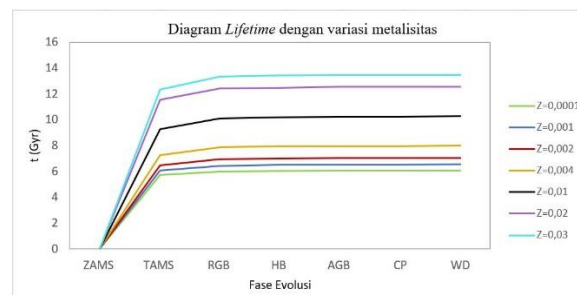
Gambar 3. Diagram $\log \rho$ terhadap $lifetime$ dari fase PMS hingga WD. Tinjauan pada fase RGB ditandai dengan garis putus-putus.

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

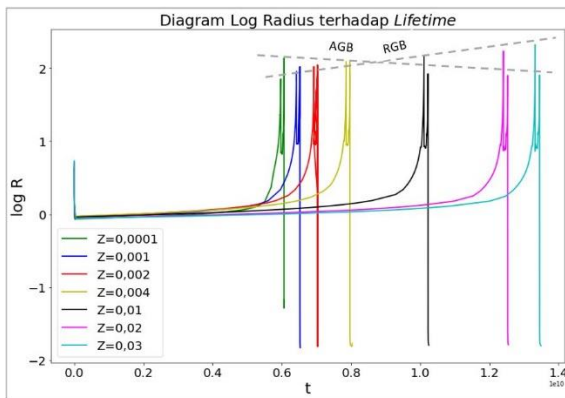


Gambar 4. Diagram hubungan $lifetime$ pada variasi metalisitas bintang bermassa $1 M_{\odot}$ dalam beberapa tahapan evolusinya.

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.

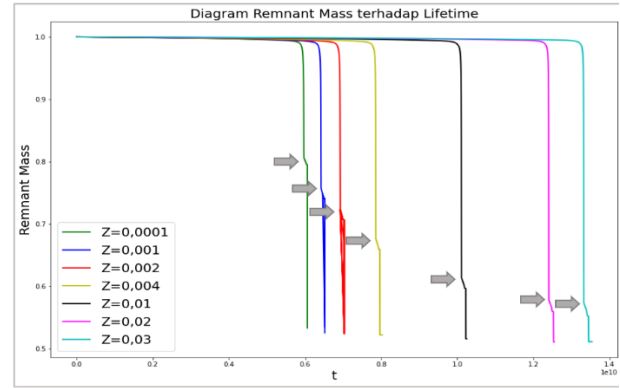
3.4 Pengaruh metalisitas terhadap remnant radius dan remnant mass bintang

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.