



Studi laju kehilangan massa pada evolusi bintang maharaksasa merah

Andi Agung Prawira Negara¹, Mahasena Putra², Nur Hasanah¹, Tasrief Surungan¹

Artikel ini telah dipresentasikan pada kegiatan Seminar Nasional Fisika (Sinafi 9.0)

Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

23 September 2023

Abstract

The post-main sequence evolution in massive star evolution is a complex process that depends on various stellar model parameters. One of these numerous parameters is stellar mass loss. This study aims to analyze the lifetime of stars in the Red Supergiant (RSG) phase, their evolutionary tracks on the Hertzsprung-Russell (HR) diagram, and several other physical parameters that undergo changes when the mass loss rate during the RSG phase is increased. The Modules for Experiment in Stellar Astrophysics (MESA) program is utilized as a computational tool to create simulations of the evolution of massive star models from the main sequence to the core temperature (T_c) reaching 10^9 K. The constructed models are non-rotating single stars with initial masses of $12M_{\odot}$, $15M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, and $25M_{\odot}$, with a metallicity of $Z=0.02$. The obtained results show that an increase in mass loss rate during the RSG phase significantly influences the evolutionary tracks of massive stars in the post-main sequence phase. Additionally, this phenomenon plays a role in determining the progenitor of massive stars before the occurrence of supernova events. For models with larger masses, an increased mass loss rate does not significantly affect the total mass lost during the RSG phase, but it does influence the duration or lifespan spent in the RSG phase.

Keywords: Red Supergiant · Massive Stars · Stellar Evolution · Mass Loss

PENDAHULUAN

Fase maharaksasa merah atau *Red Supergiant* (RSG) dikatakan sebagai sebagai fase yang paling penting selama masa hidup bintang masif ($M \geq 8M_{\odot}$). Hal ini karena sebagian besar bintang masif nantinya akan menghabiskan waktu akhir hidupnya di fase ini (Georgy, 2016). Fase RSG dapat menjadi fase akhir yang dialami oleh bintang masif ataupun merupakan fase transisi sebelum kemudian bintang masif ini meledak sebagai supernova ketika berada di fase *Yellow Supergiant* (YSG), *Blue Supergiant* (BSG), ataupun di fase Wolf-Rayet (WR) (Meynet et al., 2015).

✉ Andi Agung Prawira Negara
agungprawiranegara3@gmail.com

¹ Laboratorium Fisika Teori dan Komputasi, Departemen Fisika, Universitas Hasanuddin. Makassar, Indonesia.

² Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung. Bandung, Indonesia.

How to Cite: Negara, A.A.P., Putra, M., Hasanah, N., Surungan, T. (2023). Studi Laju Kehilangan Massa pada Evolusi Bintang Maharaksasa Merah. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 2 (1), 466-476. <http://proceedings.upi.edu/index.php/sinafi>

Salah satu karakteristik yang menarik untuk dikaji pada fase RSG adalah fenomena kehilangan massa bintang. Oleh karena radius bintang di fase RSG yang sangat besar (sekitar $500-1500R_{\odot}$), maka hal ini akan berimplikasi pada kecilnya gaya tarik gravitasi pada selubung terluar bintang. Kecilnya gaya gravitasi inilah yang selanjutnya membuat bintang RSG tidak mampu untuk menahan materi pada selubung terluarnya dan kemudian menjadi salah satu penyebab terlepasnya sebagian besar materi bintang ke medium antarbintang yang kemudian dikenal dengan istilah kehilangan massa bintang. Dengan laju yang relatif besar, yakni sekitar $10^{-6} M_{\odot}$ hingga $10^{-4} M_{\odot}$ per tahun (Mauron & Josselin, 2011; Meynet et al., 2015; Yang & Jiang, 2012).

Kehilangan massa di fase RSG akan sangat krusial karena dapat memberikan pengaruh besar di beberapa aspek. Tiga di antaranya adalah pada masa hidup bintang, kelimpahan unsur elemen kimia di permukaan bintang, dan jejak evolusi bintang di diagram Hertzsprung-Russell (Bennett, 2009; Hirschi et al., 2007; Woosley, 1993). Bintang masif dapat kehilangan lebih dari setengah massa awalnya di fase pasca deret utama dan mayoritas hal ini akan terjadi pada fase RSG (Emily Levesque, 2017; Georgy & Ekström, 2015). Meskipun demikian, hingga saat ini mekanisme kehilangan massa di fase RSG masih belum dipahami sepenuhnya serta menjadi tantangan besar yang belum terpecahkan oleh astronom (Georgy & Ekström, 2015; Yoon & Cantiello, 2010).

Berbagai metode komputasi telah dikembangkan dalam upaya menelusuri pengaruh kehilangan massa terhadap evolusi bintang masif (di fase RSG). Salah duanya adalah oleh Meynet, dkk (2015) yang menelusuri pengaruh kehilangan massa pada evolusi dan properti dari objek pre-supernova dari bintang RSG dan juga oleh Renzo, dkk. (2017) yang membandingkan algoritma parametrik angin bintang (penyebab kehilangan massa) serta efeknya terhadap evolusi bintang masif dengan menggunakan kode program evolusi bintang MESA (Paxton et al., 2010, 2011a, 2011b, 2013, 2015, 2018, 2019). MESA merupakan salah satu kode program evolusi bintang satu dimensi yang terbukti efektif dan *powerful* dalam mensimulasikan dan menelusuri jejak evolusi bintang mulai dari bintang seukuran matahari hingga bintang masif.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pengkajian terhadap pengaruh peningkatan laju kehilangan massa pada evolusi bintang masif di fase RSG menggunakan MESA-r7624 dengan modul MESA star. Model yang dihasilkan dari program ini kemudian digunakan untuk menyelidiki bagaimana peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG memengaruhi perubahan parameter fisis pada evolusi bintang masif, perubahan jejak evolusi bintang masif di diagram HR, serta berusaha mengidentifikasi mekanisme fisis yang terjadi selama proses evolusi.

METODE

Untuk membuat model bintang, penulis mengadopsi formulasi laju kehilangan massa empiris pada parameter bintang seperti massa, radius, luminositas, metalisitas, dan lain sebagainya. Parameter-parameter ini kemudian bergantung pada evolusi bintang: satu parameter akan saling memengaruhi kelakuan dari parameter lainnya. Bagian ini selanjutnya akan menjelaskan mengenai parametrisasi tertentu yang digunakan pada setiap fase evolusi bintang guna mendapatkan nilai laju kehilangan massa sebagai fungsi dari waktu.

Laju kehilangan massa yang disebabkan oleh angin bintang pada daerah panas di diagram HR menggunakan algoritma dari (Vink et al., 2000), algoritma ini berlaku untuk bintang kelas

spektral OB pada rentang nilai temperatur $27500 \text{ K} < T_{eff} \leq 50000 \text{ K}$ dan pada $12500 \text{ K} < T_{eff} \leq 22500 \text{ K}$ yang masing-masing direpresentasikan oleh persamaan 1 dan 2 berikut ini (Lamers, 2004; Vink et al., 2000).

$$\begin{aligned} \log(-\dot{M}) = & -6,697 + 2,194 \log\left(\frac{L}{10^5 L_{\odot}}\right) - \\ & 1,313 \log\left(\frac{M}{30M_{\odot}}\right) - 1,226 \log\left(\frac{v_{\infty}}{2v_{esc}}\right) + \\ & 0,933 \log\left(\frac{T_{eff}}{40000}\right) - 10,92 \log^2\left(\frac{T_{eff}}{40000}\right) + \\ & + 0,85 \log\left(\frac{Z}{Z_{\odot}}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \log(-\dot{M}) = & -6,668 + 2,210 \log\left(\frac{L}{10^5 L_{\odot}}\right) + \\ & -1,339 \log\left(\frac{M}{30M_{\odot}}\right) - 1,601 \log\left(\frac{v_{\infty}}{2v_{esc}}\right) + \\ & + 1,07 \log\left(\frac{T_{eff}}{40000K}\right) + 0,85 \log\left(\frac{Z}{Z_{\odot}}\right) \end{aligned} \quad (2)$$

Di luar dari rentang nilai temperatur ini, penulis menggunakan algoritma laju kehilangan massa dari Nieuwenhuijzen & de Jager (1990) yang kemudian dikenal juga dengan istilah laju kehilangan massa NdJ90 yang dinyatakan secara matematis melalui persamaan 3 berikut ini (Nieuwenhuijzen & de Jager, 1990).

$$\log(-\dot{M}) = -14,02 + 1,24 \log\left(\frac{L}{L_{\odot}}\right) + 0,16 \log\left(\frac{M}{M_{\odot}}\right) + 0,81 \log\left(\frac{R}{R_{\odot}}\right) \quad (3)$$

Algoritma ini berlaku untuk bintang ketika berada di daerah dingin diagram HR. Untuk fase RSG (didefinisikan ketika $\log T_{eff} \leq 3.6$), penulis berusaha menelusuri pengaruh dari peningkatan laju kehilangan massa yang lebih tinggi dari pada yang biasa digunakan dalam evolusi bintang dan medium sekelilingnya. Untuk hal tersebut, maka persamaan 3 pada algoritma NdJ90 ditingkatkan dengan faktor 3, dan 5.

Laju kehilangan massa untuk fase post-RSG atau pasca RSG ketika fraksi hidrogen lebih kecil $X_s < 0.4$ (Bintang Wolf-Rayet, selanjutnya disingkat bintang WR) menggunakan algoritma dari Nugis & Lamers (2000) yang secara matematis dinyatakan melalui persamaan 4 berikut ini.

$$\log_{10}(-\dot{M}) = -11,0 + 1,29 \log_{10}\left(\frac{L}{L_{\odot}}\right) + 1,73 \log_{10}(Y) + 0,47 \log_{10}(Z) \quad (4)$$

Pada penelitian ini dibuat model bintang tunggal dan tidak berotasi dengan menggunakan kode program evolusi bintang MESA r-7624. Model bintang dibuat berdasarkan penelitian (Renzo et al., 2017) dan (Hernández-Cervantes et al., 2019) yaitu dengan membangun model

bintang dengan massa awal $12M_{\odot}$, $15M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, dan $25M_{\odot}$ dengan nilai $Z = 0,020$. Model bintang selanjutnya dibangun dari fase deret utama hingga pembakaran Neon atau ketika suhu di inti bintang (T_c) mencapai 10^9 K. Di titik ini, masa hidup bintang hanya menyisakan beberapa tahun lagi (~ 15 tahun untuk bintang $15M_{\odot}$) sebelum terjadinya fenomena supernova (*core-collapse* supernova) dan mengalami kehilangan massa melalui angin bintang. Selain itu, ketika kondisi $T_c = 10^9$ K tercapai, secara artifisial MESA mulai meredam laju kehilangan massa pada bintang. Kehilangan massa ini berhenti ketika temperatur inti mencapai $2 \cdot 10^9$ K.

Di penelitian ini penulis mendefinisikan fase RSG ketika $\log T_{\text{eff}} \leq 3.6$. Adapun untuk fase lainnya yaitu, fase YSG adalah ketika $3.6 < \log T_{\text{eff}} \leq 3.9$, daerah biru (BSG, LBV) ketika $\log T_{\text{eff}} > 3.9$, dan fase Wolf-Rayet ketika fraksi massa hidrogen $X_H < 0.4$ (berlaku untuk semua nilai temperatur efektif).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Jejak Evolusi dan Masa Hidup di Fase RSG

Berdasarkan semua model teoretik yang berkembang sampai saat ini yang juga sejalan dengan observasi yang telah dilakukan oleh penelitian-penelitian sebelumnya (Heger et al., 2003; Massey, 2003), bintang masif pada suatu waktu di akhir evolusinya akan mengalami *cataclysmic event* yang kemudian dikenal juga dengan istilah supernova (*core-collapse supernova*) (Hernández-Cervantes et al., 2019). Gambar 1 di bawah ini menunjukkan jejak evolusi model bintang $12M_{\odot}$, $15M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, dan $25M_{\odot}$ di diagram HR. Model dengan massa $12M_{\odot}$ dan $15M_{\odot}$ diperlihatkan pada gambar 1a dan 1b berikut ini. Peningkatan laju kehilangan massa untuk kedua model tersebut memberikan tren di mana cenderung untuk menekan terjadinya fenomena *blue loop*, sehingga akan meningkatkan waktu yang dihabiskan di fase RSG. Sementara itu, untuk model dengan massa yang lebih besar ($20M_{\odot}$ dan $25M_{\odot}$), peningkatan laju kehilangan massa memiliki tendensi di mana akan semakin sering mengalami fenomena *blue loop*. *Blue loop* merupakan fenomena yang terjadi di masa hidup suatu bintang, di mana bintang yang berada di daerah dingin (merah) diagram HR berevolusi kembali ke arah kiri menuju daerah panas (biru) diagram HR sebelum kemudian pada akhirnya akan berevolusi kembali ke daerah dingin.

Perbedaan tren yang diperoleh ini muncul karena mekanisme yang terjadi di internal bintang untuk kelompok massa yang lebih kecil dan lebih besar berbeda. Untuk kasus pada model dengan massa yang lebih besar, apa yang membuat bintang berevolusi kembali ke daerah biru ketika kehilangan massa meningkat adalah karena bintangnya akan menjadi semakin homogen. Hal ini terjadi ketika fraksi massa inti helium menjadi sekitar 60%-70% dari total massa bintang. Ketika hal ini tercapai maka bintang akan mulai berevolusi kembali ke daerah biru (Giannone, 1967; Hernández-Cervantes et al., 2019; Meynet et al., 2015)

Adapun untuk model dengan massa yang lebih kecil, situasinya berbeda. Bintang mengalami evolusi ke daerah biru karena pada suatu waktu ketika terjadinya pembakaran helium, inti bintang akan berekspansi, yang mana berdasarkan *mirror effect* akan menyebabkan selubung terluar (*envelope*) berkontraksi. Ekspansi inti pada dasarnya akan lebih sering terjadi pada model dengan inti yang tidak terlalu masif (Meynet et al., 2015). Lauterborn et al. (1971) dalam (Meynet et al., 2015) telah menunjukkan bahwa pergerakan bintang dari daerah merah ke daerah biru pada diagram HR sangatlah bergantung pada potensial gravitasi dari inti helium

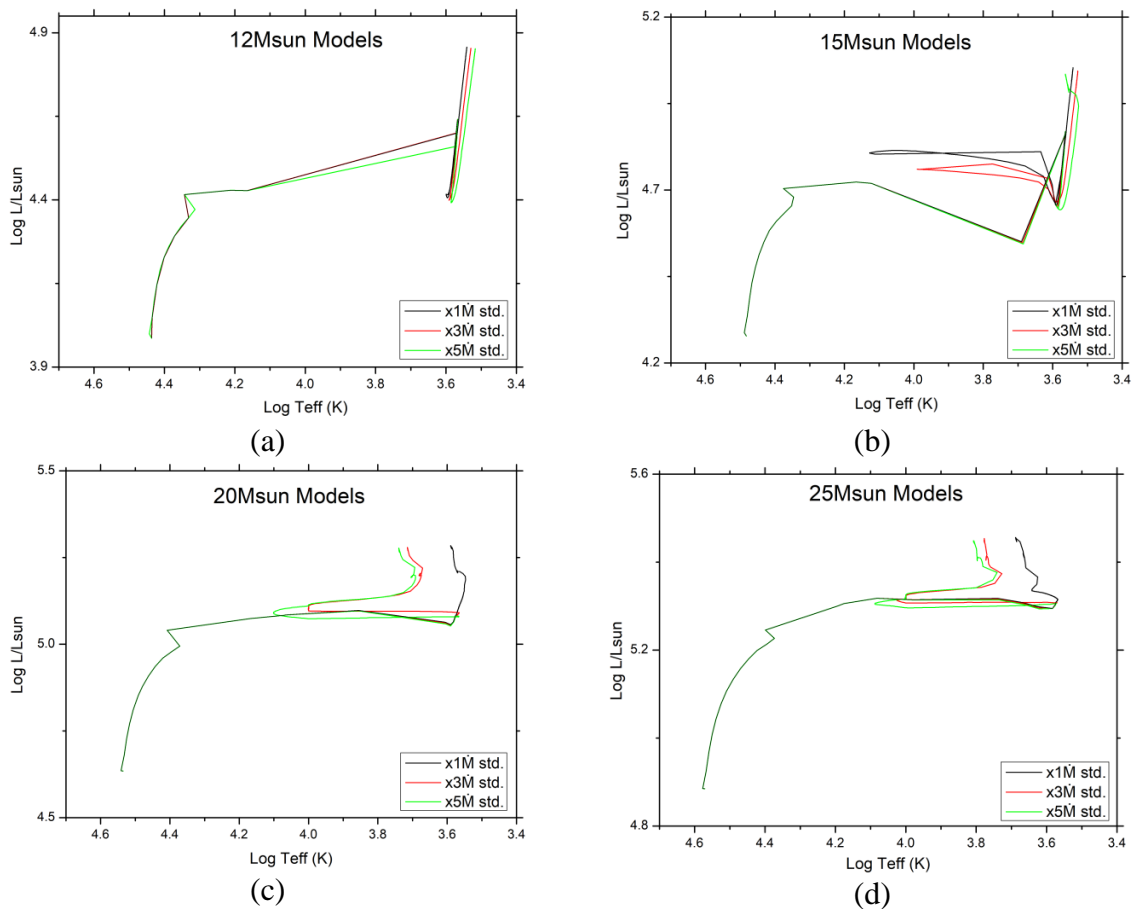
Φ_{core} dan bagaimana perbandingannya terhadap potensial kritis $\Phi_{crit}(M)$ yang semakin bertambah terhadap massa bintang. Ketika potensial gravitasi dari inti helium lebih besar daripada potensial kritis, bintang akan tetap berada di fase RSG. Sementara itu, ketika potensial gravitasinya lebih rendah maka inti bintang dapat mengalami ekspansi dan selubungnya berkontraksi sehingga bintang akan mengalami *blue loop* dan mencapai daerah biru di diagram HR. Sehingga hal ini dapat dituliskan menjadi

$$\Phi_{core} > \Phi_{crit}(M), \text{Garis Hayashi}$$

$$\Phi_{core} < \Phi_{crit}(M), \text{Daerah biru}$$

Model dengan massa yang lebih besar atau sama dengan $20M_{\odot}$ merepresentasikan kondisi kedua dan model $12M_{\odot}$ merepresentasikan kondisi pertama.

Ketika laju kehilangan massa ditingkatkan, untuk model $12M_{\odot}$, Φ_{crit} akan menurun. Hal ini akan merepresentasikan kasus di mana $\Phi_{core} > \Phi_{crit}(M)$, dan evolusi akan membuat bintang akan tetap berada di daerah merah di diagram HR. Untuk bintang yang lebih masif, peningkatan laju kehilangan massa juga sebenarnya menekan evolusi kembali ke daerah biru karena *mirror effect*. Namun seperti yang telah dijelaskan di atas, bintang-bintang ini mungkin akan kembali ke daerah biru karena struktur bintang menjadi homogen ketika laju kehilangan massa semakin besar yang juga diakibatkan oleh inti konvektifnya yang masif, sehingga bintang tersebut mengembang ke arah kelompok bintang yang homogen dan kaya akan helium di diagram HR, yang mana kelompok bintang ini terletak di daerah biru diagram HR.



Gambar 1. Jejak evolusi untuk model bintang $12M_{\odot}$, $15M_{\odot}$, $20M_{\odot}$, dan $25M_{\odot}$ dengan berbagai peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG.

Tabel 1. Masa hidup bintang, masa hidup bintang di fase RSG, dan beberapa properti lainnya di akhir evolusi model bintang.

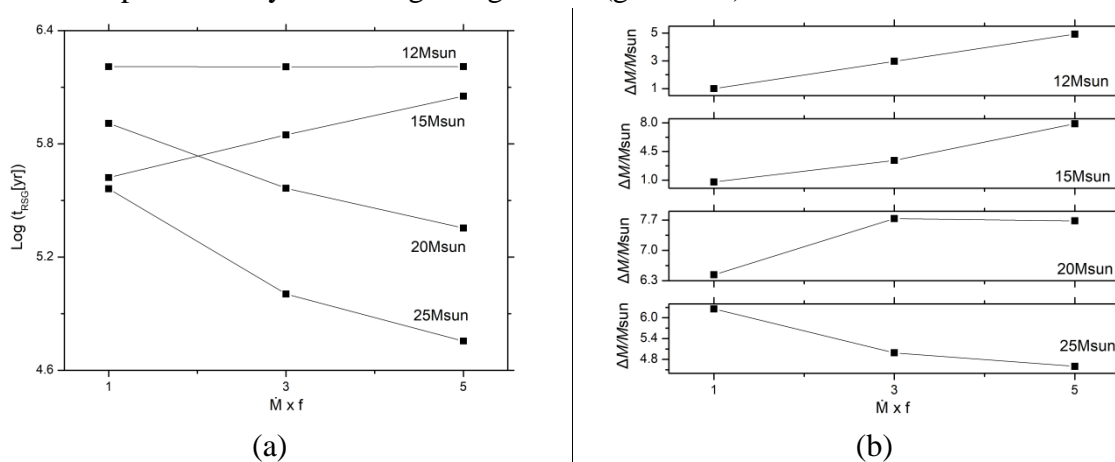
<i>Model</i>	t_{life} (Myr)	t_{RSG} (Myr)	$\Delta M_{RSG}/M_{\odot}$	M_{fin}/M_{\odot}	R_{fin}/R_{\odot}	Log L/L $_{\odot}$	Log T $_{eff}$	pre-SN star
<i>A12x1</i>	19.565	1.618	1.003	10.690	736.756	4.853	3.541	RSG
<i>A15x1</i>	13.957	0.418	0.762	13.469	924.904	5.053	3.542	RSG
<i>A20x1</i>	9.719	0.810	6.438	12.567	970.629	5.276	3.587	RSG
<i>A25x1</i>	7.692	0.365	6.252	12.859	752.681	5.447	3.685	YSG
<i>A12x3</i>	19.564	1.617	2.971	8.709	773.755	4.850	3.530	RSG
<i>A15x3</i>	13.938	0.704	3.394	10.289	974.117	5.042	3.528	RSG
<i>A20x3</i>	9.715	0.367	7.732	7.892	540.834	5.269	3.712	YSG
<i>A25x3</i>	7.689	0.101	4.989	10.402	493.889	5.444	3.776	YSG
<i>A12x5</i>	19.564	1.620	4.924	6.761	810.763	4.843	3.518	RSG
<i>A15x5</i>	13.933	1.130	7.888	6.626	817.676	5.031	3.563	RSG
<i>A20x5</i>	9.714	0.226	7.679	7.623	480.296	5.266	3.737	YSG
<i>A25x5</i>	7.689	0.057	4.599	10.099	432.766	5.442	3.804	YSG

Beragam properti dari model bintang disajikan pada tabel 1. Dengan membandingkan keluaran dari model bintang dengan berbagai laju kehilangan massa, dapat disimpulkan beberapa poin sebagai berikut ini:

- Waktu hidup bintang di fase RSG sangat dipengaruhi oleh perubahan laju kehilangan massa di fase RSG. Hal ini dapat dilihat pada gambar 4.2a. Ketika laju kehilangan massa di fase RSG ditingkatkan, masa hidup bintang di fase RSG akan meningkat untuk model 12M $_{\odot}$ dan 15M $_{\odot}$, karena tidak adanya fenomena *blue loop*. Sebaliknya, masa hidup di fase RSG menurun untuk model 20M $_{\odot}$ dan 25M $_{\odot}$ ketika laju kehilangan massa di fase RSG ditingkatkan. Hal ini terjadi karena pada model 20M $_{\odot}$ dan 25M $_{\odot}$ akan bergerak kembali ke daerah biru ketika mengalami laju kehilangan massa yang besar.
- Oleh karena akan tetap berada di fase RSG di akhir masa hidupnya maka untuk model 12M $_{\odot}$ dan 15M $_{\odot}$, akan memiliki tren di mana radius model bintang akan semakin membesar ketika laju kehilangan massa semakin diperbesar. Sementara untuk model 20M $_{\odot}$ dan 25M $_{\odot}$ yang mengalami evolusi ke daerah biru akan memiliki tren di mana radiusnya akan mengecil. Hal ini tentu linear dengan posisi bintang di diagram HR, di mana semakin ke kanan, radius cenderung untuk membesar.
- Gambar 4.2b menunjukkan fraksi massa yang hilang oleh angin bintang selama berada di fase RSG saat berbagai laju kehilangan massa diberikan. Untuk bintang dengan massa yang lebih besar (sebagai contoh adalah 20M $_{\odot}$), laju kehilangan massa standar akan membuat model bintang kehilangan ~32% dari total massanya selama berada di fase RSG. Ketika laju kehilangan massa diperbesar 3x dari nilai standar, fraksi massa yang hilang juga akan meningkat hingga ~38%. Apabila kehilangan massa bintang terus diperbesar (dari 3x menjadi 5x), bintang kemudian tidak akan mengalami perubahan kehilangan fraksi massa yang signifikan. Georgy et. al (Meynet et al., 2015) menjelaskan bahwa saturasi pada nilai laju kehilangan massa ini muncul karena terdapat limit massa yang “boleh” hilang pada fase ini. Alasannya kembali lagi pada struktur bintang itu sendiri. Ketika bintang kehilangan massa, selubung terluarnya akan menjadi kurang masif, dan pada akhirnya, akan tiba di suatu titik di mana massa selubung mencapai nilai *threshold* terhadap massa inti bintang (massa inti helium) pada saat itu. Pada titik ini, bintang telah bertransisi

keluar dari fase RSG. Artinya, dengan kata lain sebesar apapun peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG yang diberikan, bintang telah melewati titik kritis di mana mayoritas massa telah “hilang” (terlepas) dari bintang.

- Jadi pada model dengan massa awal $20M_{\odot}$ dan $25M_{\odot}$, fenomena *blue loop* mengindikasikan kehilangan massa dengan jumlah yang relatif konstan. Bintang masif selama evolusinya akan memiliki struktur layaknya lapisan bawah dan kehilangan massa yang semakin besar akan mempercepat proses pelepasan lapisan-lapisan ini ke medium antarbintang apabila dibandingkan model dengan laju yang standar. Hal ini kemudian akan membuat bintang mengekspos lapisan internalnya ke permukaan, tetapi pada tahap evolusi yang lebih awal.
- Secara umum, peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG akan membuat masa hidup total untuk setiap massa pada model bintang menjadi lebih singkat, meskipun perbedaannya tidak begitu signifikan (gambar 2).



Gambar 2. (a) Waktu yang dihabiskan di fase RSG (dalam skala logaritmik) sebagai fungsi dari peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG. (b) Fraksi massa yang hilang di fase RSG sebagai fungsi dari peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG.

Evolusi Pasca Fase RSG

Evolusi pasca RSG merupakan fase krusial dalam siklus hidup bintang masif. Fase ini memainkan peran penting dalam menentukan nasib akhir bintang. Gambar 1 secara tidak langsung menunjukkan bahwa ketika berbagai laju kehilangan massa di fase RSG diberikan, jejak evolusi pasca fase RSG akan berubah. Hal ini juga didukung oleh informasi di akhir evolusi model bintang pada tabel 1 (kolom model pra-SN), di mana model dengan massa yang lebih besar akan berevolusi kembali ke daerah biru. Tabel 2 berikut ini menunjukkan waktu yang dihabiskan oleh model bintang di daerah biru, kuning, dan merah. Sama halnya dengan penelitian dari Georgy et al. (Georgy, 2012) dan Renzo et al. (Renzo et al., 2017), pada penelitian ini penulis juga mengadopsi nilai *threshold* yang sama dalam mendefinisikan beberapa fase di evolusi bintang masif.

Tabel 2 Durasi berbagai fase pasca RSG (dalam Myr).

Model	tB1	tY1	tRSG	tY2	tB2	tY3	tRSG2	tWR	tpRSG	tpMS
	$1 \times M_{\text{stan}}$									
A12x1	0.0029	0	1.618	0	0	0	0	0	0	1.641
A15x1	0.0014	0.007	0.307	0.008	0.617	0.060	0.111	0	0.685	1.156
A20x1	0.0111	0.011	0.81	0	0	0	0	0	0	0.835

Model	tB1	tY1	tRSG	tY2	tB2	tY3	tRSG2	tWR	tpRSG	tpMS
A25x1	0.0049	0.005	0.365	0.273	0	0	0	0	0.273	0.657
$3x\dot{M}_{stan.}$										
A12x3	0.0029	0	1.617	0	0	0	0	0	0	1.640
A15x3	0.001	0	0.354	0.016	0.204	0.144	0.350	0	0.364	1.146
A20x3	0.0025	0.007	0.367	0.155	0.251	0.0249	0	0	0.431	0.822
A25x3	0.0049	0.005	0.101	0.143	0.369	0.0148	0	0	0.527	0.654675
$5x\dot{M}_{stan.}$										
A12x5	0.0029	0	1.620	0	0	0	0	0	0	1.620
A15x5	0.0014	0.007	1.13	0	0	0	0	0	0	1.141
A20x5	0.0025	0.007	0.226	0.089	0.464	0.0169	0	0	0.57	0.821
A25x5	0.0049	0.005	0.057	0.085	0.475	0.0103	0	0	0.571	0.654

Fase WR (telah disinggung di bagian metode) didefinisikan sebagai fase di mana bintang berada di daerah biru dan memiliki fraksi massa hidrogen < 0.4 . Meskipun demikian, ketika model mencapai *stopping condition* yang telah ditetapkan di bab sebelumnya, tidak terdapat model bintang yang memenuhi syarat untuk menjadi bintang WR. Selanjutnya, bintang di daerah biru didefinisikan ketika $\log(T_{eff}/K) \geq 3.9$. Kriteria dalam penentuan daerah biru ini mencakup beberapa fase, seperti *blue supergiant* (BSG), *blue hypergiant* (BHG), dan *luminous blue variable* (LBV). Penulis berusaha untuk membedakan masa waktu yang dihabiskan model bintang di daerah biru sebelum (tB1) dan setelah mengalami fase RSG (tB2). Selanjutnya, bintang di daerah kuning merupakan bintang dengan temperatur efektif yang berada pada rentang $3.6 < (T_{eff}/K) < 3.9$, yang kemudian meliputi fase *yellow supergiant* (YSG) dan *yellow hypergiant* (YHG). Pada tabel di atas juga dibuat kolom tY1 yang artinya adalah durasi yang dihabiskan di daerah kuning sebelum mengalami fase RSG serta tY2 dan tY3 yang keduanya merupakan representasi dari masa waktu yang dihabiskan model bintang di daerah kuning pasca fase RSG dan BSG. Adapun fase RSG didefinisikan ketika model memiliki rentang temperatur efektif $\log(T_{eff}/K) \leq 3.6$ untuk setiap massa model yang disajikan pada Tabel 2.

Secara umum, total masa waktu yang dihabiskan di fase pasca deret utama (kolom tpMS pada tabel 2) tidak begitu dipengaruhi oleh perubahan laju kehilangan massa di fase RSG. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, perubahan laju kehilangan massa di fase RSG akan memiliki pengaruh besar terhadap durasi pada fase pasca RSG (kolom tpRSG di tabel 2). Ketika peningkatan laju kehilangan massa diberikan, ditemukan perpanjangan yang signifikan dalam durasi pasca RSG. Sebagai contoh, model $20M_{\odot}$ dengan laju kehilangan massa standar, tidak memiliki masa hidup di fase pasca RSG. Namun, ketika kehilangan massa di fase RSG ditingkatkan (model “ $3\dot{M}_{std.}$ ” dan “ $5\dot{M}_{std.}$ ”), maka akan menghabiskan sekitar 52% dan 69% terhadap total periode yang dihabiskan pada fase pasca deret utama.

Fraksi yang dihabiskan oleh model pada fase pasca deret utama di daerah biru dan kuning diagram HR sejatinya bergantung terhadap massa awal, rotasi, dan laju kehilangan massa di fase RSG. Ketika model bintang berevolusi kembali ke daerah biru (pasca RSG), lama waktu yang dihabiskan di fase YSG atau BSG secara umum akan lebih besar apabila dibandingkan pada saat model tersebut berada di fase yang sama sebelum mengalami fase RSG (lihat tabel 4.2). Oleh karena itu, ketika model kembali berevolusi ke daerah biru di diagram HR, artinya terdapat peluang yang lebih besar di mana model bintang tersebut akan berakhir sebagai objek

pre-supernova berupa YSG atau BSG ketimbang akan kembali lagi ke daerah merah dan berakhir sebagai RSG.

Peningkatan laju kehilangan massa pada semua model, sayangnya, tidak mampu untuk menghasilkan objek pra-supernova berupa bintang WR. Fraksi massa masih dapat hilang setelah bintang melewati fase RSG, namun jumlahnya tidak diketahui dengan pasti karena mekanisme kehilangan massa di fase itu juga masih belum jelas. Oleh karena bintang akan berevolusi ke fase LBV ketika berada di daerah biru setelah kehilangan fraksi massa yang signifikan di fase RSG, sejumlah fraksi massa juga akan hilang oleh karena erupsi di fase LBV ini. Namun, sekali lagi total massa yang hilang di fase ini belum dapat diketahui (Meynet et al., 2015). Sebagai tambahan, dalam penelitian ini, penulis membatasi hanya pada kehilangan massa di fase RSG dan tidak membahas lebih jauh mengenai kehilangan massa yang terjadi pasca fase RSG.

SIMPULAN

Peningkatan laju kehilangan massa di fase RSG memberikan pengaruh yang signifikan terhadap masa waktu yang dihabiskan oleh bintang masif di fase RSG. Hal ini juga kemudian memengaruhi total masa hidup bintang, walau perbedaannya tidak begitu signifikan. Evolusi pasca RSG dan hubungannya dengan peningkatan laju kehilangan massa pada fase RSG memiliki dampak signifikan pada evolusi pasca RSG. Untuk model dengan massa yang lebih besar, kehilangan massa yang lebih besar akan membuat model memiliki jejak evolusi yang lebih panjang di fase pasca RSG.

UCAPAN TERIMA KASIH

Artikel ilmiah ini didedikasikan untuk mengenang (Almh.) Ibu Nur Hasanah, S.Si., M.Si. Selaku pembimbing tugas akhir penulis. Terima kasih untuk semua hal yang telah diajarkan selama ini. Semoga amal ibadah dan usaha beliau diterima di sisi Allah SWT.

DAFTAR PUSTAKA

- Bennett, P. D. (2009). Chromospheres and Winds of Red Supergiants: An Empirical Look at Outer Atmospheric Structure. *ASP Conference Series*, 425, 181. <http://arxiv.org/abs/1004.1853>
- Emily Levesque. (2017). Astrophysics of Red Supergiant. In *IOP Astronomy*.
- Georgy, C. (2012). Yellow supergiants as supernova progenitors: An indication of strong mass loss for red supergiants? *Astronomy and Astrophysics*, 538(May). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201118372>
- Georgy, C. (2016). Evolution models of red supergiants. *Proceedings of the International Astronomical Union*, 12(S329), 193–198. <https://doi.org/10.1017/S1743921317003179>
- Georgy, C., & Ekström, S. (2015). Mass Loss of Red Supergiants: A Key Ingredient for the Final Evolution of Massive Stars. *EAS Publications Series*, 71–72, 41–46. <https://doi.org/10.1051/eas/1571007>
- Giannone, P. (1967). Sequences of Inhomogeneous Models for Helium-Burning Stars. *ApJ*, 65, 226. <http://ukads.nottingham.ac.uk/abs/1967ZA.....65..226G>
- Heger, A., Fryer, C. L., Woosley, S. E., Langer, N., & Hartmann, D. H. (2003). How Massive Single Stars End Their Life. *The Astrophysical Journal*, 591(1). <https://doi.org/10.1086/375341>
- Hernández-Cervantes, L., Pérez-Rendón, B., Santillán, A., García-Segura, G., & Rodríguez-Ibarra, C. (2019). Enhanced mass loss rates in red supergiants and their impact on the circumstellar medium.



- Revista Mexicana de Astronomia y Astrofisica*, 55(2), 161–175.
<https://doi.org/10.22201/ia.01851101p.2019.55.02.04>
- Hirschi, R., Chiappini, C., Meynet, G., Ekström, S., & Maeder, A. (2007). Mass loss and very low-metallicity stars. *AIP Conference Proceedings*, 948(September), 397–404.
<https://doi.org/10.1063/1.2818999>
- Lamers, J. S. V. A. de K. H. J. G. L. M. (2004). Mass-loss predictions for O and B stars as a function of metallicity. *Astronomy and Astrophysics*, 814, 803–814. <https://doi.org/10.1051/0004-6361>
- Massey, P. (2003). Massive Stars in the Local Group: Implications for Stellar Evolution and Star Formation. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 41(1982), 15–56.
<https://doi.org/10.1146/annurev.astro.41.071601.170033>
- Mauron, N., & Josselin, E. (2011). The mass-loss rates of red supergiants and the de Jager prescription. *Astronomy and Astrophysics*, 526(19). <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201013993>
- Meynet, G., Chomienne, V., Ekström, S., Georgy, C., Granada, A., Groh, J., Maeder, A., Eggenberger, P., Levesque, E., & Massey, P. (2015). Impact of mass-loss on the evolution and pre-supernova properties of red supergiants? *Astronomy and Astrophysics*, 575. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201424671>
- Nieuwenhuijzen, H., & de Jager, C. (1990). Parametrization of stellar rates of mass loss as functions of the fundamental stellar parameters M, L, and R. *Astronomy and Astrophysics*, 231(134–136).
- Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., Herwig, F., Lesaffre, P., & Timmes, F. (2010). Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA). *Astrophysical Journal, Supplement Series*, 192(1), 1–110. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/1/3>
- Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., Herwig, F., Lesaffre, P., & Timmes, F. (2011a). Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA). *Astrophysical Journal, Supplement Series*, 192(1), 1–110. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/1/3>
- Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., Herwig, F., Lesaffre, P., & Timmes, F. (2011b). Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA). *Astrophysical Journal, Supplement Series*, 192(1). <https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/1/3>
- Paxton, B., Cantiello, M., Arras, P., Bildsten, L., Brown, E. F., Dotter, A., Mankovich, C., Montgomery, M. H., Stello, D., Timmes, F. X., & Townsend, R. (2013). Modules for experiments in stellar astrophysics (MESA): Planets, oscillations, rotation, and massive stars. *Astrophysical Journal, Supplement Series*, 208(1), 1–45. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/208/1/4>
- Paxton, B., Marchant, P., Schwab, J., Bauer, E. B., Bildsten, L., Cantiello, M., Dessart, L., Farmer, R., Hu, H., Langer, N., Townsend, R. H. D., Townsley, D. M., & Timmes, F. X. (2015). Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Binaries, pulsations, and explosions. *Astrophysical Journal, Supplement Series*, 220(1), 1–43. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/220/1/15>
- Paxton, B., Schwab, J., Bauer, E. B., Bildsten, L., Blinnikov, S., Duffell, P., Farmer, R., Goldberg, J. A., Marchant, P., Sorokina, E., Thoul, A., Townsend, R. H. D., & Timmes, F. X. (2018). Modules for experiments in stellar astrophysics (mesa): convective boundaries, element diffusion, and massive star explosions. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 234(2), 34. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/aaa5a8>
- Paxton, B., Smolec, R., Schwab, J., Gaudy, A., Bildsten, L., Cantiello, M., Dotter, A., Farmer, R., Goldberg, J. A., Jermyn, A. S., Kanbur, S. M., Marchant, P., Thoul, A., Townsend, R. H. D., Wolf, W. M., Zhang, M., & Timmes, F. X. (2019). Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA): Pulsating Variable Stars, Rotation, Convective Boundaries, and Energy Conservation. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 243(1), 10. <https://doi.org/10.3847/1538-4365/ab2241>
- Renzo, M., Ott, C. D., Shore, S. N., & De Mink, S. E. (2017). Systematic survey of the effects of wind mass loss algorithms on the evolution of single massive stars. *Astronomy and Astrophysics*, 603. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201730698>
- Vink, J. S., De Koter, A., & Lamers, H. J. G. L. M. (2000). New theoretical mass-loss rates of O and B stars. *Astronomy and Astrophysics*, 362(1), 295–309.

- Woosley, S. E. (1993). The Evolution of Massive Stars Including Mass Loss: Presupernova Models and Explosion. *The Astrophysical Journal*, 411, 823–839. https://www.researchgate.net/publication/269107473_What_is_governance/link/548173090cf22525dcb61443/download%0Ahttp://www.econ.upf.edu/~reynal/Civilwars_12December2010.pdf%0Ahttps://think-asia.org/handle/11540/8282%0Ahttps://www.jstor.org/stable/41857625
- Yang, M., & Jiang, B. W. (2012). The period-luminosity relation of red supergiant stars in the Small Magellanic Cloud. *The Astrophysical Journal*, 754(1), 35–58. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/754/1/35>
- Yoon, S. C., & Cantiello, M. (2010). Evolution of massive stars with pulsation-driven superwinds during the red supergiant phase. *Astrophysical Journal Letters*, 717(1). <https://doi.org/10.1088/2041-8205/717/1/L62>

