



Analisis Struktur Dan Komposisi Kimia Pada Tahapan Evolusi Bintang Primer Bermassa $2.24M_{\odot}$ Tipe Algol

M. Abu Kamal,¹ Asih Melati²

Institut Sains dan Teknologi Annuqayah,¹

Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga²

Email: akmal09kasya@gmail.com,¹ asih.melati@gmail.com²

Abstract: Modeling has been carried out using the STARS software to analyze the structure and chemical composition of a primary star with a mass of $2.24M_{\odot}$ type Algol. Algol type stars are close binary star systems that experience the Algol paradox. The Algol paradox is a situation where a star with a smaller mass turns out to have evolved further than a star with a larger mass. The results of this modeling are (1) HR diagrams (2) star structure graphs and (3) graphs of star chemical composition as a function of radius.

Keywords: Algol. Primary Star. Evolution. Chemical Composition. Star Structure

Abstract: Telah dilakukan pemodelan menggunakan perangkat lunak STARS untuk menganalisis struktur dan komposisi kimia bintang primer bermassa $2.24M_{\odot}$ tipe Algol. Bintang tipe Algol merupakan sistem bintang gandadekat yang mengalami paradoks Algol. Paradoks Algol adalah situasi dimana bintang yang massanya lebih kecil ternyata telah berevolusi lebih lanjut dibanding bintang yang massanya lebih besar. Hasil dari pemodelan ini adalah (1) diagram HR (2) grafik struktur bintang dan (3) grafik komposisi kimia bintang sebagai fungsi jari-jari.

Keywords: Algol. Bintang Primer. Evolusi. Komposisi Kimia. Struktur Bintang

Pendahuluan

Bintang dilahirkan di dalam awan antar bintang (*nebula*), kemudian berkembang dan pada akhirnya cahayanya akan padam (mati). Tahapan-tahapan inilah yang kemudian disebut evolusi bintang. Evolusi bintang ini merupakan akibat adanya perubahan struktur dalam bintang. Pada bintang tunggal evolusi bintang hanya dipengaruhi oleh massa dan metalitasnya (Wulandari dan Rendy Darma, 2021) (Sakinah dan Aprilia, 2021). Bintang yang bermassa besar tahapan evolusinya lebih cepat dari pada bintang yang bermassa kecil. Begitu pula tahapan evolusi bintang yang lahir dari sisa-sisa ledakan bintang cenderung lebih cepat dari pada bintang yang lahir dari *nebula* karena unsur beratnya lebih besar (Kutner, 2003).

Evolusi bintang ganda (*binary stars*) khususnya bintang ganda dekat berbeda dengan evolusi bintang tunggal. Gravitasi yang ditimbulkan oleh pasangan bintang berperan penting dalam proses evolusi keduanya. Setidaknya ada tiga hal yang perlu diperhitungkan dalam evolusi bintang ganda dekat, yaitu massa total sistem, periode orbit dan rasio massa (Eggleton, 2006). Ketiga parameter tersebut dapat berubah selama proses evolusinya.

Berdasarkan data hasil pengamatan bintang ganda, kebanyakan bintang yang massanya lebih besar masih berada di deret utama sedangkan bintang yang massanya lebih kecil sudah meninggalkan deret utama. Peristiwa ini bertentangan dengan paham evolusi bintang yang telah dijabarkan di atas. Kenyataan inilah yang kemudian dikenal dengan paradoks Algol.

Received Juni 20, 2023; Revised Juli 15, 2023; Acepted: Agustus 01, 2023

* M. Abu Kamal, akmal09kasya@gmail.com

Sistem bintang yang mengalami paradoks Algol disebut bintang ganda dekat tipe Algol. Penjelasan mutakhir tentang paradoks Algol adalah adanya fenomena transfer massa pada pasangan sistem bintang ganda tersebut (Eggleton dan Ludmila 2002).

Landasan Teori

Evolusi Bintang

Ruang antar bintang bukanlah ruang yang kosong, tetapi berisi gas dan debu yang disebut *interstellar medium* yang terdiri dari hidrogen dan sisanya adalah helium dan elemen berat lainnya. Gravitasi antar molekul gas yang terdapat dalam awan molekuler memegang peranan penting dalam proses pembentukan bintang (Krane, 1992). Bagian terluar dari kumpulan materi antar bintang akan tertarik akibat gravitasi sehingga awan molekuler tersebut akan mengalami kondensasi. Kondensasi yang terjadi pada awan molekuler menyebabkan tekanan dari dalam meningkat dan melawan pengerutan.

Gravitasi akan dominan terhadap tekanan jika massa dan ukuran awan tersebut cukup besar, yaitu melebihi nilai kritis yang disebut *instabilitas Jeans*. *Instabilitas Jeans* adalah syarat batas minimal sebuah awan molekuler runtuh untuk membentuk bintang-bintang. Syarat ini mencakup dua hal yaitu, massa dan jari-jari Jeans (Kutner, 2003)

$$M_J = 1.23 \times 10^{-10} \frac{1}{\sqrt{\rho}} \left[\frac{T}{\mu} \right]^{3/2}, \quad R_J = \sqrt{\frac{15kT}{8\pi Gm\rho}} \quad (1)$$

dengan G konstanta gravitasi, ρ rapat massa awan, μ massa molekul rata-rata gas, k konstanta Boltzmann, m massa partikel dan T adalah temperatur awan.

Saat bintang mencapai deret utama berumur nol, komposisi kimia bintang masih homogen yang mencerminkan komposisi awan antar bintang yang membentuknya. Energi yang dipancarkan bintang berasal dari reaksi fusi yang berlangsung di pusat bintang (Admiranto, 2009). Struktur dalam bintang pada deret utama tergantung pada massa bintang. Begitu pula masa evolusi lanjut bintang dimulai dan ditentukan oleh massa awan pembentuk bintang dan massa bintang. Makin besar massanya maka evolusinya semakin cepat untuk meninggalkan deret utama. Bintang menghabiskan sekitar 90% umurnya untuk membakar hidrogen dalam reaksi fusi yang menghasilkan helium dengan temperatur dan tekanan yang sangat tinggi.

Bintang ganda dekat merupakan sistem bintang ganda dimana jarak antara bintang primer dan bintang sekunder sangat dekat. Bintang ganda jenis ini tidak dapat dipisahkan secara visual walaupun menggunakan teleskop yang sangat ampuh karena jaraknya yang sangat

berdekatan (Hilditch, 2001). Evolusi bintang ganda dekat berbeda dengan evolusi bintang tunggal (Sutantyo, 1984). Evolusi bintang ganda dekat selain dipengaruhi oleh massa dan komposisi kimia bintang juga dipengaruhi oleh pasangannya yang sangat dekat. Gravitasi yang ditimbulkan oleh masing-masing bintang berpengaruh terhadap kelangsungan evolusi pasangannya. Pengaruh gravitasi ini akan semakin besar jika kedua komponen terpisah pada jarak yang cukup dekat sedangkan ukuran kedua bintang bermassa besar.

Pada sistem bintang ganda, bintang yang pada awalnya bermassa lebih besar disebut bintang *primer* (M_1) dan bintang yang bermassa lebih kecil disebut bintang *sekunder* (M_2). Evolusi bintang *primer* lebih cepat dari pada bintang *sekunder* sehingga lebih dahulu meninggalkan deret utama menuju tahap raksasa atau maha raksasa. Bintang akan mengembang, jari-jarinya semakin besar sehingga pada akhirnya permukaan bintang mencapai permukaan ekipotensialnya (*Roche lobe* kedua bintang).

Secara umum interaksi bintang ganda dekat digambarkan dalam bentuk potensial *Roche* (Eggleton, 2006). Potensial *Roche* (permukaan ekipotensial) merupakan kedudukan titik-titik yang mempunyai nilai potensial gravitasi sama. Permukaan ekipotensial yang melalui L_1 disebut *Roche lobe*, dan ukuran dari *Roche lobe* ini bergantung kepada rasio massa kedua bintang ganda.

$$R_R = 0.49 \frac{q^{2/3}}{0.6q^{2/3} + \ln(1 + q^{1/3})} a \quad (2)$$

dengan $q = \frac{M_1}{M_2}$.

Struktur Bintang

Struktur bintang dibangun atas empat konsep persamaan fisis. Keempat konsep tersebut adalah persamaan kesetimbangan hidrostatis, hantaran energi, kesetimbangan energi dan kesinambungan massa. Kesetimbangan hidrostatis akan terpenuhi jika gravitasi antar materi penyusun setara dengan tekanan dalam bintang. Persamaan kesetimbangan hidrostatis dinyatakan

$$\frac{dP}{dr} = \frac{-GM(r)}{r^2} \rho(r) \quad (3)$$

Persamaan 3 menunjukkan bahwa semakin cepat perubahan P atau tekanan internal terhadap r , maka semakin besar pula peningkatan gravitasinya.

Energi yang dibentuk di pusat bintang harus dihantarkan ke luar. Secara umum, ada tiga macam hantaran energi yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Hantaran energi yang

berperan di dalam bintang adalah konveksi dan radiasi. Konduksi tidak berperan di bintang, karena konduktivitas materi bintang sangat kecil (Karttunen, 2007). Persamaan hantaran energi radiasi diberikan oleh persamaan berikut:

$$\frac{dT}{dr} = \frac{3}{16} \frac{\rho \kappa L(r)}{\alpha c \pi r^2 T^3} \quad (4)$$

Sedangkan persamaan hantaran energi secara konveksi adalah:

$$\frac{dT}{dr} = \left(1 - \frac{1}{\gamma}\right) \frac{T}{P} \frac{dP}{dr} \quad (5)$$

$L(r)$ laju pancaran energi pada jari-jari r , κ koefisien absorpsi Rosseland, c kecepatan cahaya, α konstanta Stefan Boltzmann, dan γ konstanta Laplace yang nilainya $\gamma = C_p / C_v$.

Energi yang dipancarkan bintang tiap detiknya adalah:

$$\frac{dL(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \varepsilon(r) \quad (6)$$

Persamaan tersebut menunjukkan energi yang diradiasikan sama dengan jumlah energi yang diproduksi, dengan $\varepsilon(r)$ adalah fungsi suhu dan komposisi kimia dan $\rho(r)$ sebagai fungsi tekanan (Kutner, 2003).

Persamaan kesinambungan massa menyatakan laju peningkatan massa sebanding dengan kuadrat jari-jari dan rapat massa bintang.

$$\frac{dM(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho(r) \quad (7)$$

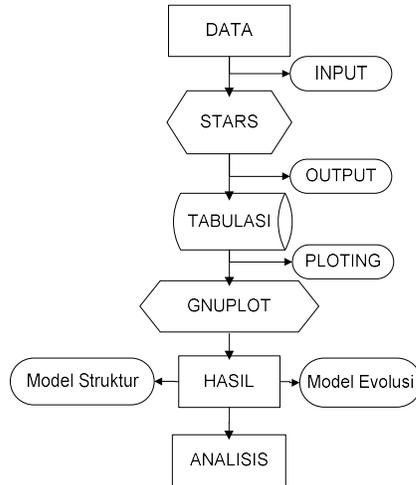
Metode Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian teoritis yang komparasikan dengan komputasi melalui *software* STARS dan *gunplot*. STARS merupakan *software* struktur dan evolusi bintang yang dirancang oleh Peter Eggleton pada awal tahun 1970. Input data pada STARS diisikan pada file *evol.dat* yang menghasilkan output di *fort.20*. File *evol.dat* merupakan file yang berisi input utama yang berisi gambaran kondisi awal bintang yang akan dimodelkan. Sedangkan file *fort.20* berisi detail gambaran model struktur dan evolusi bintang.

Pemodelan struktur dan evolusi bintang menggunakan STARS dilakukan dengan cara memecahkan persamaan (2-7) secara serempak. Untuk menyelesaikan persamaan-persamaan tersebut dibutuhkan informasi tentang parameter awal bintang. Parameter itu terdiri dari massa awal bintang primer, massa total sistem, periode orbit atau momentum sudut, angin bintang, dan metalisitas awal. Sampel yang diambil dalam penelitian ini adalah sistem bintang dengan

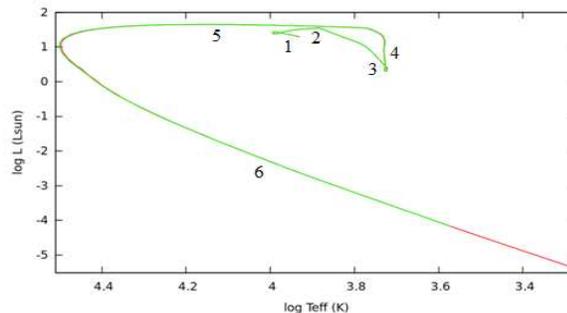
massa awal bintang primer sebesar $2.24M_{\odot}$, bintang sekunder $1.58M_{\odot}$, periode orbit untuk sistem 1.62 hari, angin bintang 0,0 dan 0,5, dan metalisitas 2%.

Langkah-langkah penelitian sebagai digambarkan dalam bagan berikut



Hasil dan Diskusi

Tahapan evolusi bintang primer hasil output STARS dinyatakan dalam diagram HR berikut:

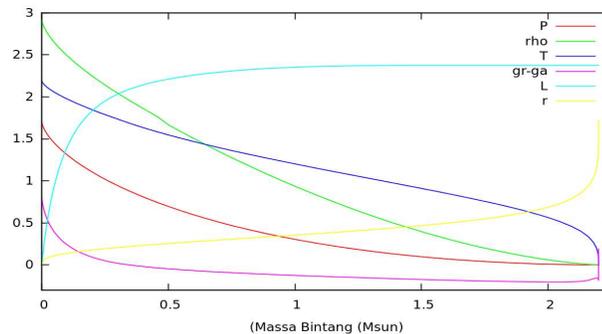


Gambar 1 Diagram HR bintang primer bermassa $2.24M_{\odot}$ dengan parameter angin bintang berbeda

Garis yang lebih panjang dievolusikan dengan angin bintang Reimers $\eta = 0.0$. Sedangkan garis yang lebih pendek dievolusikan dengan angin bintang Reimers $\eta = 0.5$. Angka pada diagram HR di atas menyatakan tahapan evolusi yang dialami oleh bintang primer. Tahapan-tahapan tersebut meliputi:

1. *Fase Zero age main sequence dan main sequence*

Fase ini ditandai dengan mulai terjadinya reaksi termonuklir di pusat bintang. Reaksi ini melalui mekanisme siklus karbon yang melibatkan karbon dan nitrogen serta oksigen sebagai katalisator. Struktur bintang pada fase ini digambarkan dalam grafik berikut:

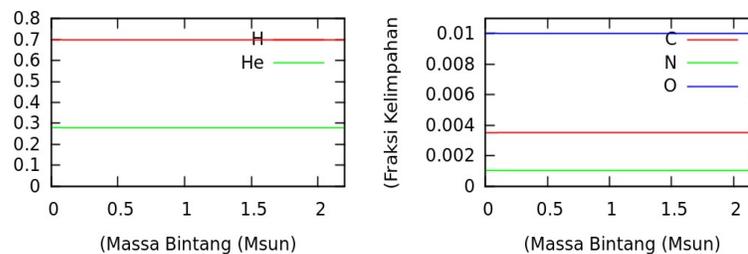


Gambar 2 Struktur bintang primer bermassa $2.24M_{\odot}$ pada fase ZAMS. Tekanan P dalam 10^{17} dyne/cm². Temperatur T dalam 10^7 K. Densitas ρ dinyatakan dalam $20g/cm^3$.

Luminositas dalam $10L_{\odot}$

Berdasarkan gambar (2), dapat diketahui bahwa jari-jari bintang adalah $1.72R_{\odot}$ dengan temperatur efektif 9744 K dan luminositasnya adalah $23.78L_{\odot}$. Dari temperatur efektif dan luminositas bintang dapat diketahui bahwa tipe spektrum bintang pada fase deret utama adalah A0 dengan magnitudo mutlak sekitar 1.5.

Pada fase ini komposisi kimia bintang dari pusat sampai permukaan homogen (seragam). Kehomogenan ini ditandai dengan tetapnya nilai fraksi hidrogen dan helium dari pusat sampai permukaan bintang. Berikut adalah detail komposisi kimia bintang pada fase ini:



Gambar 3 komposisi kimia bintang pada fase ZAMS

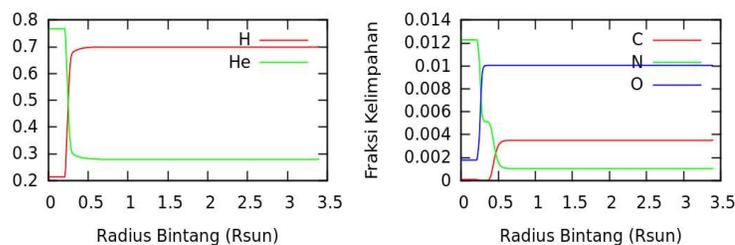
(H = 70%, He = 28%, Metal = 2% terdiri dari C = 0.35%, N = 0.14%, O = 1%, Ne = 0.184% dan Mg = 0.07%)

Pada fase ini, bintang primer dapat dipandang sebagai bintang tunggal bermassa sedang dengan temperatur di pusat bintang mencapai 2.2×10^7 K. Kriteria massa dan temperatur ini mengindikasikan bahwa reaksi termonuklir yang terjadi di pusat bintang sudah tidak lagi melalui siklus proton-proton tetapi melalui siklus karbon. Pembangkitan energi bisa dihitung dengan rumus $\varepsilon = \varepsilon_0 \rho T^{17}$ dengan ε_0 adalah sebuah konstanta yang nilainya sama dengan

$\epsilon_0 = m_x m_z$ (m_x dan m_z adalah fraksi massa hidrogen dan karbon di pusat bintang) (Tayler, 1994).

2. Fase Sub giant branch (SGB)

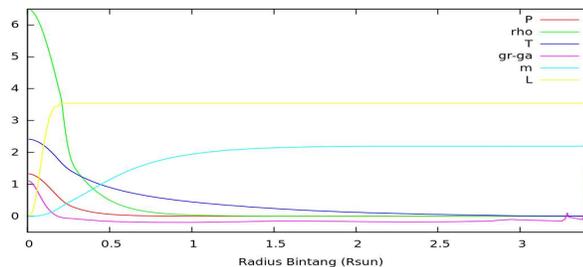
Reaksi termonuklir yang terjadi di pusat bintang menyebabkan secara perlahan-lahan fraksi hidrogen berkurang sedangkan fraksi helium bertambah. Komposisi kimia bintang tidak lagi homogen. Perubahan komposisi ini diikuti dengan pergeseran letak bintang pada diagram HR. Jari-jari bintang dan luminositasnya bertambah, sedangkan temperatur permukaan bintang berkurang sehingga dalam diagram HR posisi bintang bergeser ke kanan atas (angka 2 pada diagram HR).



Gambar 4 komposisi kimia bintang primer pada fase *sub giant branch*.

Untuk kasus bintang tunggal, fase *sub giant branch* ditandai ketika hidrogen di pusat bintang habis, sehingga di pusat bintang terbentuk pusat helium. Fase *sub giant branch* merupakan fase peralihan antara fase deret utama dan fase cabang raksasa merah. Tetapi lain halnya dengan bintang ganda dekat. Pada bintang ganda dekat, fase *sub giant branch* dimulai ketika bintang mengembang sehingga radius bintang mencapai permukaan ekipotensial *Roche* (*Roche lobe*). Radius ekipotensial *Roche* bintang primer sesuai perhitungan adalah $3.39R_{\odot}$.

Struktur bintang dengan radius sebagai variabel bebas. Berikut grafik model struktur bintang pada fase *sub giant branch*:



Gambar 5 struktur bintang primer pada tahap *sub giant branch*. Tekanan P dalam 10^{17} dyne/cm². Temperatur T dalam 10^7 K. Densitas ρ dalam $10g/cm^3$. Luminositas dalam $10L_{\odot}$

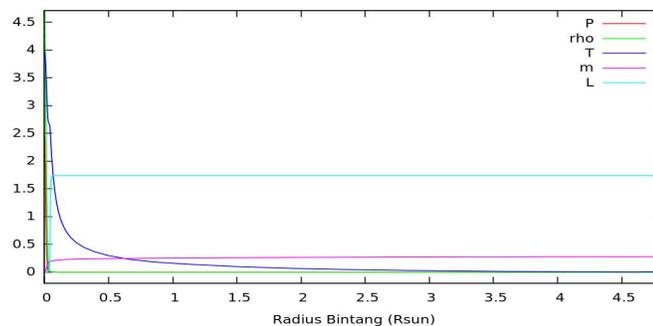
Walaupun bintang terus berusaha mengembang, tetapi permukaan bintang tidak akan melebihi potensial *Roche*-nya. Materi bintang primer akan tumpah melalui titik L_1 dan masuk ke wilayah gravitasi bintang sekunder sehingga tertarik oleh bintang itu (Sutantyo, 1984). Akibatnya terjadilah transfer massa dari bintang primer ke bintang sekunder. Laju transfer massa yang terjadi pada bintang primer berkisar $1.5 \times 10^{-6}M_{\odot}$ pertahun.

Selain kehilangan massa akibat transfer, bintang primer juga kehilangan massa akibat produksi energi yang nilainya berkisar $10^{-20}M_{\odot}$ pertahun. Sedangkan untuk sistem yang melibatkan angin bintang sebesar 0.5, laju kehilangan massa berada pada orde $10^{-10}M_{\odot}$ pertahun.

Akibat transfer massa ini, mula-mula jarak kedua bintang mendekat sampai massa kedua bintang sama. Setelah massa kedua bintang sama jarak kedua bintang menjauh kembali. Dengan kata lain, pada awalnya proses transfer massa berlangsung deras karena pengaruh bertambahnya radius bintang primer dan mendekatnya jarak kedua bintang. Setelah perbandingan massa terbalik (transfer massa berlangsung dari bintang yang bermassa lebih kecil) proses transfer massa menjadi lambat. Setelah itu, bintang primer akan mengerut kembali (radiusnya mengecil). Pengecilan radius ini menyebabkan bintang kembali pada kondisi *detached* dan transfer massa berhenti. Selain itu, separasi antara kedua bintang membesar sehingga bintang bisa mengembang kembali.

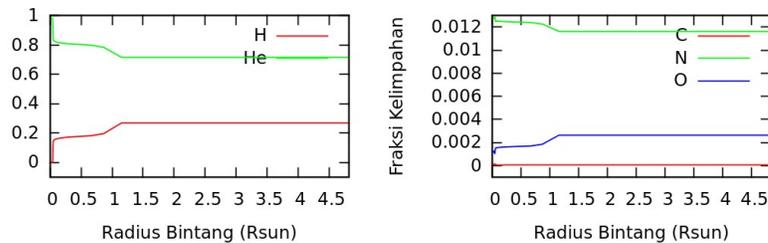
3. Fase Red giant branch (RGB)

Jika massa helium di pusat bintang mencapai batas massa Schönberg-Chandrasekar (10-15% massa bintang), maka pusat helium akan runtuh. Keruntuhan pusat bintang menyebabkan permukaan bintang mengembang dengan cepat dan bintang memasuki fase cabang raksasa merah (*red giant branch*). Pengembangan selubung ini tidak diikuti oleh peningkatan luminositas, bahkan luminositas menurun. Hal ini disebabkan sebagian besar energi yang dibangkitkan dalam bintang digunakan untuk pengembangan selubung. Pada diagram HR posisi bintang menyebjang dengan ke angka tiga. Berikut adalah gambar struktur bintang pada fase *Red Giant Branch*.



Gambar 6 struktur bintang primer bermassa $2.24M_{\odot}$ pada tahap *red giant branch*. Tekanan P dalam 10^{20} dyne/cm². Temperatur T dalam 10^7 K. Densitas ρ dalam $10^4\rho_{\odot}$ Luminositas dalam $10L_{\odot}$

Bintang sangat lama berada pada fase SBG sehingga pada saat memasuki fase RGB massa bintang sudah sangat kecil $0.28M_{\odot}$. Bintang sudah sangat tua ketika memasuki fase RGB dengan komposisi kimia sudah didominasi oleh helium dari pusat sampai permukaan.

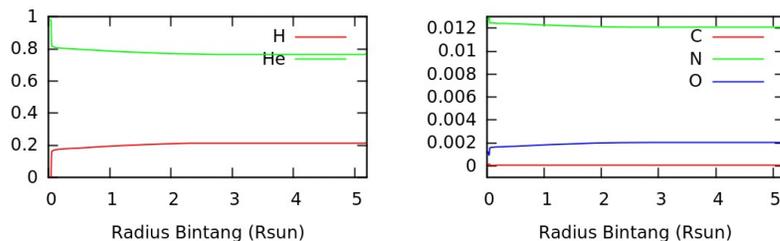


Gambar 7 fraksi kelimpahan komposisi kimia bintang primer bermassa $2.2M_{\odot}$ pada fase *sub giant branch*. Komposisi ini dinyatakan dalam angka 1 (satu).

Pada fase ini radius bintang primer meningkat mencapai $4.82R_{\odot}$. Peningkatan radius bintang primer tidak mencapai permukaan ekuipotensial *Roche*nya, sehingga transfer massa tidak terjadi. Temperatur efektif bintang menurun menjadi $5400K$ sedangkan temperatur inti meningkat mencapai $4 \times 10^7 K$. Temperatur di pusat bintang belum cukup untuk terjadinya fusi helium menjadi karbon dan oksigen. Meskipun demikian, massa unsur-unsur berat (karbon, nitrogen dan oksigen) di pusat bintang meningkat hal ini dipengaruhi oleh menumpuknya unsur-unsur ke arah dalam.

4. Fase *Asymptotic giant branch* (AGB)

Pada fase ini, di pusat bintang terbentuk inti karbon-nitrogen. Pembakaran helium terjadi di selubung yang melingkupi inti ini. Di luar selubung ini merupakan lapisan helium yang kemudian dilingkupi oleh hidrogen. Berikut adalah fraksi komposisi kimia bintang pada fase ini:

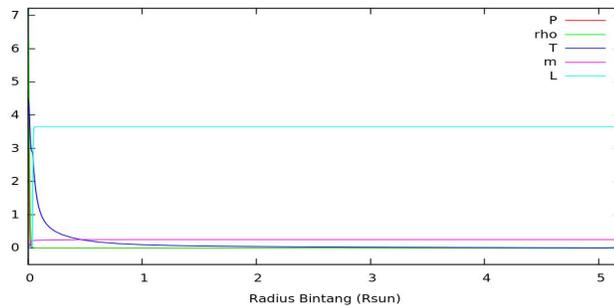


Gambar 8 komposisi kimia bintang pada fase *asymptotic giant branch*

Ketika helium yang ada di selubung mulai berkurang, maka tekanan eksternal akan menurun sehingga lapisan hidrogen yang ada di luar selubung akan runtuh. Keruntuhan ini

menyebabkan temperatur meningkat. Peningkatan temperatur ini memicu peningkatan fusi hidrogen sehingga massa helium kembali meningkat. Peningkatan ini diikuti peningkatan tekanan yang menyebabkan lapisan hidrogen mengembang dan mendingin. Peristiwa ini terjadi berulang-ulang.

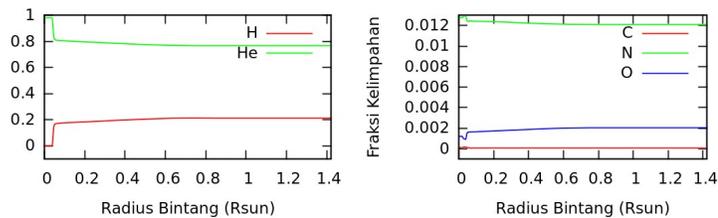
Pengembangan lapisan hidrogen yang terjadi di selubung yang melingkupi helium menyebabkan radius bintang meningkat. Luminositas bintang juga meningkat. Sedangkan massa bintang terkonsentrasi di pusat bintang dengan kerapatan inti mencapai $7000\rho_{\odot}$.



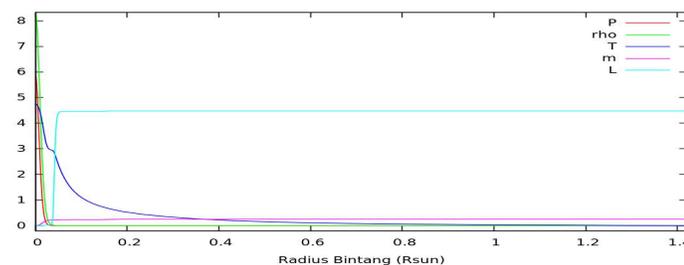
Gambar 9 struktur bintang primer pada tahap *horizontal branch*. Tekanan P dalam 10^{20} dyne/cm². Temperatur T dalam 10^7 K. Densitas ρ dalam $10^4\rho_{\odot}$ Luminositas dalam $10L_{\odot}$

5. Fase Planetary Nebula (PN)

Fase selanjutnya adalah planetary nebula. Pada fase ini temperatur efektif bintang meningkat signifikan sedangkan radius mengecil menjadi $1.42R_{\odot}$. Pada diagram HR bintang bergerak horizontal ke arah kiri. Temperatur inti meningkat menjadi 4.75×10^7 K. Temperatur ini belum cukup untuk terjadinya reaksi *triple-alpha* sehingga kelimpahan unsur karbon, nitrogen dan oksigen di pusat bintang cenderung konstan.



Gambar 10 komposisi kimia bintang pada fase *planetary nebula*

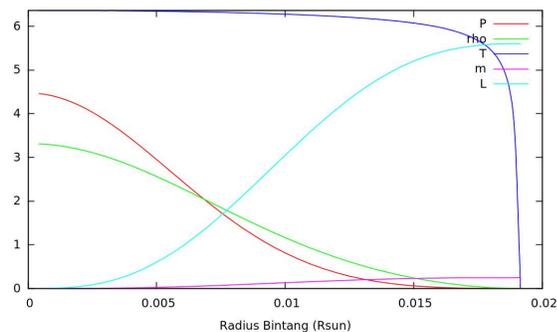


Gambar 11 struktur bintang primer pada tahap *planetary nebula*. Tekanan P dalam 10^{20} dyne/cm². Temperatur T dalam 10^7 K. Densitas ρ dalam $10^4 \rho_{\odot}$ Luminositas dalam $10L_{\odot}$

6. Fase *White dwarf* (WD)

Tahap akhir evolusi bintang bermassa $2.2M_{\odot}$ adalah *white dwarf* (katai putih). Hal ini selaras dengan yang diungkapkan oleh Kippenhahn dan Weigert yang menyatakan bahwa untuk bintang primer bermassa kurang dari $2.2M_{\odot}$ maka setelah terjadinya transfer massa bintang akan berevolusi menjadi bintang katai putih (Sutantyo, 1984).

Bintang katai putih merupakan bintang yang sangat mampat. Kerapatan bintang pada fase ini mencapai $33000\rho_{\square}$. Berbeda dengan fase-fase sebelumnya, pada fase ini kerapatan bintang merata dari pusat sampai permukaan. Radius bintang pada fase ini hanya $0.019R_{\square}$. Kerapatan yang sangat besar menyebabkan elektron berada dalam keadaan terdegenerasi. Tekanan yang ditimbulkan oleh elektron terdegenerasi ini mampu menahan gravitasi sehingga bintang stabil. Berikut adalah detail struktur bintang pada fase *white dwarf*:

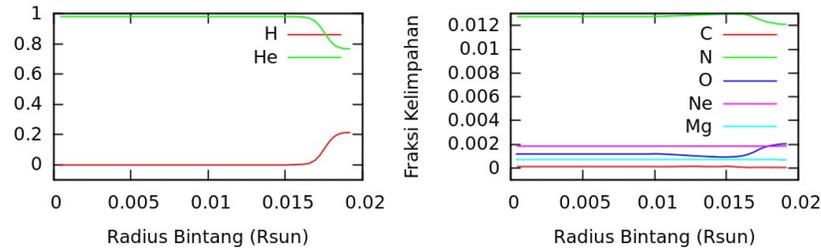


Gambar 12 struktur bintang primer pada tahap *white dwarf*. Tekanan P dalam 10^{20} dyne/cm². Temperatur T dalam 10^7 K. Densitas ρ dalam $10^4 \rho_{\odot}$ Luminositas dalam $10^{-6}L_{\odot}$

Pada fase ini, produksi energi yang menghasilkan cahaya bintang terjadi di selubung bintang paling luar. Produksi energi ini melalui pembakaran hidrogen yang tersisa dilapisan tersebut. Sedangkan produksi energi melalui pembakaran helium tidak terjadi karena temperatur bintang tidak cukup. Temperatur inti pada fase ini adalah $6.2 \times 10^7 K$ sedangkan temperatur permukaan hanya $2000K$.

Komposisi kimia bintang pada fase ini didominasi oleh helium dan elemen-elemen berat yang lain. Sedangkan fraksi hidrogen yang tersisa tinggal sedikit. Ketika hidrogen yang

tersisa ini habis, maka bintang akan padam. Berikut komposisi kimia bintang pada fase *white dwarf*:



Gambar 13 komposisi kimia bintang pada fase *white dwarf*

Kesimpulan

Berdasarkan uraian di atas, dapat diringkas fase evolusi bintang beserta perubahan parameter struktur bintang sebagai berikut

Fase	T _{inti} (K)	T _{eff} (K)	L (L _⊙)	R(R _⊙)	M(M _⊙)
ZAMS - MS	2.19×10^7	9000	24.8	1.72	2.2
SGB	2.3×10^7	7600	35.4	3.38	2.2
RGB	3.96×10^7	5400	17.5	4.82	0.28
AGB	4.6×10^7	6200	36.5	5.18	0.28
PN	4.75×10^7	1250	44.7	1.42	0.25
WD	6.36×10^5	2000	5.6×10^{-6}	0.02	0.25

Perubahan komposisi bintang digambarkan dalam bentuk grafik sebagaimana gambar 3, gambar 4, gambar 7, gambar 8, gambar 10, dan gambar 13.

Referensi

- Admiranto, A Gunawan. 2009. *Menjelajahi Bintang, Galaksi, dan Alam Semesta*. Yogyakarta: Kanisius
- Eggleton, Peter P. dan Ludmila Kiseleva. 2002. *The Evolution Of Cool Alcols*. USA. The Astrophysical Journal. Vol 575:461-473.
- Eggleton, Peter P. 2006. *Evolutinary Processes in Binary and Multiple Stars*. New York: Cambridge University Press.
- Hilditch, R. W. 2001. *An introduction to close binary stars*. New York: Cambridge University Press
- IKarttunen, Hannu. 2007. *Fundamental Astronomy*. New York: Springer
- Krane. S.K., 1987. *Introductory Nuclear Physics*. New York: Cambridge University press
- Kutner, Marc L. 2003. *Astronomy A Physical Perspective*. New York: Cambridge University

press

Sakinah, S.A. & Aprilia. (2021). Studi Pengaruh Metalisitas pada Evolusi Bintang Bermassa Rendah Menggunakan MESA-r12778. Prosiding Seminar Panorama Antariksa 2021

Wulandari & Darma, Rendy. (2021). Analisis Jejak Evolusi dan Struktur Interior Bintang: Studi Kasus Beta Geminorum (pollux). Prosiding Seminar Nasional Fisika 7.0 (2021) 201-208. ISBN : 978-602-74598.5-4.

Yakut, Kadri dan Eggleton, Peter. 2005. *Evolution of close binary systems*. The American Astronomical society. The Astrophysical Journal