



ANALISIS JEJAK EVOLUSI DAN STRUKTUR INTERIOR BINTANG: STUDI KASUS BETA GEMINORUM (POLLUX)

Wulandari^{1*}, Rendy Darma²

^{1,2}Institut Teknologi Bandung, Program Studi Astronomi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Bandung, Indonesia 40132

*Alamat Korespondensi: wulandari.wulandr@gmail.com

ABSTRAK

Setiap bintang di alam semesta memiliki proses evolusi yang berbeda-beda, bergantung pada massa awal bintang dan kelimpahan unsur-unsur berat di dalamnya. Struktur interior bintang mengalami perubahan untuk tiap tahapan evolusinya, dimana struktur ini bersesuaian dengan mekanisme pembangkitan energi di dalam bintang untuk mempertahankan kesetimbangan termal. Dalam pekerjaan ini, dilakukan proses *fitting* spektrum dan pemodelan jejak evolusi sederhana dari bintang Pollux. Tinjauan jejak evolusi Pollux menunjukkan bahwa bintang ini berada dalam tahap Raksasa Merah pada usia ~650 juta tahun, dengan massa sebesar $M_* = (1,96 \pm 0,19) M_{\odot}$, luminositas $L_* = (45,4 \pm 11,1) L_{\odot}$, dan temperatur efektif $T_* = (5051,8 \pm 11,3) K$. Selain itu, struktur interior Pollux terdiri dari zona radiatif pada inti Helium dan zona konvektif pada bagian selubungnya. Dalam kurun waktu ~200 juta tahun ke depan, bintang ini diperkirakan masih berada di tahap Raksasa Merah.

© 2021 Departemen Pendidikan Fisika FPMIPA UPI

Kata kunci: Evolusi, Pollux, Raksasa Merah, Struktur Interior

PENDAHULUAN

Pemahaman tentang evolusi bintang merupakan salah satu kunci penting dalam astrofisika. Studi evolusi bintang memiliki kaitan yang erat dan luas pada berbagai bidang studi astrofisika lainnya, seperti sistem keplanetan (e.g. Winn & Fabrycky. 2015), gugus bintang (e.g. Darma & Arifyanto 2019), galaksi (e.g. Bland-Hawthorn & Gerhard 2010), hingga struktur alam semesta (e.g. Wyithe & Cen 2007).

Awan molekul gas dengan komposisi dominan berupa Hidrogen dan Helium adalah sumber utama dari pembentukan bintang-bintang. Gumpalan awan molekul gas dapat membentuk *protostar* (cikal bakal bintang) dengan massa yang beragam. Hanya *protostar* dengan massa lebih dari $0,08 M_{\odot}$ yang dapat meneruskan evolusi menjadi bintang. Proses evolusi setiap bintang dipengaruhi oleh massa awal dan metalisitas awal dari bintang itu sendiri. Selama proses evolusi, bintang akan mengalami perubahan struktur interior yang dapat dilihat dari berbagai perubahan parameter fisis bintang. Proses ini terus berlanjut hingga bintang mencapai tahap

akhir hidupnya. Terdapat tiga tahap akhir dari evolusi sebuah bintang, yaitu katai putih, bintang neutron, dan lubang hitam. Pembentukan ketiga objek kompak ini akan diiringi oleh pancaran energi tinggi melalui peristiwa seperti supernova dan *gamma ray burst* (e.g. Woosley & Bloom, 2006).

Penelitian ini dilakukan untuk memahami proses evolusi yang terjadi pada bintang tunggal dan struktur interiornya pada tahap evolusi tertentu, melalui tinjauan numerik sederhana. Dalam hal ini, kami memilih bintang Beta Geminorum (Pollux) sebagai objek penelitian. Jaraknya yang dekat dengan Matahari ($d = 10,3 pc$ dan $m_v = 1,16$, lihat Auriere dkk. 2009) memberikan kemudahan untuk menentukan parameter-parameter fisis bintang ini dengan lebih akurat. Lebih menariknya, pemahaman mengenai proses evolusi dan struktur interior pada bintang Pollux dapat memberikan gambaran yang baik mengenai evolusi yang akan terjadi pada Matahari kita. Hal ini dikarenakan Pollux memiliki metalisitas mirip dengan Matahari (*twin star*), namun bintang ini telah lebih

dahulu mencapai tahap evolusi Raksasa Merah (K0 III).

METODE

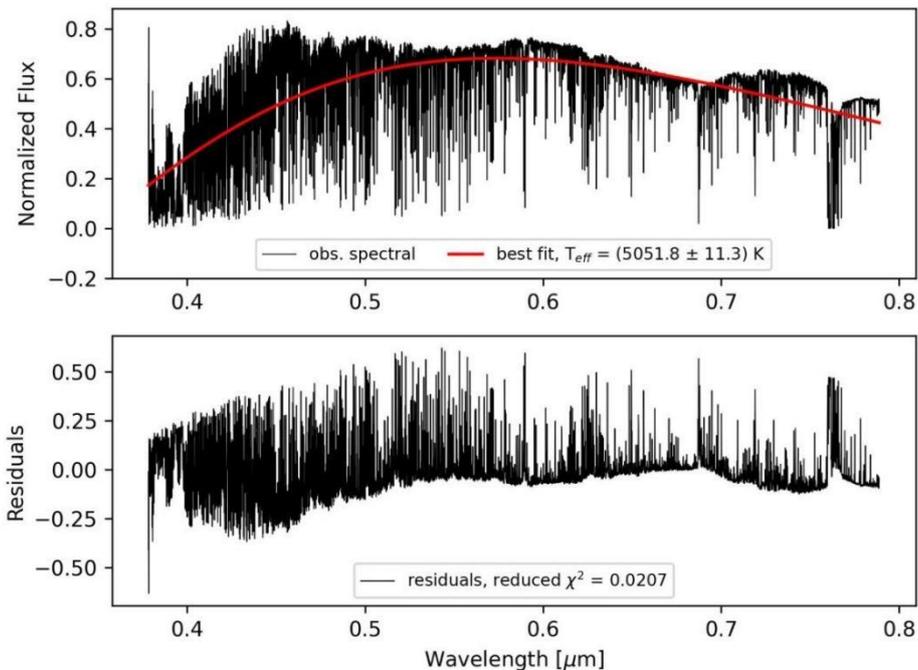
Data

Pemodelan jejak evolusi bintang membutuhkan beberapa parameter fisis sebagai nilai masukan awal pada simulasi numerik yang dilakukan. Parameter-parameter fisis Pollux dapat dilihat pada

Tabel 1. Dalam penelitian ini, nilai temperatur efektif diperoleh melalui proses *fitting* spektrum yang digunakan untuk menghitung nilai luminositas Pollux. Sementara itu, massa awal ditentukan dengan memodelkan jejak evolusi bintang dengan berbagai rentang massa dan metalisitas tetap.

Tabel 1. Nilai parameter bintang yang diadopsi dari referensi (Hatzes dkk. 2012).

No	Parameter	Nilai
1	Radius (R_*)	$(8,29 \pm 0,35) R_\odot$
2	Metalisitas (Z)	$(-0,07 \pm 0,05) dex$
3	Massa (M_*)	$1,96 \pm 0,19 M_\odot$



Gambar 1. Hasil *fitting* spektrum Pollux pada rentang panjang gelombang 377,2–789,997 nm. Residual dari proses *fitting* ini cukup baik, dengan rata-rata 0,0207.

Penentuan Temperatur dan Luminositas

Jejak evolusi bintang digambarkan dalam sebuah diagram hubungan antara luminositas terhadap temperatur bintang yang disebut sebagai diagram Hertzsprung-Russell (HR). Penentuan temperatur dan luminositas bintang saat ini bertujuan untuk melihat posisi Pollux di dalam diagram HR dan menganalisis jejak evolusinya setelah

melewati tahap evolusi saat ini (Raksasa Merah).

Data spektrum yang digunakan dalam proses *fitting* adalah data dari *European Southern Observatory* (ESO) yang menggunakan instrumen ESPRESSO. ESPRESSO adalah *optical echelle spectrograph* beresolusi tinggi yang mengumpulkan cahaya dari satu hingga empat unit teleskop ESO VLT secara tidak

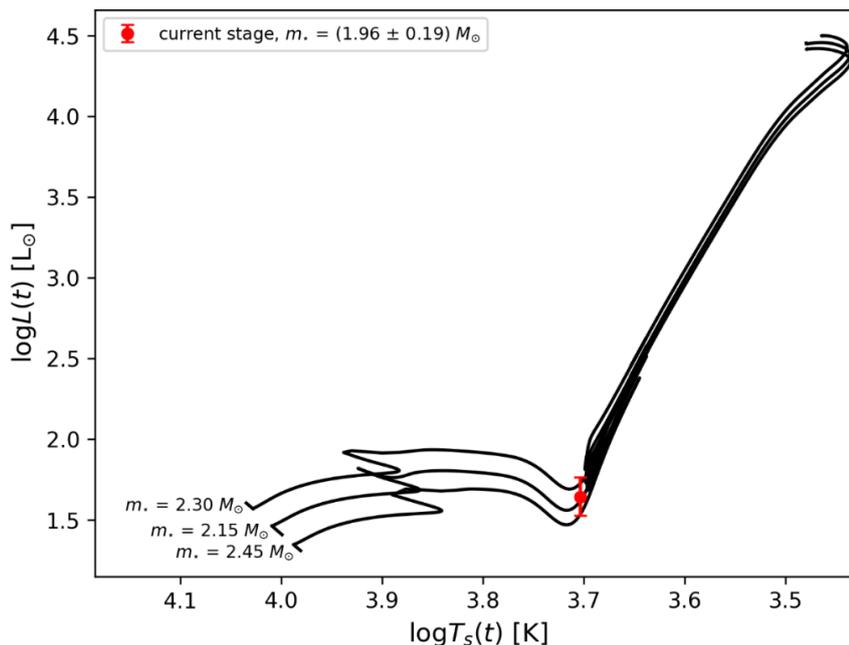
koheren (Baldini dkk. 2014, Pepe dkk. 2021). Spektrograf ini mengamati spektrum bintang dalam rentang panjang gelombang 380–788 nm dan rentang *resolving power* dari 140.000–190.000 (Pepe dkk. 2021). Tabel 2 berikut menunjukkan parameter data spektroskopi yang digunakan.

Gambar 1 menunjukkan hasil *fitting* spektrum Pollux. Berdasarkan *fitting* spektrum dengan menggunakan algoritma *markov chain monte carlo* (lihat Darma dkk. 2019), didapatkan bahwa temperatur efektif

Pollux saat ini adalah $T_* = (5051,8 \pm 11,3) K$. Dengan menggunakan nilai temperatur efektif tersebut dan radius yang tercantum pada Tabel 1, maka nilai luminositas bintang dapat ditentukan secara analitik, yaitu sebesar $L_* = 4\pi R^2 \sigma T^4 = (45,4 \pm 11,1) L_\odot$. Sedangkan nilai ketidakpastian untuk L_* diperoleh dari perambatan galat persamaan luminositas tersebut.

Tabel 2. Parameter data spektroskopi dari spektrum Pollux.

No	Parameter	Nilai
1	Wavelength (λ)	(377,2 – 789,997) nm
2	Resolving power ($R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$)	190.000
3	SNR	408,4
4	Aperture	0,5"
5	Exposure time	12 s



Gambar 2. Jejak evolusi Pollux dari deret utama hingga berakhirnya tahap raksasa berdasarkan nilai massa awal (garis hitam) dan tahap evolusi Pollux saat ini (titik merah).

Penentuan Massa Awal

Penentuan massa awal Pollux dilakukan dengan cara memodelkan jejak evolusi bintang dengan berbagai massa

dan metalisitas tetap. Dalam pekerjaan ini, pemodelan jejak evolusi bintang dilakukan dengan menggunakan *online tool* EZ-Web berbasis *user interface* yang tersedia pada

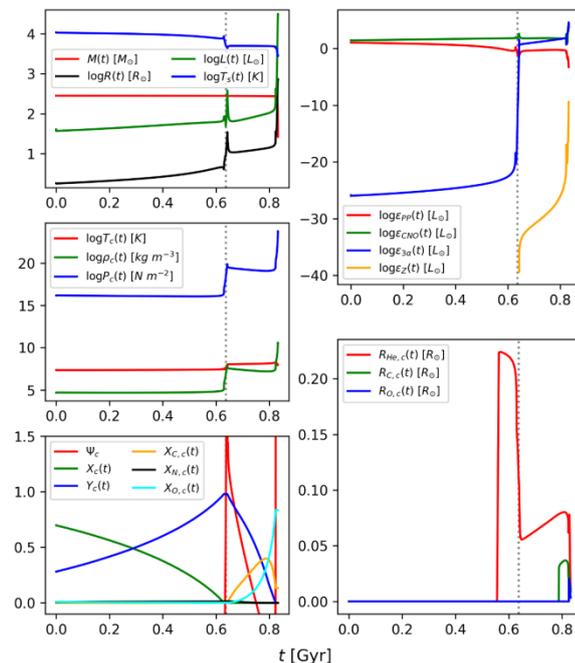
<http://www.astro.wisc.edu/~townsend/static.php?ref=eZ-web>. Untuk mendapatkan model jejak evolusi bintang diperlukan dua masukan, yaitu massa awal dan metalisitas. Tabel 3 berikut menunjukkan nilai massa dan metalisitas yang digunakan dalam penentuan massa awal dan jejak evolusi Pollux.

Penentuan massa awal dilakukan dengan mencocokkan nilai luminositas dan temperatur Pollux saat ini dengan model jejak evolusi bintang yang dihasilkan dari EZ-Web berdasarkan nilai input yang

tercantum pada Tabel 3 (lihat Gambar 2). Berdasarkan metode tersebut, didapatkan nilai massa awal Pollux sebesar $M_{init} = (2,30 \pm 0,15) M_{\odot}$. Nilai ketidakpastian dari massa awal diperoleh dari standar deviasi ketiga model jejak evolusi bintang yang memiliki luminositas di dalam rentang luminositas Pollux pada tahap Raksasa Merah. Nilai M_{init} ini selanjutnya akan digunakan untuk menganalisis jejak evolusi dan struktur interior Pollux.

Tabel 3. Data massa dan metalisitas dalam menentukan model jejak evolusi Pollux.

No	Percobaan	Massa (M_{*})	Metalisitas (Z)
1	1	1,85	-0,07
2	2	2,0	-0,07
3	3	2,15	-0,07
4	4	2,30	-0,07
5	5	2,45	-0,07



Gambar 3. Perubahan parameter nilai massa (M), radius (R), luminositas (L), temperatur efektif (T_s), temperatur pusat (T_c), kerapatan pusat (ρ_c), tekanan pusat (P_c), kelimpahan di pusat, radius inti (R_c), dan kerapatan energi (ϵ) Pollux sebagai fungsi waktu t . Keadaan struktur interior Pollux pada usia saat ini (~650 juta tahun) ditunjukkan oleh garis hitam putus-putus.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi jejak evolusi bintang Pollux menunjukkan bahwa bintang ini memulai tahap Deret Utama sekitar 650 juta tahun yang lalu, dengan massa awal sebesar $M_{init} = (2,30 \pm 0,15) M_{\odot}$, radius awal sebesar $R_{init} = (1,69^{+0,11}_{-0,05}) R_{\odot}$, dan temperatur efektif awal sebesar $T_{init} = (9978,93^{+848,93}_{-414,67}) K$. Pada tahap evolusi ini, bagian inti bintang Pollux didominasi oleh Hidrogen (~70%) dan Helium (~30%) dengan temperatur inti $\sim 10^{7,5} K$ (lihat Gambar 3). Kondisi ini sangat layak untuk memulai proses fusi termonuklir (pembentukan Hidrogen menjadi Helium). Pada saat itu, tekanan di inti Pollux mencapai $\sim 10^{16} Nm^{-2}$ dan kerapatan inti $\sim 10^5 kg/m^3$. Kondisi ini setara dengan tekanan $\sim 10^{10} atm$ dan kerapatan rata-rata 20 kali kerapatan rata-rata Bumi.

Berdasarkan pemodelan jejak evolusi Pollux seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, bintang ini diperkirakan baru mencapai tahap awal Raksasa Merah. Dalam kurun waktu sekitar 650 juta tahun sejak Pollux berada di tahap Deret Utama hingga mencapai tahap awal Raksasa Merah, bintang ini telah mengalami perubahan struktur interior dan selubung. Pada bagian inti, proses fusi termonuklir (pembentukan Hidrogen menjadi Helium) mengakibatkan dominasi Hidrogen semakin berkurang, sedangkan dominasi Helium semakin meningkat (lihat Gambar 3). Proses ini menyebabkan temperatur di inti Pollux menurun secara perlahan sejak di tahap Deret Utama (bersesuaian dengan pekerjaan Smiljanic dkk. 2006). Pollux terkonfirmasi sebagai bintang bermassa menengah (Hatzes, dkk. 2012), sehingga kerapatan energi hasil pembakaran hidrogen didominasi oleh reaksi siklus CNO (lihat Gambar 3).

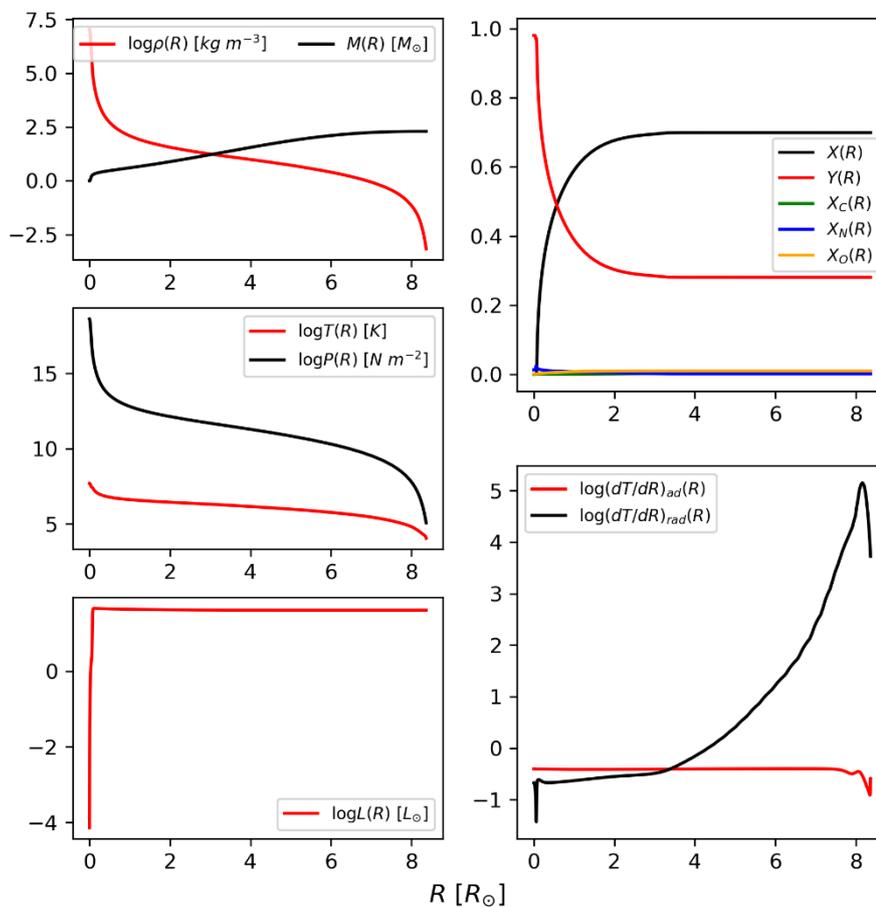
Saat ini (di tahap awal Raksasa Merah), inti Pollux berukuran $\sim 0,2$ radius Matahari dan hanya didominasi oleh

Helium saja. Karena tidak adanya Hidrogen di inti, reaksi fusi menjadi terhenti di inti Pollux (lihat Gambar 3). Dalam kondisi seperti ini, Pollux berada di tahap Sub-Raksasa, pada rentang temperatur efektif antara $\sim 6300 K$ hingga $\sim 7900 K$ jika mengacu pada Gambar 2. Dengan tidak adanya reaksi fusi di inti, tekanan gravitasi menjadi dominan dan terus menekan inti Helium Pollux. Kejadian ini memicu inti Helium untuk menghasilkan tekanan termal dan memberikan sedikit peningkatan pada temperatur inti, hanya dalam orde $\sim 10^2 K$ lebih tinggi dari temperatur awalnya. Dengan kerapatan inti yang mencapai 300 kali lipat kerapatan inti saat di Deret Utama dan tekanan inti menjadi $\sim 10^4$ kali lipat tekanan inti di Deret Utama, ini sudah sangat cukup untuk memicu pengembangan selubung bintang Pollux mencapai lebih dari ~ 10 kali radiusnya di Deret Utama. Proses ini juga diiringi oleh peningkatan luminositas Pollux mencapai ~ 10 kali luminositas saat di Deret Utama. Pada tahap ini, Pollux telah mencapai tahap awal dari Raksasa Merah. Hasil simulasi menunjukkan bahwa proses evolusi dari tahap Sub-Raksasa ke tahap awal Raksasa Merah berlangsung dalam kurun waktu yang cukup singkat, yaitu kurang dari ~ 200 juta tahun. Pada tahap Raksasa Merah, bintang sudah mengalami kehilangan massa akibat angin bintang sehingga massanya menurun seiring bertambahnya usia. Jika dibandingkan dengan massa Pollux pada tahap evolusi Deret Utama, Pollux pada tahap awal Raksasa Merah telah mengalami pengurangan massa sebesar $M = 0,00252 M_{\odot}$. Nilai ini setara dengan laju kehilangan massa $\sim 3,54 \times 10^{-9} M_{\odot}/tahun$, dengan asumsi bahwa laju kehilangan massa pada bintang Pollux bersifat konstan terhadap waktu. Menurut Bowen & Willson (1991) dan Willson (2000), besarnya angin bintang bergantung pada metalisitas. Penurunan massa paling

besar akibat angin bintang tampak terlihat pada akhir tahap Raksasa Merah.

Analisis pada jejak evolusi Pollux menunjukkan bahwa tahap akhir dari Raksasa Merah Pollux diperkirakan terjadi pada 200 juta tahun ke depan. Pada tahap itu, luminositas bintang ini diperkirakan dapat mencapai $\sim 10^3$ kali luminositasnya saat di tahap awal Raksasa Merah dan temperaturnya telah menurun $\sim 10^{0,5} K$ lebih rendah dari temperaturnya di tahap awal Raksasa Merah. Proses

pengembangan selubung bintang Pollux akan semakin membesar ketika inti Helium runtuh dan memulai fusi termonuklir (pembentukan Helium menjadi Karbon). Temperatur inti yang dihasilkan pada fusi termonuklir jenis ini mampu mencapai orde $\sim 10^5 K$ lebih tinggi daripada temperatur inti Pollux pada tahap awal Raksasa Merah. Bahkan pada tahap akhir dari Raksasa Merah, radius bintang Pollux diperkirakan akan mencapai ~ 10 kali radiusnya di tahap awal Raksasa Merah.



Gambar 4. Perubahan parameter nilai massa (M), kerapatan (ρ), temperatur (T), tekanan (P), energi (L), kelimpahan, gradien temperatur adiabatik ($(dT/dR)_{ad}$) dan gradien temperatur radiatif ($(dT/dR)_{rad}$) Pollux sebagai fungsi radius R pada tahap evolusi saat ini.

Kerapatan tertinggi di Pollux terdapat di bagian intinya, yaitu mencapai $\sim 10^{10}$ kali kerapatan di permukaannya (lihat Gambar 4). Nilai ini bersesuaian dengan peningkatan massa Pollux dari inti ke arah selubung, yaitu dengan gradien

$\sim 0,3125 M_{\odot}$ per R_{\odot} . Sedangkan untuk temperatur, Pollux memiliki temperatur inti ~ 1000 kali temperatur di permukaannya, dengan gradien $\sim 125 K$ per R_{\odot} . Di sekitar inti Pollux (radius $\lesssim 0,5 R_{\odot}$), penurunan tekanan tampak signifikan, dengan gradien

$\sim 20 \times 10^6 \text{ Nm}^{-2} \text{ per } R_{\odot}$. Kondisi ini diakibatkan oleh inti Helium Pollux yang belum mengalami pembakaran fusi termonuklir, sehingga tekanan di inti menurun drastis jika dibandingkan dengan lapisan di atasnya. Pada radius $\geq 0,5 R_{\odot}$ hingga $\sim 7 R_{\odot}$, gradien tekanan sedikit lebih landai, yaitu $\sim 4,8 \times 10^4 \text{ Nm}^{-2} \text{ per } R_{\odot}$. Pada rentang radius ini, selubung Hidrogen Pollux mengalami pembakaran akibat tekanan termal dari inti Helium, sehingga perubahan tekanan di sepanjang rentang radius ini tidak terlalu besar. Kondisi ini kemungkinan besar dapat terjadi jika transfer energi bersifat radiatif. Kemudian tekanan Pollux kembali mengalami penurunan drastis, dengan gradien $\sim 2 \times 10^5 \text{ Nm}^{-2} \text{ per } R_{\odot}$ pada radius $\geq 7 R_{\odot}$ akibat dari semakin sedikitnya Hidrogen di bagian selubung yang mengalami pembakaran. Perilaku tekanan di interior Pollux ini bersesuaian dengan perubahan energinya ($\log L(R)$) dari pusat ke selubung luar Pollux (lihat Gambar 4). Berdasarkan kriteria Schwarzschild, konveksi akan terjadi ketika gradien radiatif $((dT/dR)_{rad}) >$ gradien adiabatik $((dT/dR)_{ad})$ (lihat Cantiello & Braithwaite, 2019). Pada Pollux, perbandingan kedua gradien mencapai $\sim 10^5$ (lihat Gambar 4), nilai ini menunjukkan bahwa Pollux cenderung memiliki inti radiatif Helium yang diselubungi oleh zona konvektif, seperti yang diusulkan oleh Hekker & Christensen-Dalsgaard (2017), yaitu pada saat fase pembakaran selubung hidrogen, bintang bermassa menengah membentuk daerah konveksi di bagian luar untuk menghantarkan energi dan mencegah bintang mendingin di sekitar garis Hayashi.

PENUTUP

Hasil studi numerik yang telah kami lakukan menunjukkan bahwa saat ini Pollux berada di tahap Raksasa Merah dengan usia ~ 650 juta tahun. Bintang ini mulai kehabisan Hidrogen di intinya pada ~ 200 juta tahun yang lalu saat memasuki tahap Sub-Raksasa. Pada usia ~ 850 juta tahun, Pollux diperkirakan akan meninggalkan

tahap Raksasa Merah dan memasuki kondisi evolusi yang jauh lebih dinamis.

Secara umum, struktur interior Pollux pada saat ini dapat disimpulkan terdiri dari zona radiatif di inti Heliumnya yang beradius $\sim 0,2 R_{\odot}$ dan zona konvektif pada bagian luar inti. Tekanan di inti Pollux mencapai $\sim 10^{16} \text{ Nm}^{-2}$ dan kerapatan inti $\sim 10^5 \text{ kg/m}^{-3}$. Keduanya memicu nilai temperatur di interior Pollux yang buah relatif terhadap radius, dengan gradien temperatur sebesar $\sim 125 \text{ K per } R_{\odot}$. Di permukaan, Pollux memiliki temperatur efektif $T_* = (5051,8 \pm 11,3) \text{ K}$, yang diperoleh dari *fitting* spektrum.

Sajian analisis terkait struktur interior dan jejak evolusi Pollux dalam pekerjaan ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang baik mengenai proses evolusi yang terjadi pada bintang-bintang yang serupa dengan Pollux, salah satunya adalah Matahari kita. Pollux juga diketahui memiliki setidaknya satu planet (Hatzes & Cochran 1993, Hatzes dkk. 2006, Reffert dkk. 2006). Hal ini menarik untuk dianalisis lebih lanjut untuk memahami bagaimana proses dinamik yang terjadi di Tata Surya saat Matahari mencapai tahap Raksasa Merah.

DAFTAR PUSTAKA

- Auriere, M. dkk. 2009. *Discovery of a Weak Magnetic Field in the Photosphere of the Single Giant Pollux*. *Astronomy & Astrophysics*, 504, 231 - 237.
- Baldini, V. dkk. 2014. *ESPRESSO instrument control electronics: a PLC based distributed layout for a second generation instrument at ESO VLT*. DOI: <https://doi.org/10.1117/12.2054896>.
- Bland-Hawthorn, J. & Gerhard, O. 2016. *The Galaxy in Context: Structural, Kinematic, and Integrated Properties*. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 54, 529 - 596.
- Bowen, G. H. & Willson, L. A. 1991. *From Wind to Superwind: The Evolution*

- of Mass-Loss Rate for Mira Models.* The Astrophysical Journal, 375, L53 - L56.
- Cantiello, M. & Braithwaite, J. 2019. *Envelope Convection, Surface Magnetism and Spots in A and Late B-Type Stars.* The Astrophysical Journal, 883, 13pp.
- Darma, R. & Arifyanto, M. I. 2019. *Evolusi Dinamik Sun's Birth Cluster dan Pencarian Solar Siblings di Bimasakti.* Jurnal Fisika dan Terapannya, 4, DOI: <https://doi.org/10.17509/wafi.v4i1.15706>.
- Darma, R. dkk. 2019. *The Implementation of Markov Chain Monte Carlo on the Study of Star Cluster Membership in Open Cluster NGC 3766 and Globular Cluster 6366.* Journal of Multidisciplinary Academic, 3, 5 – 11
- Hatzes, A. P. dkk. 2006. *Confirmation of the Planet Hypothesis for the Long-Period Radial Velocity Variations of β Geminorum.* Astronomy & Astrophysics, 457, 335 - 341.
- Hatzes, A. P. dkk. 2012. *The Mass of the Planet-hosting Giant Star β Geminorum Determined from its p -mode Oscillation Spectrum.* Astronomy & Astrophysics, 543, 9pp.
- Hatzes, A. P. & Cochran, W. D. 1993. *Long-Period Radial Velocity Variations in Three K Giants.* The Astrophysical Journal, 413, 339 - 348.
- Hekker, S. & Christensen-Dalsgaard, J. 2017. *Giant Star Seismology.* The Astronomy & Astrophysics Review, 25, 122pp.
- Pepe, F. dkk. 2021. *ESPRESSO at VLT. On Sky Performance and First Results.* Astronomy & Astrophysics, 645, A96.
- Reffert, S. dkk. 2006. *Precise Radial Velocities of Giant Stars. II. Pollux and its Planetary Companion.* The Astrophysical Journal, 652, 661.
- Smiljanic, R., Barbuy, B., De Medeiros, J. R., & Meder, A. 2006. *CNO in Evolved Intermediate Mass Stars.* Astronomy & Astrophysics, 449, 655 - 671.
- Willson, L. A. 2000. *Mass Loss from Cool Stars: Impact on the Evolution of Stars and Stellar Populations.* Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 38, 573 - 611.
- Winn, J. N. & Fabrycky, D. C. 2015. *The Occurrence and Architecture of Exoplanetary Systems.* Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 53, 409 - 447.
- Woosley, S. E. & Bloom, J. S. 2006. *The Supernova Gamma-Ray Burst Connection.* Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 44, 507 - 556.
- Wyithe, J. S. B. & Chen, R. 2007. *The Extended Star Formation History of the First Generation of Star and The Reionization of Cosmic Hydrogen.* The Astrophysical Journal, 659, 890 – 907.