

## MODEL STRUKTUR INTERIOR $\beta$ CENTAURI A (INTERIOR STRUCTURE MODEL OF $\beta$ CENTAURI A)

Ni Putu AuditaPlacida Emas<sup>1</sup>, Muhammad Bayu Saputra<sup>1</sup>, Hakim Luthfi Malasan<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Pascasarjana Program Studi Astronomi, FMIPA, Institut Teknologi Bandung

<sup>2</sup> Program Studi Astronomi, FMIPA, Institut Teknologi Bandung

e-mail: [audita.nimas@students.itb.ac.id](mailto:audita.nimas@students.itb.ac.id)

### ABSTRAK

#### Riwayat Artikel:

Diterima:

16 November 2017

Direvisi:

24 Agustus 2018

Disetujui:

28 September 2018

Diterbitkan:

19 Nopember 2018

#### Kata kunci:

Struktur bintang,  
bintang ganda,  
WTTS, TWIN.

$\beta$  Centauri merupakan sistem tiga bintang yang berada di rasi Centaurus.  $\beta$  Centauri terdiri dari  $\beta$  Centauri A dan B dengan  $\beta$  Centauri A adalah sistem bintang ganda (Aa dan Ab) dengan periode orbit yang panjang (~356 hari) dan eksentrik. Penelitian ini bertujuan untuk menelaah struktur sistem ganda  $\beta$  Centauri A pada umur 14,1 juta tahun dan mengasumsikan tidak ada interaksi antara kedua bintang ketika di periastron. Pemodelan struktur  $\beta$  Centauri A menggunakan *Window To The Stars* (WTTS) yang merupakan *user interface* dari kode TWIN untuk memodelkan evolusi bintang. Hasil pengolahan data menggunakan WTTS berupa jejak evolusi bintang dan diekstrak berdasarkan umur sistem  $\beta$  Centauri. Parameter masukan yang digunakan adalah massa, metalisitas, rasio *mixing length*, dan *spin* kedua bintang. Dari hasil komputasi diperoleh bahwa bintang  $\beta$  Centauri Aa dan Ab memiliki struktur internal yang hampir sama dengan masih melakukan pembakaran nuklir hidrogen menjadi helium di pusatnya melalui siklus CNO. Pembakaran nuklir juga dapat dilihat dari produksi neutrino pada radius  $0 - 1,5 R_{\odot}$ . Daerah konveksi dapat ditemukan di radius  $0 - 1,0 R_{\odot}$  dan di dekat permukaan. Penelitian lanjutan dapat meninjau kemungkinan interaksi saat kedua bintang di periastron dan adanya pengaruh dari bintang ketiga dalam dinamika sistemnya.

### ABSTRACT

#### Keywords:

Stellar structure,  
binary star, WTTS,  
TWIN.

$\beta$  Centauri is triple star system located in Centaurus constellation.  $\beta$  Centauri consists of  $\beta$  Centauri A and B where  $\beta$  Centauri A is binary system (Aa and Ab) with long orbital period (~356 days) and eccentric orbit. This study aims to examine stellar structure of  $\beta$  Centauri A at the age of 14.1 million years and assumes no interaction between both stars at periastron. The structure modelling of  $\beta$  Centauri A is done by using *Window to the Stars* (WTTS) which is the user interface of the TWIN code. The result is stellar evolutionary track and extracted based on the age of  $\beta$  Centauri system. The input parameters used are stellar mass, metallicity, mixing length ratio, and spin of two stars. From the results, it is found that structure of  $\beta$  Centauri Aa and Ab are

almost same and still doing nuclear reaction to change hydrogen to helium at its center by CNO cycle and can be seen from production of neutrinos at  $0 - 1.5 R_{\odot}$ . Convection region can be found at  $0 - 1.0 R_{\odot}$  and near surface. The future research can consider possibility of interaction between both stars at periastron and influence of third star in dynamical of the system.

## 1. PENDAHULUAN

Bintang  $\beta$ Centauri A ( $\beta$ Cen A) merupakan sistem bintang ganda yang berada di rasi Centaurus.  $\beta$ Cen A memiliki pasangan yaitu  $\beta$ Cen B yang membuat sistem tersebut menjadi sistem tiga bintang.  $\beta$ Cen terletak pada koordinat  $14^{\text{h}} 03^{\text{m}} 49,40^{\text{s}} / -60^{\circ} 22' 22,93''$  (J2000) (van Leeuwen, 2007). Magnitudo semu  $\beta$ Cen pada filter V adalah 0,6 dan pada filter B adalah 0,3. Kelas spektrum dan kelas luminositas kedua komponen  $\beta$ Cen A adalah B3III. Selain bintang ganda,  $\beta$ Cen A termasuk jenis bintang variabel Cepheid.

Massa kedua bintang diketahui memiliki rasio 0,88 yang diketahui dari pengamatan spektroskopi di mana massa bintang  $\beta$ CenAa (bintang primer pada sistem  $\beta$ Cen A) adalah  $12,02 \pm 0,13 M_{\odot}$  dan massa  $\beta$ CenAb (bintang sekunder pada sistem  $\beta$ Cen A) adalah  $10,58 \pm 0,18 M_{\odot}$  (Pigulski, *etal.*, 2016). Temperatur kedua bintang diketahui sekitar 25000 K yang ditinjau dari pengamatan spektroskopi dan fotometri dengan  $\log g$  adalah 3,5. Kelimpahan molekul berat diketahui sedikit dengan nilai  $Z$  0,01. Sistem ini diperkirakan memiliki usia  $(14,1 \pm 0,6) \times 10^6$  tahun (Ausseloos *et al.*, 2006).

Penelitian mengenai  $\beta$ Cen A jika dirunut dari tahun 1999 hingga 2016, hanya membahas tentang parameter orbit dari  $\beta$ Cen A yang dilakukan dari analisis spektroskopi dan fotometri. Analisis mengenai struktur interior dari bintang ini tidak dibahas secara rinci di masing-masing publikasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui struktur interior dari  $\beta$ CenAa dan CenAb dalam suatu sistem bintang ganda. Penelitian ini menggunakan perangkat *Window To The Stars* (WTTS) didalamnya terdapat kode evolusi bintang TWIN yang memudahkan pengguna dalam melakukan simulasi evolusi bintang. Perangkat ini akan menyajikan urutan evolusi bintang dari

*Zero Age Main Sequence* (ZAMS) hingga *core collapse*. Untuk pemodelan struktur interiornya, digunakan data yang bersesuaian dengan usia bintang yang dikehendaki.

Dalam memahami struktur  $\beta$ Cen A, perlu diperhatikan bahwa  $\beta$ Cen A merupakan bintang ganda eksentrik. Pada posisi periastron, bisa jadi posisi kedua bintang menjadi sangat dekat sehingga keberadaan bintang satu dapat mempengaruhi bintang lain. Pada penelitian ini dilakukan pengecekan terlebih dahulu dengan menggunakan aplikasi *Binary Maker* untuk memastikan tidak ada interaksi saat di periastron. Hasilnya menunjukkan bahwa kedua bintang tidak memiliki interaksi sehingga simulasi dapat dilakukan secara terpisah.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

Struktur dalam bintang secara umum direpresentasikan oleh empat persamaan struktur bintang dalam bentuk Lagrangian, yaitu:

a. Persamaan kontinuitas massa:

$$\frac{dr}{dm} = \frac{1}{4\pi r^2 \rho} \dots\dots\dots(2-1)$$

b. Persamaan kesetimbangan hidrostatis:

$$\frac{dP}{dm} = -\frac{Gm}{4\pi r^4} \dots\dots\dots(2-2)$$

c. Persamaan kekekalan energi:

$$\frac{dL}{dm} = \epsilon \dots\dots\dots(2-3)$$

d. Persamaan transpor energi:

$$\frac{dT}{dm} = -\frac{3\kappa_R L}{64\pi^2 r^4 a c T^3} \dots\dots\dots(2-4)$$

Sehingga dalam menentukan struktur interior bintang dibutuhkan pemecahan dari empat persamaan tersebut secara simultan. Dari evolusi bintang yang dimodelkan oleh TWIN, diperoleh profil

massa ( $M$ ), kerapatan ( $\rho$ ), temperatur ( $T$ ), tekanan ( $P$ ), luminositas ( $L$ ), fraksi massa dari beberapa elemen, dan selisih gradien radiasi dan adiabatik ( $\nabla_{rad} - \nabla_{ad}$ ) terhadap radius ( $R$ ) pada bintang yang ditinjau. Berikut penjabaran dari profil-profil yang telah diperoleh tersebut dari pemodelan dengan menggunakan TWIN.

### 3. DATA DAN METODE

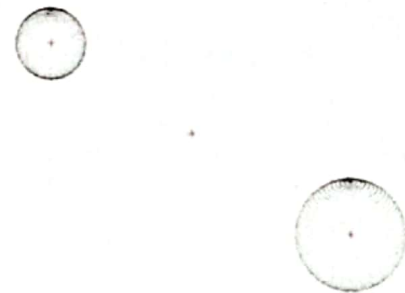
Struktur interior komponen sistem bintang ganda  $\beta$  Cen A (Aa dan Ab) dilakukan dengan menggunakan Perangkat WTTS (*Window To The Stars*) (Izzard & Glebbeek, 2006) yang merupakan *graphical user interface* dari kode evolusi bintang TWIN yang dikembangkan oleh Peter P. Eggleton (lihat [http://www.astro.ru.nl/~sluys/Binaries/ev/ev\\_usermanual\\_a4.pdf](http://www.astro.ru.nl/~sluys/Binaries/ev/ev_usermanual_a4.pdf)). Dalam proses pemodelan struktur interior bintang, WTTS menggunakan *grid* massa dan metalisitas untuk bintang primer dan sekunder, sehingga pada penggunaannya dipilih parameter masukan dengan parameter massa dan metalisitas yang paling mendekati parameter fisis yang telah diperoleh dari literatur seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3-1.

Tabel 3-1 Parameter fisis dan parameter orbit dari sistem  $\beta$  Cen A

Parameter	$\beta$ CenAa	$\beta$ CenAb	Referensi
Massa ( $M_{\odot}$ )	12.02 $\pm 0.13$	10.58 $\pm 0.18$	Pigulskietal. (2016)
Temperatur efektif (K)	25000	25000	Pigulskietal. (2016)
Percepatan gravitasi permukaan ( $\log g$ , cgs)	3.45 $\pm$ 0.07	3.45 $\pm$ 0.07	Rata-rata dari Aussele et al. (2006)
Komposisi kimia (X, Y, Z)	X = 0.738856 Y = 0.249728 Z = 0.011416		Asplund et al. (2004)
Magnitudo absolut visual	-4.03 $\pm$ 0.10	-3.88 $\pm$ 0.10	Pigulskietal. (2016)
Periode (hari)	356.915 $\pm$ 0.015		Pigulskietal. (2016)
Eksentrisitas	0.8245 $\pm$ 0.006		Pigulskietal. (2016)
Inklinasi ( $^{\circ}$ )	67.68 $\pm$ 0.12		Pigulskietal. (2016)

Dalam memahami struktur  $\beta$ Cen A, perlu diperhatikan bahwa  $\beta$ Cen A merupakan bintang ganda eksentrik. Pada

posisi di periastron bisa jadi posisi kedua bintang menjadi sangat dekat sehingga keberadaan bintang satu dapat mempengaruhi bintang lain. Pada penelitian ini dilakukan pengecekan terlebih dahulu dengan menggunakan aplikasi *Binary Maker* untuk memastikan tidak ada interaksi saat di periastron. Hasilnya menunjukkan bahwa kedua bintang tidak memiliki interaksi sehingga simulasi dapat dilakukan secara terpisah seperti pada Gambar 3-1.



Gambar 3-1. Konfigurasi  $\beta$  Cen Aa dan Ab ketika di periastron

Parameter masukan yang diperlukan untuk menjalankan program di WTTS adalah nilai  $Z$ , massa bintang, rasio *mixinglength*, dan parameter orbit untuk kasus bintang ganda. Dalam pemodelan struktur interior  $\beta$  Cen A ini, perhitungan struktur interior bintang dilakukan secara terpisah antara bintang  $\beta$  CenAa dan Ab. Hal ini dapat dilakukan mengingat kedua bintang berada dalam sistem *detached binary*. Jika dilakukan perhitungan secara terpisah, maka parameter orbit tidak perlu dimasukkan dengan mengasumsikan parameter orbitnya memiliki jarak yang sangat besar agar dapat diperhitungkan sebagai bintang tunggal. Dalam memecahkan struktur dan evolusi bintang dengan menggunakan WTTS, maka ada 11 persamaan yang dipecahkan yaitu empat persamaan struktur bintang, lima persamaan perubahan komposisi bintang dan dua persamaan yang mengakomodasi posisi *meshpoint* bintang. Parameter yang digunakan sebagai masukan untuk memodelkan struktur interior sistem  $\beta$  Cen A ditunjukkan oleh Tabel 3-2.

Tabel 3-2 Parameter masukan yang digunakan dalam WTTS

Parameter	$\beta$ CenAa		$\beta$ CenAb	
	Masukan	Nilai dari literatur	Masukan	Nilai dari literatur
Massa ( $M_{\odot}$ )	11.885	$12.02 \pm 0.13$	10.592	$10.58 \pm 0.18$
Z	0.01	$0.0114_{16}$	0.01	$0.0114_{16}$
Rasio <i>mixing length</i>	1.5	-	1.5	-

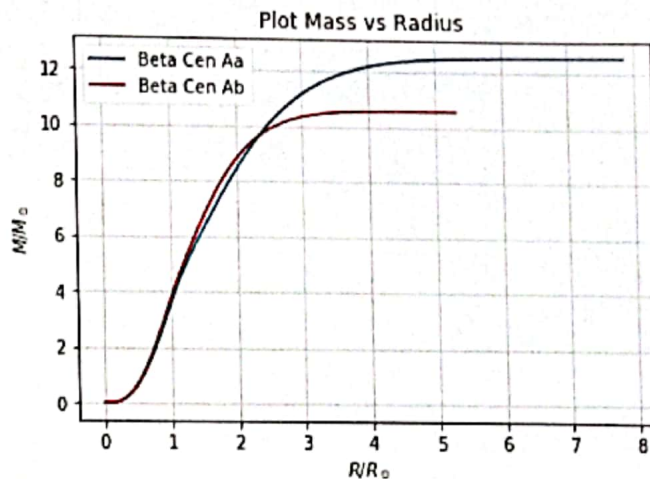
Penggunaan parameter massa yang tidak sesuai dengan massa yang ditulis adalah penyajian dalam WTTS hanya menyediakan massa dalam bentuk *grid* massa dengan nilai-nilai tertentu. Pemilihan *grid* massa yang digunakan berdasarkan pada rentang ketidakpastian yang diizinkan, sehingga dipilih nilai massa sesuai dengan yang disajikan pada Tabel 3-1. Untuk pemilihan rasio *mixing length*, dilakukan sesuai dengan hasil nilai yang diizinkan untuk bintang dengan  $\log g = 3,5$  pada (Trampedach & Stein, 2011). Pendekatan ini dilakukan karena belum ada satu pun publikasi yang menyajikan nilai tersebut untuk sistem  $\beta$  Cen A.

Setelah parameter-parameter tersebut dimasukkan, WTTS akan melakukan perhitungan struktur interior dengan mengevolusikan bintang program mulai dari tahap *zero age main sequence* (ZAMS) hingga *corecollapse*. Dari hasil perhitungan evolusi tersebut, data struktur interior bintang akan diekstrak dari model yang perhitungan usianya bersesuaian dengan usia bintang  $\beta$  Cen A saat ini, yaitu  $(14,1 \pm 0,6) \times 10^6$  tahun.

#### 4. PEMBAHASAN

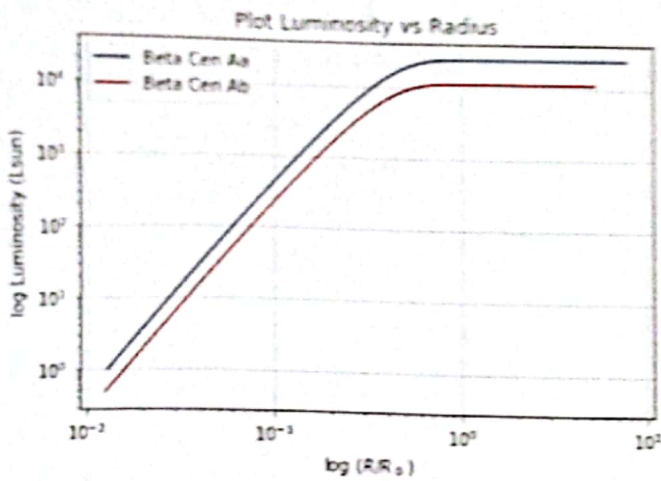
Hasil yang diperoleh untuk bintang  $\beta$  Cen Aa dan Ab hampir sama. Berkaitan dengan massa bintang terhadap radius menunjukkan bahwa massa bertambah sesuai dengan pertambahan radius. Hal ini karena pertambahan radius mengimplikasikan pertambahan volume yang dicakup sehingga massa bertambah besar. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4-1. Plot yang datar pada Gambar 4-1 menunjukkan tidak ada pertambahan massa yang berarti radius bintang hanya sampai

pada batas tersebut. untuk  $\beta$  Cen Aa batas radius sampai pada sekitar  $5 R_{\odot}$  dan bintang  $\beta$  Cen Ab radius sampai pada sekitar  $3 R_{\odot}$ .

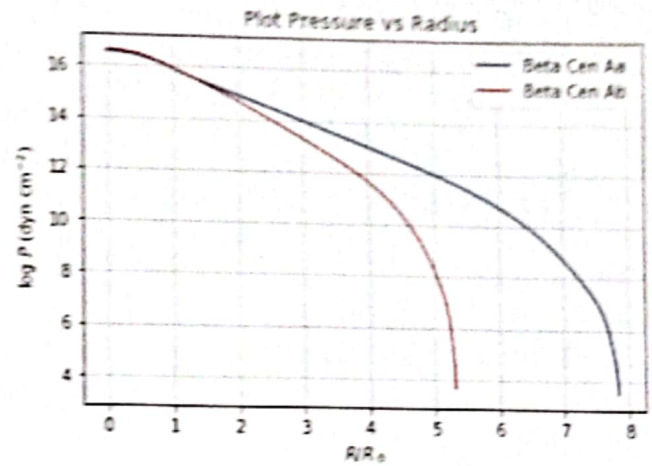


Gambar 4-1. Distribusi massa terhadap radius pada  $\beta$  Cen Aa dan Ab.

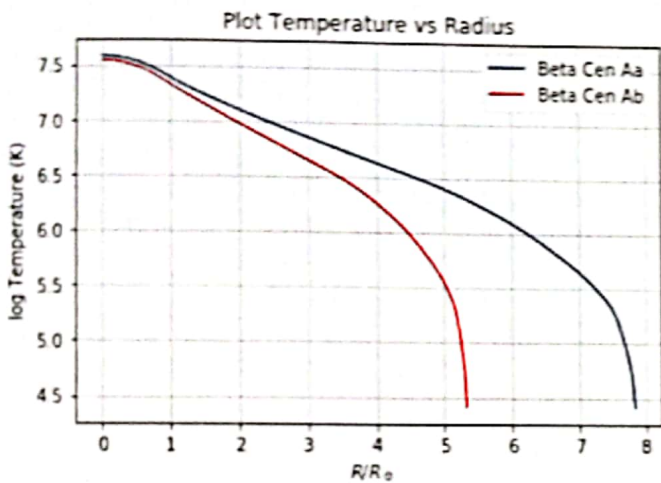
Hubungan radius dan luminositas juga menunjukkan hal yang sama, yaitu semakin besar radius maka semakin besar luminositas yang ditunjukkan pada Gambar 4-2. Hal ini dikarenakan adanya ketergantungan luminositas terhadap radius ( $L \sim R^2$ ) dan temperatur ( $L \sim T^4$ ). Pada radius yang kecil, temperatur akan tinggi karena lebih dekat dengan pusat sebagai tempat memproduksi energi. Pada radius yang besar, luminositas dipengaruhi oleh radius yang besar, sehingga tetap bertambah walaupun temperaturnya turun. Hubungan temperatur terhadap radius ditunjukkan oleh Gambar 4-3, semakin besar radius maka temperatur semakin turun. Hal ini karena semakin jauh dengan pusat bintang. selain itu, hal ini menunjukkan tidak adanya pembangkitan energi lain selain di pusat bintang.



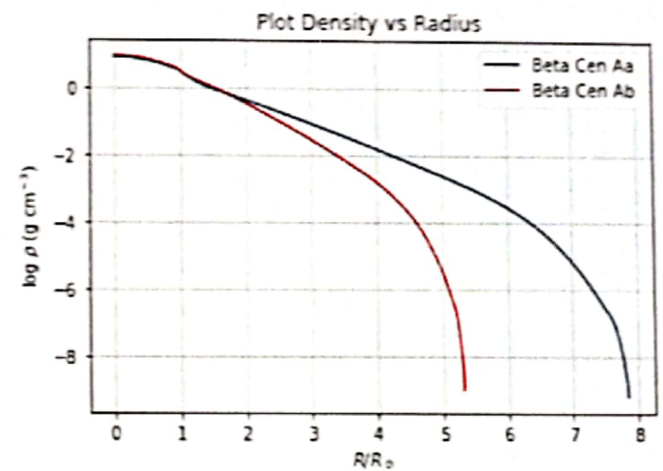
Gambar 4-2. Distribusi luminositas terhadap radius pada  $\beta$  Cen Aa dan Ab.



Gambar 4-4. Distribusi tekanan terhadap radius pada  $\beta$  Cen Aa dan Ab.



Gambar 4-3. Distribusi luminositas terhadap radius pada  $\beta$  Cen Aa dan Ab.

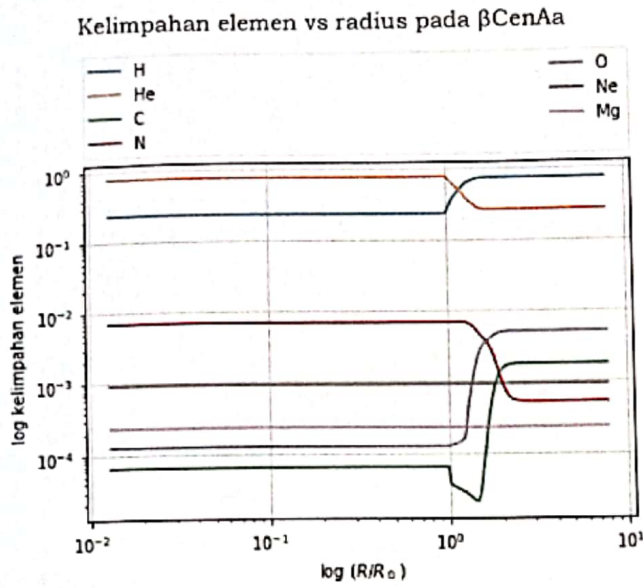


Gambar 4-5. Distribusi kerapatan terhadap radius pada  $\beta$  Cen Aa dan Ab.

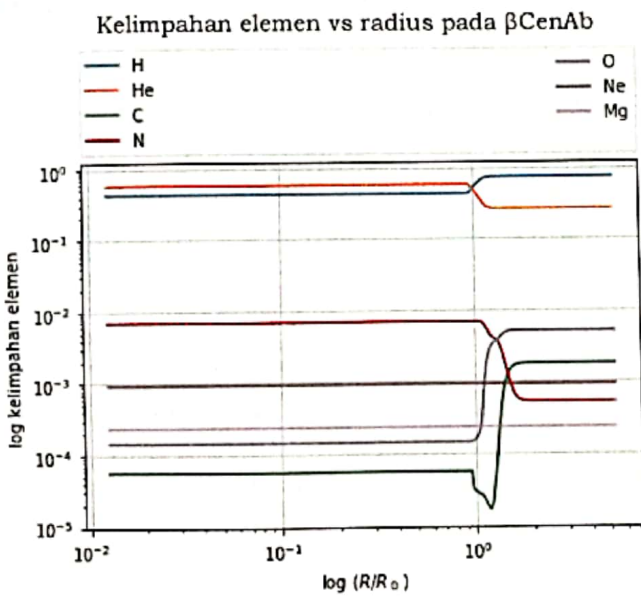
Profil tekanan (Gambar 4-4) dan kerapatan (Gambar 4-5) menunjukkan profil yang sama dengan temperatur, semakin besar temperatur maka semakin kecil tekanan dan kerapatannya. Untuk profil tekanan, pada radius yang besar, materi yang menekan dari lapisan atasnya semakin sedikit sehingga tekanan semakin kecil. Kerapatan yang semakin kecil dengan pertambahan radius menunjukkan bahwa semakin ke arah permukaan bintang materi di dalam bintang didominasi oleh gas-gas yang renggang.

Profil kelimpahan terhadap radius ditunjukkan pada Gambar 4-6 untuk  $\beta$  CenAa dan Gambar 4-7 untuk  $\beta$  CenAb. Pada daerah pusat, yaitu sekitar  $1 R_{\odot}$ , terlihat adanya perubahan komposisi. Hal ini disebabkan karena adanya reaksi nuklir yang membangkitkan energi di daerah pusat. Perubahan komposisi terjadi dengan membandingkan unsur di daerah kurang dari  $1 R_{\odot}$  dan setelah radius  $1 R_{\odot}$ , dengan asumsi setelah  $1 R_{\odot}$  dianggap belum mengalami reaksi nuklir sehingga dapat dikatakan unsur-unsur pada daerah tersebut merupakan unsur awal bintang sebelum reaksi nuklir. Unsur-unsur yang mengalami reaksi nuklir adalah H, He, C, N dan O. Hidrogen dan helium jelas mengalami perubahan karena pada bintang deret utama, penghasil energi utamanya adalah dengan mengubah hidrogen menjadi helium. Keterlibatan C, N, dan O menandakan bahwa terdapat siklus CNO (Gambar 4-8) dalam reaksi hidrogen menjadi helium. Untuk unsur neon dan

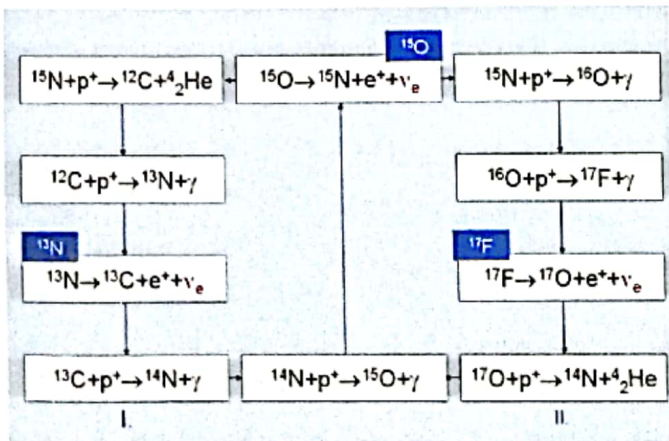
magnesium tidak terjadi perubahan karena temperatur inti belum cukup untuk membakar neon dan magnesium.



Gambar 4-6. Distribusi kelimpahan elemen terhadap radius pada  $\beta$  Cen Aa.

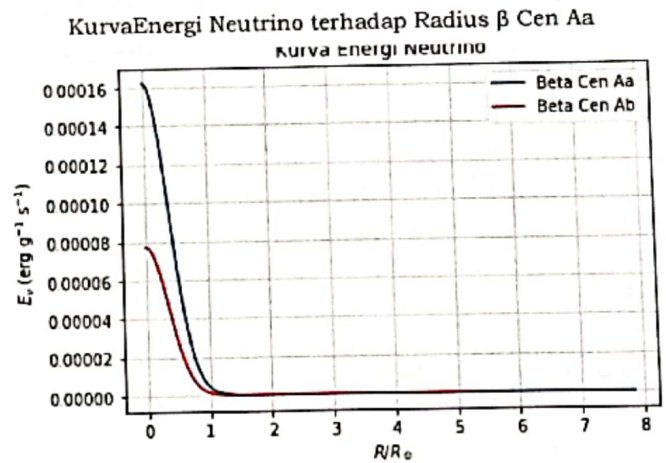


Gambar 4-7. Distribusi kelimpahan elemen terhadap radius pada  $\beta$  Cen Ab.



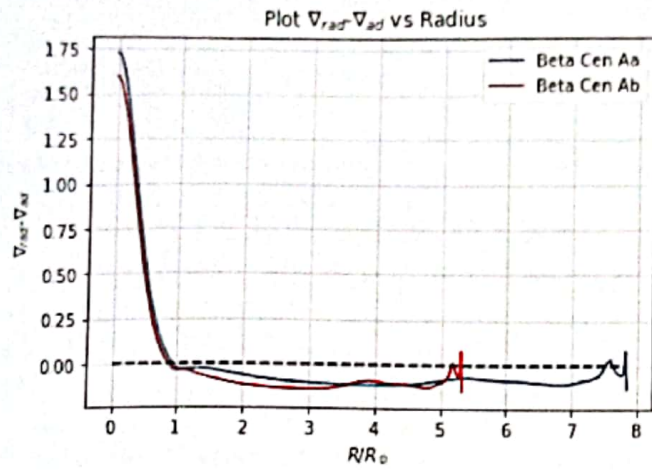
Gambar 4-8. Siklus CNO.

Untuk mengetahui batas radius terjadi reaksi nuklir, dapat dilihat pula hubungan energi neutrino untuk masing-masing bintang seperti pada Gambar 4-9. Neutrino dari bintang hanya dihasilkan melalui reaksi nuklir yang digambarkan pada Gambar 4-8. Pada Gambar 4-9 terlihat energi neutrino lebih tinggi dihasilkan pada radius kurang dari  $1,5 R_{\odot}$  dibandingkan radius yang lebih besar dari  $1,5 R_{\odot}$ . Hal ini menandakan reaksi nuklir terjadi pada radius  $0-1,5 R_{\odot}$ .



Gambar 4-9. Profil energi neutrino terhadap radius pada  $\beta$  Cen Aa dan Ab.

Untuk mengetahui daerah konvektif bintang, dapat dilihat dari hubungan selisih gradien temperatur radiatif dan gradien temperatur adiabatik ( $\nabla_{rad} - \nabla_{ad}$ ). Menurut kriteria Schwarzschild, jika nilai selisih tersebut positif, maka daerah tersebut adalah daerah konvektif, sedangkan jika bernilai negatif maka daerah tersebut adalah daerah radiatif. Dari Gambar 4-10, daerah konvektif untuk bintang  $\beta$  CenAa dan  $\beta$  CenAb adalah dari pusat hingga radius  $1 R_{\odot}$ . Hal ini menunjukkan bahwa inti  $\beta$  Cen A keduanya merupakan inti konvektif. Pada bintang bermassa besar, sering kali dijumpai inti konvektif. Hal ini disebabkan karena pada bintang bermassa besar memiliki gradient radiatif yang besar pula pada inti bintang.



Gambar 4-10. Hubungan gradien temperatur radiatif - adiabatik ( $\nabla_{rad} - \nabla_{ad}$ ) terhadap radius pada  $\beta$  Cen Aa dan Ab.

## 5. KESIMPULAN

Struktur sistem bintang ganda  $\beta$  Cen A (Aa dan Ab) dianalisis dengan menggunakan WTTS. Dari hasil analisis untuk massa dan luminositas akan meningkat dengan meningkatnya radius, sedangkan untuk kerapatan, temperatur dan tekanan akan menurun dengan peningkatan radius. Dari kelimpahan yang terdapat di inti bintang, proses perubahan hidrogen menjadi helium melalui siklus CNO karena adanya perubahan kuantitas unsur C, N dan O. Daerah yang masih melakukan reaksi nuklir sekitar  $0 - 1,5 R_{\odot}$  karena masih ada produksi neutrino pada daerah tersebut. Dari selisih gradien radiatif dan adiabatik, daerah inti merupakan inti konvektif. Penelitian mengenai struktur  $\beta$  CenAa dan Ab untuk kedepannya perlu memerhatikan bahwa sistem bintang  $\beta$  Cen tidak selamanya *detachedbinary*. Karena dinamikanya, bisa jadi antara sistem  $\beta$  CenA dan bintang  $\beta$  CenB akan saling mendekat sehingga terdapat pengaruh dari bintang  $\beta$  CenB terhadap struktur dari sistem  $\beta$  CenA.

Untuk itu, diperlukan pula simulasi dinamika sistem bintang.

## DAFTAR RUJUKAN

- Ausseloos, M., Aerts, C., Lefever, K., Davis, J., & Harmanec, P. (2006). High-precision elements of double-lined spectroscopic binaries from combined interferometry and spectroscopy. Application to the  $\beta$  Cephei star  $\beta$  Centauri. *A&A*, 455(1), 259-269. doi:10.1051/0004-6361:20064829
- Izzard, R. G., & Glebbeek, E. (2006). Window To The Stars. *New Astronomy*, 12(2), 161-163. doi:10.1016/j.newast.2006.07.005
- Pigulski, A., Cugier, H., Popowicz, A., Kuschnig, R., Moffat, A. F., Rucinski, S. M., Schwarzenberg-Czerny, A., Weiss, W. W., Handler, G., Wade, G. A., Koudelka, O., Matthews, J. M., Mochnacki, St., Orleański, P., Pablo, H., Ramiaramanantsoa, T., Whittaker, G., Zocłńska, E., Zwintz, K. (2016). Massive pulsating stars observed by BRITTE-Constellation. I. The triple system  $\beta$  Centauri (Agena). *A&A*, 588, A55. doi:10.1051/0004-6361/201527872
- Prialnik, Dina. (2000). *An introduction to the theory of stellar structure and evolution*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Trampedach, R., & Stein, R. F. (2011). The mass mixing length in convective stellar envelopes. *ApJ*, 731(2), 78. doi:10.1088/0004-637X/731/2/78
- van Leeuwen, F. (2007). Validation of the new Hipparcos reduction. *A&A*, 474(2), 653 - 664. doi:10.1051/0004-6361:20078357