

Skenario Evolusi Bintang Ganda Nova

A. R. Kusuma Putra^{1*}, M. Putra¹, Aprilia¹, M. I. Hakim¹, dan Y. Sugianto¹

¹Program Studi Astronomi, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

*E-mail: arifaldi13@gmail.com

ABSTRAK

Nova merupakan salah satu sub-kelas dari *cataclysmic variables* (CV) yang terdiri dari sebuah bintang katai putih dan bintang *late-type* bermassa kecil sebagai pasangannya. Sebagai CV, kedua bintang komponennya berjarak cukup dekat, sehingga bintang pasangan tersebut memenuhi *Roche lobe*-nya. Hal ini menimbulkan pertanyaan, bagaimana asal-usulnya sehingga terdapat sistem bintang dengan periode pendek dan salah satunya terdiri dari bintang katai putih, yang pada keadaan tertentu dapat digolongkan sebagai nova. Penelitian ini berusaha menjawab pertanyaan tersebut dari sisi evolusi bintang dengan beberapa pendekatan yang dilakukan. Digunakan program *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics* (MESA) sebagai alat komputasi untuk membuat simulasi evolusi bintang ganda *progenitor* nova. WY Sagittae dipilih sebagai pembanding jejak evolusi yang dibuat menggunakan MESA, dari 27 model dengan kombinasi parameter awal ($M_{1,i}$, $M_{2,i}$, dan P_i) yang berbeda. Hasil komputasi dari model yang “terbaik” dikaji lebih detail untuk melihat apa saja yang terjadi sepanjang evolusinya.

Kata Kunci: Nova – Progenitor – MESA

1 PENDAHULUAN

Nova, sebagai salah satu sistem bintang ganda jenis *cataclysmic variables* (CV), memiliki karakteristik sebagai bintang ganda berinteraksi yang memiliki periode pendek. Dengan salah satu komponennya yang merupakan *white dwarf* (WD), pada kondisi tertentu, transfer massa pada sistem bintang ini dapat menimbulkan nova. Salah satu pertanyaan yang timbul adalah seperti apa *progenitor* sistem bintang ini.

Seperti yang ditunjukkan oleh penelitian-penelitian sebelumnya (cth. Irawati et al., 2013; Ryosuke, 2017), kode program evolusi bintang dapat dipakai untuk mencari *progenitor* dari sebuah sistem bintang ganda. Penelitian ini ditujukan untuk melakukan simulasi komputasi mencari *progenitor* dari sebuah nova yang telah diketahui propertinya. Kode program evolusi bintang yang digunakan dalam penelitian kali ini adalah MESA r12778 dengan modul MESA binary (Paxton et al., 2015). Variabel parameter awal *progenitor* nova yang digunakan adalah massa awal bintang primer ($M_{1,i}$), massa awal bintang sekunder ($M_{2,i}$), dan periode awal (P_i).

Karena keterbatasan perangkat untuk melakukan simulasi, beberapa asumsi digunakan untuk penyederhanaan. Asumsi yang digunakan pada penelitian ini yaitu: 1) sistem bintang merupakan sistem konservatif; 2) orbit lingkaran dipertahankan sepanjang evolusi; dan 3) WD yang terbentuk dianggap massa titik.

2 DATA DAN KOMPUTASI

Dari data parameter objek pembanding, penulis memperkirakan parameter awal sebagai tebakan

awal. Penulis menjalankan MESA binary dengan parameter awal tebakan tersebut. Melihat hasilnya yang dibandingkan dengan data objek pembanding, penulis membuat beberapa kombinasi parameter awal. Dari sana, seluruh kombinasi yang ada akan kembali menjadi parameter masukan untuk menjalankan MESA binary. Dengan membandingkan seluruh parameter keluaran dari seluruh kombinasi dengan parameter objek pembanding, diambil kombinasi parameter awal terbaik yang paling mendekati parameter keluarannya dengan objek pembanding.

Tabel 1. Tabel tabulasi data parameter WY Sge.

Parameter	Nilai	Satuan	Ref.
P	0,15363453	hari	a
SpT_2	$M4 \pm 1$		b
M_{WD}	0,8	$M_{\odot}$	c
	0,5-1.1	$M_{\odot}$	d
M_2	$0,268^{+0.021}_{-0.131}$	$M_{\odot}$	b
$\log L_2/L_{\odot}$	$-1,80^{+0.35}_{-0.75}$		b
$T_{eff,2}$	$3\,398^{+0.141}_{-0.114}$	K	b
R_2	$0,363^{+0.044}_{-0.161}$	$R_{\odot}$	b
$\dot{M}_{trans}$	7×10^{-9}	$M_{\odot}/\text{tahun}$	c

^aFuentes-Morales et al. (2021)

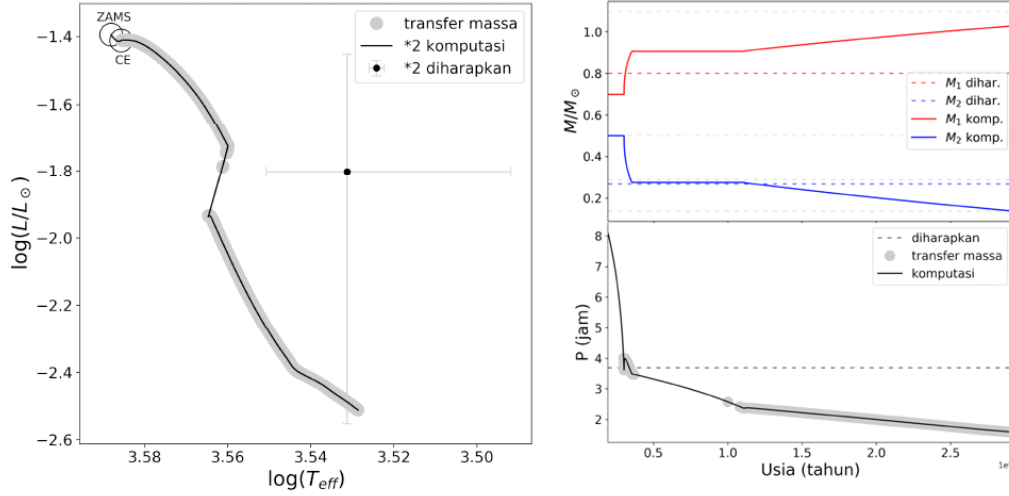
^bKnigge (2006)

^cSomers et al. (1996)

^dSomers et al. (1997)

2.1 Data Objek Acuan

Objek yang dijadikan acuan pada penelitian ini adalah WY Sge. Parameter yang diambil untuk dijadikan pembanding adalah periode (P), kelas spektrum bintang sekunder (SpT_2), massa WD (M_{WD}), dan rasio massa ($q = M_{WD}/M_2$). Kemudian



Gambar 1. Kedua panel merupakan hasil komputasi yang dilakukan MESA binary untuk parameter awal $M_{1,i} = 4.0M_{\odot}$, $M_{2,1} = 0.5M_{\odot}$, dan $P_i = 800$ hari. Panel sebelah kiri merupakan plot jejak evolusi bintang sekunder pada diagram H-R. Panel sebelah kanan merupakan plot jejak evolusi bintang, dari atas ke bawah berturut-turut, untuk parameter massa kedua komponen dan periode pada fase pasca-CE.

melalui deduksi data pengamatan pada literatur lain (Knigge, 2006), didapat luminositas bintang sekunder (L_2), temperatur efektif bintang sekunder ($T_{\text{eff},2}$), radius bintang sekunder (R_2), dan laju transfer massa ($\dot{M}_{\text{trans}}$). Data tersebut ditabulasikan dalam Tabel 1.

2.2 Sistematika Penggunaan MESA

Penggunaan MESA binary dalam penelitian ini akan dibagi menjadi dua bagian, yaitu:

5. *Fase pra-CE.* Dengan $M_{1,i}$, $M_{2,1}$, dan P_i sebagai parameter masukan dan radius bintang primer (R_1) mendekati radius *Roche lobe*-nya ($R_{\text{RL},1}$) sebagai *stopping condition*.
6. *Fase pasca-CE.* Dengan model bintang sekunder keluaran fase pra-CE beserta massa inti bintang primernya (sebagai WD yang digunakan selanjutnya sebagai massa titik) dan periode setelah CE (dijelaskan pada sub-bagian 2.3) sebagai parameter masukan. Lalu, $M_2 = 0.1$ sebagai *stopping condition*.

2.3 Mengakali Fase CE

MESA r12778 belum dapat menjalankan proses komputasi ketika fase CE berlangsung (Paxton et al., 2015). Sehingga, pendekatan analitik dibutuhkan untuk mengakalinya. Parameter yang berubah secara substansial akibat CE adalah jarak pisah. Maka, jarak pisah akan diubah sebagai parameter masukan fase pasca-CE. Perubahan itu dihitung dari persamaan (Willems & Kolb, 2004; Irawati et al., 2013)

$$\frac{A_f}{A_i} = \frac{M_c/M_1}{1 + 2M_e/M_2\alpha_{\text{CE}}\lambda r_L}, \quad (1)$$

dengan A_f dan A_i berturut-turut adalah jarak pisah orbit pada akhir fase pra-CE dan pada awal fase pasca-CE, M_c dan M_e berturut-turut adalah massa inti dan massa selubung bintang primer, serta α_{CE} dan λ diasumsikan bernilai 1.0 dan 0.5 (Davis et al., 2010; Irawati et al., 2013). Seluruh parameter tersebut diperoleh dari data keluaran komputasi pra-CE. Perhitungan A_f akan menjadi masukan parameter P pada fase pasca-CE.

2.4 Perkiraan Awal Parameter Progenitor

Dengan teori evolusi bintang ganda yang telah ada (cth. Iben, 1991), dapat dideduksi perkiraan parameter awal dari sebuah nova. Dengan parameter WY Sge yang telah dihimpun, perkiraan awal dari WY Sge adalah: $P_i = 900$ hari, $M_{1,i} = 4.0M_{\odot}$, dan $M_{2,i} = 0.5M_{\odot}$. Kemudian, MESA binary dijalankan dengan parameter masukan di atas. Hasil komputasinya di plot dalam Gambar 1. Untuk M_1 dan P , hasil komputasi mendekati dengan nilai yang diharapkan (nilai milik WY Sge) ketika sistem berada pada episode transfer massa pertama. Sementara, diagram HR dan M_2 meleset. Agar pada episode transfer massa pertama M_2 dapat melalui

Tabel 2. Tabel kombinasi parameter *progenitor*.

Parameter	Rentang Nilai			Satuan
P_i	800	900	1000	hari
$M_{1,i}$	3,0	4,0	5,0	$M_{\odot}$
$M_{2,i}$	0,3	0,4	0,5	$M_{\odot}$

nilai yang diharapkan, maka diperkirakan bahwa $M_{2,i}$ harus dikurangi. Lalu P_i diperkirakan lebih panjang, sehingga transfer massa dapat berlangsung lebih lama dan pada diagram HR, bintang lebih mendekati nilai yang diharapkan sebelum episode transfer massa pertama berhenti.

Tabel 3. Tabel properti kombinasi terbaik yang dibandingkan dengan data properti WY Sge.

Parameter	Hasil Komputasi	WY Sge
P_i (hari)	800	
$M_{1,i}$ ($M_\odot$)	4,0	
$M_{2,i}$ ($M_\odot$)	0,4	
$\chi_{\min}$	0,18675	
Model (n)	1426	
Usia (juta tahun)	287,8	
P_n (jam)	3,50230	3,687
$M_{WD,n}$ ($M_\odot$)	0,76137	0,800
$M_{2,n}$ ($M_\odot$)	0,33309	0,268
$(\log L_2/L_\odot)_n$	-1,63703	-1,803
$(\log T_{\text{eff}})_n$	3,56671	3,531
$(\log \dot{M}_{\text{trans}})_n$ ($M_\odot/\text{thn}$)	-8,17136	-8,155
$R_{2,n}$ ($R_\odot$)	0,37268	0,363

2.5 Kombinasi Parameter Progenitor

Dari hasil pada sub-bagian 2.4, dibuat beberapa kombinasi parameter di sekitar parameter perkiraan. Terdapat 27 kombinasi dan rentang parameternya ditabulasikan dalam Tabel 2. MESA binary kemudian dijalankan dengan keseluruhan kombinasi parameter tersebut.

Inlist MESA binary yang digunakan pada penelitian ini dapat diakses melalui laman <https://github.com/arifaldi13/evo-nova>.

2.6 Kombinasi Terbaik

Untuk menentukan kombinasi terbaik, parameter-parameter acuan yang disebutkan pada Bagian 1 dari data keluaran MESA binary dicocokkan dengan data objek pembanding. Pencocokkan dilakukan dengan mencari jarak terdekat dari seluruh (tujuh) parameter yang ada untuk seluruh model dalam seluruh kombinasi. Mirip seperti apa yang dilakukan pada metode *chi-squared*, namun dengan tujuh dimensi. Jarak terdekat dari setiap model dihitung dengan pendekatan

$$\begin{aligned} \chi_n^2 = & (\Delta P_n)^2 + (\Delta M_{1,n})^2 + (\Delta M_{2,n})^2 \\ & + (\Delta R_{2,n})^2 + (\Delta (\log L_2)_n)^2 \\ & + (\Delta (\log T_{\text{eff}})_n)^2 \\ & + (\Delta (\log |\dot{M}_{\text{trans}}|)_n)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

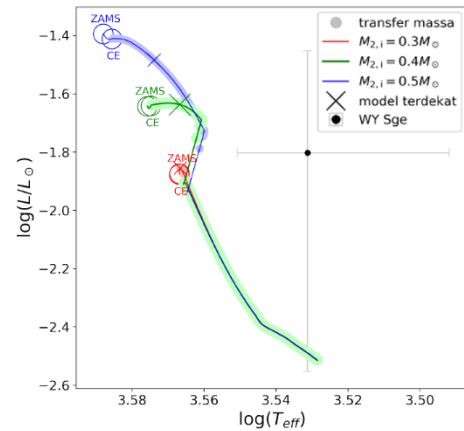
dengan ΔX_n adalah selisih parameter X keluaran komputasi pada model ke- n . Model terbaik dalam sebuah kombinasi merupakan model yang memiliki χ_n terkecil ($\chi_{\min}$). Kombinasi dengan $\chi_{\min}$ terkecil merupakan kombinasi terbaik.

3 HASIL

Kombinasi terbaik yang diperoleh adalah parameter awal $P_i = 800$ hari, $M_{1,i} = 4,0M_\odot$, dan $M_{2,i} = 0,4M_\odot$. Rincian properti dari kombinasi terbaik ini ditabulasikan dalam Tabel 3.

Pada Tabel 3, jelas bahwa hampir seluruh parameter hasil komputasi kombinasi terbaik mendekati parameter WY Sge yang tersedia. Parameter yang meleset dengan signifikan yakni temperatur efektif dan luminositas. Nampak simpangannya dengan parameter WY Sge pada Gambar 2.

Penjelasan skenario evolusinya dibagi menjadi dua fase, yaitu fase pra-CE dan fase pasca-CE. Untuk seterusnya, sebutan untuk kombinasi terbaik ini disebut sebagai "sistem bintang model" dan individu bintang di dalamnya disebut "bintang model."

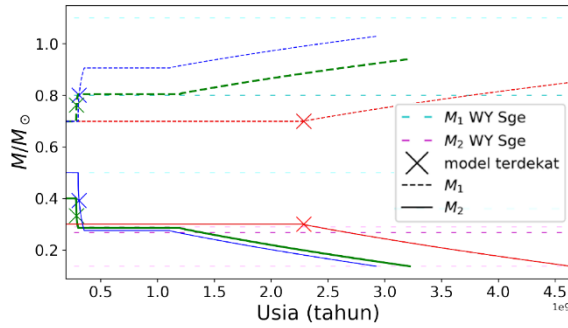


Gambar 2. Jejak evolusi bintang sekunder dari kombinasi terbaik di Diagram H-R. Kombinasi terbaik ditandai dengan warna hijau dengan model terbaiknya ditandai dengan tanda silang (x).

Bintang model primer berevolusi lebih dahulu hingga fase AGB dengan bintang sekundernya masih berada di deret utama. Bintang model primer mulai masuk pada fase AGB pada usia ~180 juta tahun dengan terlihatnya bintang model mulai mengembang dengan sangat cepat.

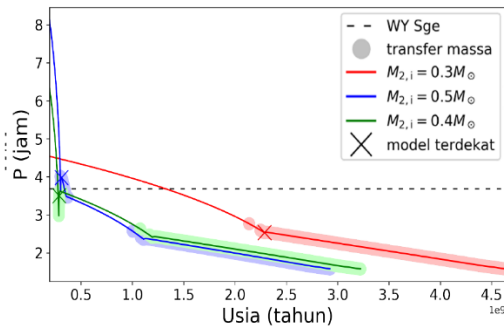
Inti bintang sisa pembakaran hidrogen mulai terbentuk dan cenderung konstan selama fase AGB berlangsung yang bernilai ~0,69 $M_\odot$. Dengan mendekatinya radius bintang model dengan radius *Roche lobe*-nya, bintang model memulai terjadinya

transfer massa ke bintang pasangannya. Namun model pra-CE berakhir di sini dengan dipastikan setelah ini akan terjadi CE dalam waktu yang relatif sangat singkat dibanding fase lainnya.



Gambar 3. Jejak evolusi massa kedua komponen dari kombinasi terbaik pada fase pasca-CE. Kongurasi warna dan tanda masih sama dengan Gambar 2.

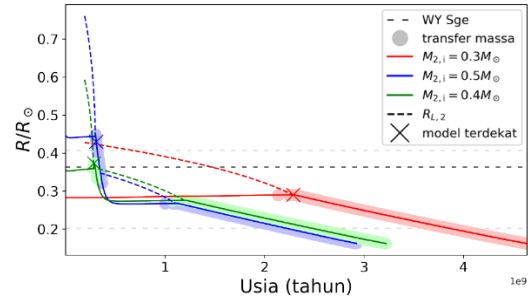
Setelah CE berlangsung, periode dari sistem bintang model masih terus mengerut, terlihat pada Gambar 4. *Roche lobe* dari bintang model sekunder pun mengecil, terlihat pada Gambar 5. Pada usia ~280 juta tahun, dengan mengerutnya periode dan radius *Roche lobe*, *Roche lobe* dari bintang sekunder mulai terisi penuh. Transfer massa cepat mulai terjadi dengan nilai $\sim 7 \times 10^9 M_{\odot}/\text{tahun}$. Dengan laju transfer massa demikian, juga didukung dengan hasil perhitungan komputasi yang juga modelnya dekat di sekitar waktu ini, nova bisa terjadi saat itu. Transfer massa ini juga terlihat pada Gambar 3 ditunjukkan dengan kenaikan nilai M_1 dan penurunan nilai M_2 .



Gambar 4. Jejak evolusi periode dari kombinasi terbaik pada fase pasca-CE. Kongurasi warna dan tanda masih sama dengan Gambar 2.

Selama transfer massa cepat terjadi, periode naik kembali. Bintang sekunder yang kehilangan massa kemudian mengerut, lalu kembali ke kestabilan termalnya. Seiring menurunnya laju transfer massa hingga benar-benar hilang, periode kembali mengerut, begitu pula radius *Roche lobe*-nya. Suatu ketika bintang model sekunder sudah memenuhi *Roche lobe*-nya kembali dan terjadi transfer massa

yang lebih pelan dan stabil dari episode transfer massa sebelumnya. Sistem bintang model kemudian berhenti sampai bintang sekundernya telah menghabiskan massanya hingga menjadi $0,1M_{\odot}$.



Gambar 5. Jejak evolusi radius bintang sekunder dari kombinasi terbaik pada fase pasca-CE. Kongurasi warna dan tanda masih sama dengan Gambar 2.

4 SIMPULAN

Proses simulasi telah dilakukan dengan menggunakan MESA r12278. Beberapa pendekatan dilakukan dalam sistematika penggunaan MESA terutama untuk mengakali fase CE. Terdapat 27 kombinasi parameter P_i , $M_{1,i}$, dan $M_{2,i}$ berbeda yang digunakan dalam penelitian ini. Objek nova yang digunakan sebagai acuan adalah WY Sge. Didapat hasil terbaik yaitu $P_i = 800$ hari, $M_{1,i} = 4,0M_{\odot}$, dan $M_{2,i} = 0,4M_{\odot}$. Hampir seluruh parameter pengamatan WY Sge dipenuhi oleh kombinasi terbaik ini kecuali parameter pada diagram H-R. Skenario yang terjadi termasuk mekanisme fisis telah dianalisis pada Bagian 3.

5 PUSTAKA

- Davis, P. J., Kolb U., & Willems, B. 2010, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 403(1), 179-195
- Fuentes-Morales, I., Tappert, C., Zorotovic, M., Vogt, N., Puebla, E. C., Schreiber, M. R., Ederoclite, A., & Schmidtobreick, L. 2021, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 501, 6083-6102
- Iben, I. Jr. 1991, *Astrophysical Journal Supplement.* 76, 55-104
- Irawati, P., Putra, M., Herdiwijawa, D., & Zen, F. P. 2013, *Astrophysics and Space Science.* 346(1), 79-87.
- Knigge, C. 2006, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 373(2), 484-502
- Ryosuke, H. 2017, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 466(4), 3775-3783
- Somers, M. W., Mukai, K., & Naylor, T. 1996, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 278(3), 845-853
- Somers, M. W., Ringwald, F. A., & Naylor, T. 1997, *Mon. Not. Royal. Astron. Soc.* 284(2), 359-364
- Willems, B. & Kolb, U. 2004, *Astronomy and Astrophysics.* 419. 1057-107