

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis dan Alat Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian teoretis dan komputasional, yang dilakukan untuk mempelajari evolusi sistem bintang ganda melalui pendekatan simulasi numerik. Karena evolusi bintang berlangsung dalam skala waktu yang sangat panjang, pendekatan eksperimental langsung tidak memungkinkan untuk dilakukan. Oleh karena itu, pendekatan simulasi berbasis komputer digunakan untuk memahami berbagai proses fisik yang terjadi dalam sistem bintang ganda, seperti transfer massa, kehilangan massa, serta perubahan struktur dan parameter orbit seiring waktu.

Penelitian ini dilakukan secara komputasional dengan menggunakan perangkat lunak MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*) yang diinstal pada sistem operasi Linux. MESA adalah perangkat lunak open-source yang dikembangkan khusus untuk simulasi struktur dan evolusi bintang. Perangkat lunak ini pertama kali diperkenalkan oleh Paxton dan rekan-rekannya (Paxton dkk., 2010) dan terus diperbarui untuk meningkatkan kemampuan simulasi evolusi bintang. Pada pembaruan 2013, MESA mulai mendukung simulasi planet (Paxton Bill dkk., 2013), sedangkan versi 2015 memperkenalkan modul untuk sistem bintang ganda, osilasi bintang, dan ledakan supernova, yang menjadi dasar dalam penelitian ini (Paxton dkk., 2015). Pembaruan berikutnya, seperti versi 2018, menambahkan fitur untuk batas konvektif, difusi elemen, dan ledakan bintang massa besar (Paxton Bill dkk., 2018), sementara versi 2019 melengkapi dengan simulasi rotasi, variabel osilasi, dan konservasi energi (Paxton dkk., 2019).

Dalam penelitian ini, digunakan modul Binary Star dari MESA versi 2015 (Paxton dkk., 2015) untuk mensimulasikan evolusi sistem bintang ganda DN Orionis. Modul ini memungkinkan pemodelan dua bintang yang saling berinteraksi, serta perhitungan proses fisis seperti pengisian *Roche lobe*, laju

transfer massa, perubahan struktur internal akibat akresi, dan perubahan orbit akibat konservasi momentum sudut. Parameter awal sistem, seperti massa masing-masing bintang, komposisi kimia, periode orbit, dan efisiensi akresi didefinisikan dalam file konfigurasi bernama *inlist*. Ketika salah satu bintang mencapai ukuran *Roche*-nya, MESA menghitung laju transfer massa dengan pendekatan fisis seperti formulasi Ritter pada tahun 1988) atau Kolb & Ritter pada tahun 1990 (Kolb & Ritter, 1990; Ritter, 1988), dan menyesuaikan parameter evolusi masing-masing bintang secara dinamis sesuai kondisi sistem.

Untuk memvisualisasikan dan menganalisis hasil simulasi, digunakan pula perangkat lunak Gnuplot, yaitu alat bantu visualisasi data numerik berbasis grafik. Gnuplot digunakan untuk menggambarkan hubungan antar parameter seperti massa terhadap waktu, luminositas terhadap waktu, serta perubahan periode orbit, yang memungkinkan identifikasi fase-fase penting dalam evolusi sistem. Visualisasi grafik ini juga mempermudah proses interpretasi hasil, serta validasi terhadap data observasi atau model teoritis lainnya.

Dengan kombinasi alat-alat tersebut, penelitian ini menggabungkan pendekatan fisis yang kuat dengan dukungan perangkat komputasi yang fleksibel untuk mengeksplorasi secara mendalam jalur evolusi sistem bintang ganda DN Orionis.

3.2 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini dilakukan secara bertahap, dimulai dari pengumpulan data sistem bintang DN Orionis, penentuan parameter awal simulasi, pemodelan evolusi menggunakan perangkat lunak MESA, hingga analisis hasil menggunakan visualisasi grafis. Prosedur ini dibagi menjadi tiga tahap utama, yaitu:

3.2.1 Data Sistem Bintang DN Orionis

Tahap awal penelitian dimulai dengan mengumpulkan data parameter fisis dari sistem bintang DN Orionis. Sistem ini diketahui merupakan bintang ganda tipe Algol yang terdiri dari bintang utama bertipe A0 dan bintang pendamping

bertipe G5III (Avvakumova dkk., 2013; Eggleton & Kiseleva-Eggleton, 2002) .
Data penting yang digunakan meliputi:

- Massa bintang primer : $2,80 \pm 0,05 M_{\odot}$
- Radius bintang primer : $2,36 \pm 0,07 R_{\odot}$
- Massa bintang sekunder : $0,34 \pm 0,10 M_{\odot}$
- Radius bintang sekunder : $6,66 \pm 0,15 R_{\odot}$
- Periode orbit sistem : 12,9663 hari

Konfigurasi awal ini menjadi dasar untuk simulasi evolusi sistem. Bintang donor diperkirakan akan kehilangan massa ke bintang penerima seiring berjalannya waktu, menyebabkan perubahan pada parameter orbital sistem. Proses transfer massa ini menjadi fenomena kunci dalam evolusi sistem DN Orionis.

3.2.2 Input dan Output Software MESA

Dalam simulasi evolusi sistem bintang ganda DN Orionis menggunakan perangkat lunak MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*), salah satu tahapan penting adalah menyusun berkas *input* yang disebut *inlist*. Berkas ini berisi parameter awal yang merepresentasikan kondisi bintang pada awal evolusinya, termasuk massa, komposisi kimia, periode orbit, rasio massa, dan parameter fisik lainnya seperti efisiensi akresi dan kehilangan massa. MESA merupakan perangkat lunak berbasis Linux yang digunakan secara luas dalam astrofisika teoretis untuk memodelkan evolusi bintang tunggal maupun sistem bintang ganda dengan pendekatan numerik. Program ini memungkinkan pengguna untuk melakukan simulasi dengan tingkat presisi tinggi terhadap berbagai proses fisik seperti pembakaran nuklir, kehilangan massa, dan interaksi antar bintang dalam sistem biner. MESA dapat didownload dan diinstall secara terbuka melalui situs resminya di <https://mesastar.org/>.

Penentuan parameter input dalam *inlist* tidak dilakukan secara langsung berdasarkan kondisi sistem DN Orionis saat ini, melainkan melalui pendekatan *forward modeling*. Pendekatan ini dilakukan dengan memperkirakan konfigurasi

awal yang paling mungkin dari sistem, lalu menjalankan simulasi evolusi hingga diperoleh hasil yang sesuai dengan karakteristik DN Orionis yang teramati pada masa kini. Dengan kata lain, parameter awal diperoleh dari rentang karakteristik massa dan periode orbit yang umum ditemukan pada sistem Algol. Berdasarkan literatur, bintang sekunder (donor) pada sistem Algol memiliki massa dalam rentang $0,5\text{-}5\text{ M}_{\odot}$, sedangkan bintang primer (penerima) memiliki massa dalam rentang $1\text{-}10\text{ M}_{\odot}$ (Pustynnik & Glazunova, 2003). Periode orbit sistem Algol umumnya berkisar antara 1 hingga 10 hari (Peters, 2001).

Dalam penelitian ini, untuk mewakili sistem Algol yang khas, parameter awal massa bintang donor dipilih sebesar $1,8\text{ M}_{\odot}$, massa bintang primer dipilih sebesar $3,1\text{ M}_{\odot}$, dan periode orbit awal sistem ditetapkan sebesar 2,5 hari. Pemilihan nilai-nilai ini dilakukan untuk memastikan kondisi awal sistem berada dalam parameter fisis yang realistis serta mendukung terjadinya transfer massa melalui mekanisme *Roche Lobe Overflow* (RLOF).

Berikut adalah detail parameter input utama yang digunakan dalam simulasi ini:

- Massa awal bintang primer : $1,80\text{ M}_{\odot}$
- Massa awal bintang sekunder : $3,10\text{ M}_{\odot}$
- Komposisi kimia besi(Z) awal : 0,02
- Periode orbit awal : 2,5 hari

Setelah parameter-parameter ini ditentukan, konfigurasi lengkap input dimasukkan ke dalam tiga berkas utama yang digunakan oleh MESA, yaitu:

- inlist1: berisi pengaturan dan parameter awal untuk bintang pertama (primer)
- inlist2: berisi pengaturan dan parameter awal untuk bintang kedua (sekunder)
- inlist_project: berisi parameter umum untuk seluruh simulasi, termasuk kontrol waktu, output, dan pemanggilan modul binary

Setelah simulasi dijalankan, MESA menghasilkan data output dalam bentuk berkas teks yang terstruktur. Output utama meliputi data evolusi bintang seperti:

- Massa
- Radius
- Suhu efektif
- Luminositas
- Komposisi kimia

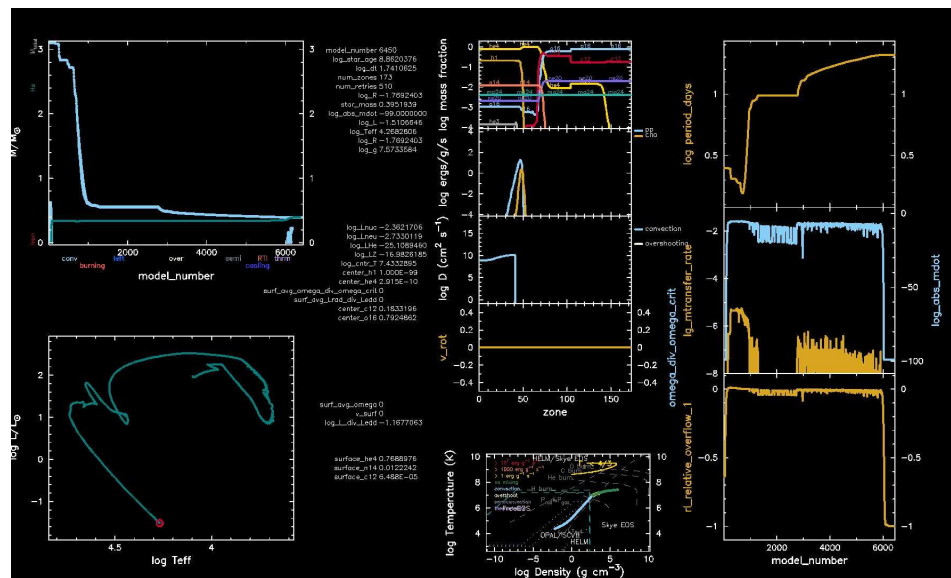
Selain itu, MESA juga mencatat parameter orbital seperti:

- Periode orbit
- Semi-major axis
- Laju kehilangan massa dari sistem
- Sinkronisasi rotasi dan orbit

Semua data ini dicatat dalam file seperti `history.data`, `binary_history.data`, dan `profile.data`. File `history.data` menyimpan data evolusi dari masing-masing bintang, sedangkan `binary_history.data` berisi informasi orbit dan transfer massa. File `profile.data` menyimpan struktur internal bintang untuk waktu tertentu dan dapat digunakan untuk menganalisis bagian dalam bintang seperti suhu inti, densitas, dan zona konvektif.

3.2.3 Plotting

Setelah data output diperoleh dari hasil simulasi MESA, langkah selanjutnya adalah melakukan visualisasi untuk memahami dan menganalisis evolusi bintang secara lebih intuitif. Visualisasi dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak Gnuplot, yang mampu membuat grafik dari data tabular seperti yang dihasilkan oleh MESA.



Gambar 3.1 Output evolusi bintang MESA menggunakan GNUPLOT

Gnuplot digunakan untuk memplot hubungan antara beberapa parameter penting, seperti:

- Diagram HR terhadap waktu
- Laju transfer massa terhadap waktu
- Massa bintang terhadap waktu
- Periode orbit terhadap waktu
- Temperature & densitas terhadap waktu

Plotting ini membantu dalam mengidentifikasi peristiwa penting seperti awal transfer massa, perubahan periode orbit, dan fase akhir evolusi masing-masing komponen bintang.

3.2.4 Analisis Data

Dalam penelitian ini, analisis data dilakukan untuk memahami evolusi parameter sistem DN Orionis berdasarkan hasil simulasi yang dihasilkan oleh MESA. Berikut adalah tahapan analisis data yang dilakukan:

3.2.4.1 Pengolahan Hasil Simulasi

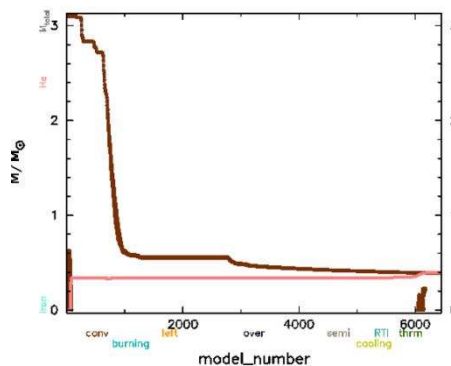
Hasil simulasi berupa data numerik dan file output MESA dianalisis untuk mengamati perubahan parameter fisik seperti:

- Massa Bintang: Perubahan massa komponen primer dan sekunder sebagai akibat dari transfer massa.
- Radius Bintang : Perubahan radius komponen primer dan sekunder selama tahap evolusi.
- Parameter Orbital: Variasi periode orbit dan jarak antar bintang selama evolusi.
- Struktur Bintang: Distribusi suhu, tekanan, dan kepadatan dalam kedua bintang.
- Luminositas dan Radius: Perubahan luminositas dan radius bintang yang mencerminkan fase evolusi.
- Laju Transfer Massa : Perubahan laju transfer massa *Roche Lobe* dari bintang ganda.

3.2.4.2 Visualisasi Data

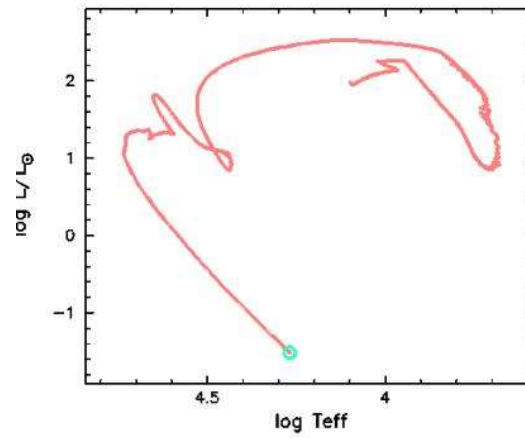
Visualisasi dilakukan menggunakan perangkat lunak Gnuplot untuk menghasilkan grafik-grafik berikut:

- Grafik massa kedua bintang terhadap waktu untuk memahami pola transfer massa.



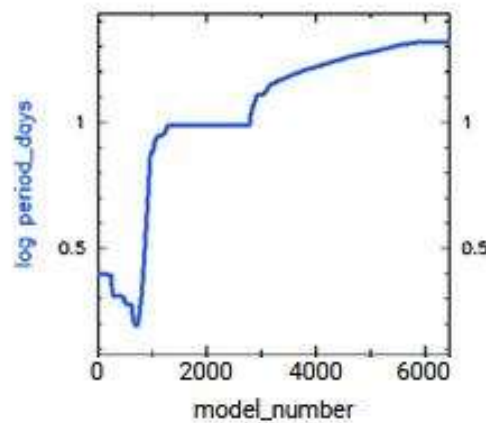
Gambar 3.2 Output massa bintang MESA menggunakan GNUPLOT

- Grafik Hertzsprung-Russell kedua bintang untuk memahami pola fase dan tahap evolusi bintang.



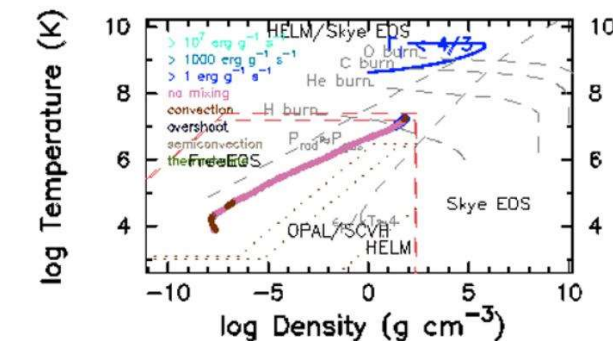
Gambar 3.3 Output Hertzsprung-Russell bintang MESA menggunakan GNUPLOT

- Grafik periode orbit terhadap waktu untuk menunjukkan dampak transfer massa pada dinamika sistem.



Gambar 3.4 Output periode bintang MESA menggunakan GNUPLOT

- Profil struktur bintang (suhu, luminositas, kepadatan, dan tekanan) untuk mengevaluasi perubahan internal bintang.



Gambar 3.5 Output struktur bintang MESA menggunakan GNUPLOT

3.2.4.3 Parameter Utama yang Dianalisis

Beberapa parameter kunci yang dianalisis mencakup:

- Efisiensi Transfer Massa: Rasio massa yang diterima oleh komponen sekunder terhadap massa yang hilang dari komponen primer.
- Evolusi Komponen Primer dan Sekunder: Identifikasi fase evolusi, seperti fase pembengkakan atau keruntuhan inti.
- Stabilitas Orbital: Perubahan stabilitas orbit sistem selama transfer massa.

3.2.4.4 Interpretasi Hasil Simulasi

Hasil visualisasi dan pengolahan data dibandingkan dengan teori evolusi bintang ganda untuk memberikan interpretasi, seperti:

- Identifikasi mekanisme transfer massa (*overflow Roche lobe* atau mekanisme lainnya).
- Evaluasi dampak transfer massa pada siklus hidup kedua komponen DN Orionis.
- Penjelasan bagaimana transfer massa memengaruhi parameter orbital dan akhirnya menentukan tahap akhir evolusi sistem.

3.2.4.5 Evaluasi dan Validasi Hasil

Untuk memastikan hasil simulasi konsisten dengan fenomena fisik yang diperkirakan:

- Hasil dibandingkan dengan literatur dan model teoritis serupa.
- Hasil simulasi dibandingkan dengan parameter bintang saat masa ini