

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Bintang adalah objek langit bercahaya yang terbentuk dari keruntuhan awan molekul raksasa akibat gaya gravitasi. Objek ini tersusun terutama dari gas panas, terutama hidrogen dan helium, yang merupakan unsur paling melimpah di alam semesta. Di dalam inti bintang, berlangsung reaksi fusi nuklir yang mengubah hidrogen menjadi helium, menghasilkan energi dalam jumlah besar yang dipancarkan ke luar dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Proses ini mempertahankan tekanan ke luar yang menyeimbangkan tarikan gravitasi ke dalam, sehingga bintang tetap stabil dalam waktu yang sangat lama. Sifat-sifat bintang, seperti massa, luminositas, suhu permukaan, dan komposisi kimia, memengaruhi jalur evolusinya. Dengan memanfaatkan observasi seperti fotometri, spektroskopi, dan astrometri, para astronom dapat mengumpulkan data empiris tentang karakteristik bintang dan menggunakannya untuk menguji prediksi dari teori-teori evolusi bintang.

Namun, pengamatan langsung saja tidak cukup untuk menjelaskan secara menyeluruh proses-proses kompleks yang terjadi di dalam bintang. Oleh karena itu, para ilmuwan mengembangkan teori model struktur bintang sebagai pendekatan fisika teoretis untuk memahami dinamika internal bintang. Model ini menggabungkan hukum-hukum dasar fisika, termasuk hukum termodinamika, hukum mekanika fluida, hukum konservasi massa dan energi, serta prinsip-prinsip mekanika kuantum, untuk memodelkan keseimbangan hidrostatis, mekanisme transportasi energi (konveksi, radiasi, dan konduksi), serta laju reaksi fusi nuklir di inti bintang (Schwarzschild, 2015). Melalui simulasi numerik berbasis model ini, ilmuwan dapat meramalkan jalur evolusi bintang berdasarkan parameter awal seperti massa dan komposisi awalnya.



Gambar 1.1 Fotografi bintang ganda (Chumack, 2013)

Salah satu fenomena yang menarik dan penting dalam astrofisika adalah keberadaan sistem bintang ganda, yaitu dua bintang yang terikat secara gravitasi dan mengorbit pusat massa bersama. Sistem ini jauh lebih umum daripada yang diperkirakan sebelumnya, dan memainkan peran penting dalam memahami evolusi bintang secara menyeluruh. Dalam sistem bintang ganda, interaksi gravitasi yang kuat antara kedua komponen memungkinkan terjadinya dinamika yang kompleks, termasuk peristiwa transfer massa, pembentukan cakram akresi, hingga kemungkinan terjadinya ledakan supernova tipe tertentu. Salah satu jenis sistem yang penting adalah sistem bintang ganda dekat, di mana kedua bintang berada cukup dekat sehingga salah satu dapat mengisi batas *Roche lobe*-nya dan mulai mentransfer materi ke pasangannya. Proses ini dapat menyebabkan perubahan besar pada komposisi kimia, struktur internal, bahkan laju evolusi dari kedua bintang yang terlibat.

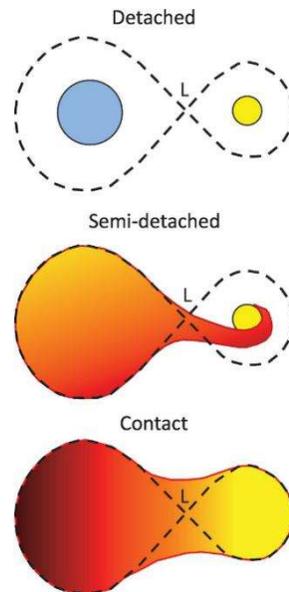
Ketertarikan terhadap sistem bintang ganda sudah dimulai sejak lama. Salah satu tokoh penting dalam studi awal sistem ini adalah Dr. Robert G. Aitken, yang selama lebih dari empat dekade melakukan pengamatan intensif terhadap bintang-bintang ganda. Melalui teleskop Lick Observatory, Aitken berhasil mengidentifikasi lebih dari 3000 sistem bintang ganda dengan pemisahan sudut kurang dari lima detik busur. Ia juga melakukan pengukuran ulang terhadap posisi bintang-bintang tersebut untuk mendeteksi gerak orbit dan mengidentifikasi pasangan-pasangan baru. Kontribusi pentingnya diwujudkan dalam bentuk katalog bintang ganda yang komprehensif, yang menjadi rujukan penting dalam

penelitian-penelitian berikutnya (Aitken, 1935). Temuan dan dokumentasi Aitken menjadi dasar bagi studi lanjutan mengenai dinamika orbital, distribusi massa, dan proses interaksi dalam sistem bintang ganda, terutama dalam konteks evolusi bintang yang saling memengaruhi satu sama lain. Hingga kini, sistem bintang ganda tetap menjadi topik sentral dalam astrofisika karena relevansinya dalam memahami berbagai fenomena seperti sistem bintang ganda semidetached, nova, hingga pembentukan gelombang gravitasi.

Penelitian terhadap sistem bintang ganda memiliki peranan yang sangat penting dalam pengembangan ilmu astrofisika modern, karena memberikan informasi mendalam mengenai bagaimana bintang berkembang, berevolusi, dan saling berinteraksi. Dalam sistem ini, berbagai fenomena fisik yang kompleks dapat diamati dan dipelajari, termasuk perpindahan massa antar komponen bintang, pembentukan cakram akresi di sekitar salah satu bintang, serta peristiwa astrofisika ekstrem seperti nova, supernova, bahkan pembentukan lubang hitam. Sistem bintang ganda juga menjadi laboratorium alami yang ideal untuk menguji teori evolusi bintang, karena interaksi antara dua bintang menciptakan kondisi yang berbeda dengan evolusi bintang tunggal. Studi terhadap sistem semacam ini memungkinkan pemahaman lebih baik terhadap dampak langsung dari interaksi gravitasi dan mekanisme transfer energi dan materi dalam skala astrofisika (Jones & Boffin, 2017).

Selain memfasilitasi pemahaman terhadap proses evolusi bintang yang kompleks, sistem bintang ganda juga memainkan peran penting dalam pengukuran parameter fisik bintang secara lebih akurat. Misalnya, melalui analisis sistem bintang ganda gerhana atau bintang ganda spektroskopik, ilmuwan dapat menentukan massa, radius, dan bahkan kerapatan bintang dengan presisi tinggi, yang tidak dapat dicapai pada bintang tunggal. Informasi ini sangat krusial dalam memverifikasi model-model struktur bintang dan hukum-hukum dasar fisika yang berlaku di lingkungan ekstrim. Lebih jauh lagi, interaksi dalam sistem bintang ganda memberikan wawasan mengenai pengaruh gravitasi dalam membentuk struktur bintang, dinamika sistem multi-bintang, serta perannya dalam distribusi

materi di galaksi. Dengan demikian, penelitian sistem bintang ganda tidak hanya berdampak pada studi evolusi bintang, tetapi juga berkontribusi secara signifikan dalam memahami struktur dan evolusi galaksi secara keseluruhan (Jones & Boffin, 2017).



Gambar 1.2 Klasifikasi interaksi gravitasi dalam bintang ganda (Walker, 2017)

Sistem bintang ganda diklasifikasikan berdasarkan interaksi gravitasi dan sejauh mana terjadinya transfer massa antar komponennya. Salah satu jenis sistem bintang ganda yang paling sederhana adalah sistem terpisah (*detached system*), di mana kedua bintang berada cukup jauh sehingga tidak terjadi interaksi signifikan berupa pertukaran massa. Masing-masing bintang dalam sistem ini tetap berada dalam batas *Roche lobe*-nya sendiri dan berevolusi secara mandiri sesuai jalur evolusi bintang tunggal. Sistem ini sangat penting sebagai dasar perbandingan dalam studi astrofisika, karena memungkinkan peneliti untuk memahami sifat-sifat dasar bintang tanpa dipengaruhi oleh gangguan eksternal dari pasangan bintangnya.

Sistem bintang terpisah memberikan informasi yang sangat berguna dalam menguji teori struktur dan evolusi bintang, terutama karena parameter fisik bintang dapat ditentukan tanpa adanya komplikasi dari transfer massa. Beberapa

sistem terpisah yang memiliki orbit yang dapat diamati dengan baik juga digunakan untuk mengukur massa dan radius bintang secara akurat, terutama jika sistem tersebut termasuk dalam kategori bintang ganda gerhana atau spektroskopik. Data observasi dari sistem ini sering kali menjadi tolok ukur dalam kalibrasi model-model evolusi bintang. Selain itu, sistem terpisah juga dapat menunjukkan bagaimana perbedaan massa awal dan komposisi kimia antar bintang mempengaruhi jalur evolusi masing-masing secara independen.

Jenis sistem kedua adalah sistem semi-terpisah (*semi-detached system*), yaitu konfigurasi di mana salah satu bintang telah mengisi atau melampaui batas *Roche lobe*-nya dan mulai mentransfer massa ke pasangannya. Transfer ini terjadi karena tekanan radiasi atau ekspansi evolusioner menyebabkan bintang donor meluap keluar dari batas gravitasinya dan membentuk aliran materi menuju bintang akretor. Proses transfer massa ini dapat berlangsung dalam skala waktu yang panjang dan memberikan dampak besar terhadap struktur serta evolusi kedua bintang dalam sistem tersebut. Dalam sistem semi-terpisah, akretor biasanya mengalami peningkatan massa dan luminositas secara signifikan, sedangkan donor kehilangan massa dan dapat berevolusi lebih cepat atau bahkan berhenti melakukan fusi nuklir karena kehilangan materialnya. Fenomena ini menciptakan ketidakseimbangan energi dan dinamika dalam sistem, yang dapat menyebabkan perubahan dalam periode orbit atau menghasilkan emisi energi dalam bentuk gelombang radio, sinar-X, atau ultraviolet. Studi tentang sistem semi-terpisah sangat penting untuk memahami proses evolusi yang saling memengaruhi, serta bagaimana interaksi massa dapat menghasilkan konfigurasi bintang eksotik seperti bintang helium, bintang biru semu (*blue straggler*), atau bahkan sistem dengan komponen kompak.

Sistem bintang ganda kontak (*contact system*) adalah bentuk interaksi paling ekstrem, di mana kedua bintang telah mengisi batas *Roche lobe* mereka dan berbagi selubung bersama. Dalam sistem ini, materi dari kedua bintang bercampur dalam lapisan eksternal yang saling terhubung, menciptakan kondisi termal dan dinamika fluida yang sangat kompleks. Energi panas dan tekanan antara kedua inti

bintang menjadi tidak seimbang, menyebabkan aliran massa bolak-balik, yang berkontribusi terhadap ketidakstabilan dalam sistem. Contoh paling terkenal dari sistem kontak adalah bintang tipe W Ursae Majoris, yang menunjukkan variasi cahaya periodik akibat interaksi fisik langsung antara kedua bintang. Sistem seperti ini menjadi sangat penting dalam studi mengenai akhir evolusi sistem bintang ganda, terutama karena banyak sistem kontak berakhir dalam proses merger, menghasilkan bintang tunggal yang lebih masif atau melepaskan energi dalam bentuk ledakan termonuklir seperti nova dan, dalam kasus tertentu, supernova.

Sistem bintang ganda tipe Algol adalah salah satu jenis sistem bintang ganda semi-terpisah (*semi-detach system*) yang paling menarik untuk dipelajari dalam astrofisika, karena menunjukkan fenomena transfer massa yang kompleks. Dalam sistem ini, terdapat dua bintang dengan karakteristik unik dimana salah satu bintang lebih masif tetapi masih berada pada tahap evolusi awal, sementara pasangannya lebih kecil namun telah mencapai tahap evolusi yang lebih lanjut. Fenomena ini sering disebut sebagai "paradoks Algol," karena secara teoritis bintang yang lebih masif seharusnya berevolusi lebih cepat. Namun, dalam sistem tipe Algol, bintang yang lebih kecil telah kehilangan sebagian besar massanya melalui proses transfer massa ke bintang yang lebih masif, sehingga memperlambat evolusinya (Kounkel dkk., 2024). Transfer massa ini juga menciptakan interaksi dinamis yang memengaruhi parameter orbit dan struktur kedua bintang. Sistem bintang tipe Algol tidak hanya memberikan wawasan tentang evolusi bintang secara individual, tetapi juga membantu kita memahami bagaimana gravitasi dan interaksi massa memengaruhi dinamika sistem bintang ganda secara keseluruhan.

DN Orionis adalah salah satu sistem bintang ganda tipe Algol yang menunjukkan fenomena transfer massa antar kedua komponennya. Fenomena ini terjadi ketika material dari salah satu bintang mengalir ke bintang lainnya akibat pengaruh gravitasi, menciptakan dinamika unik yang memengaruhi evolusi kedua bintang tersebut. DN Orionis dipilih untuk dikaji karena pemodelan sistem ini

dapat memberikan wawasan tentang bagaimana proses transfer massa memengaruhi struktur internal, luminositas, dan tahap akhir kehidupan bintang, serta bagaimana interaksi ini membentuk karakteristik sistem bintang ganda secara keseluruhan.

Mengamati sistem bintang ganda secara langsung sering kali menjadi tantangan karena keterbatasan resolusi teleskop serta kompleksitas sistemnya, seperti jarak yang sangat jauh atau interaksi yang berlangsung dalam skala waktu yang sangat panjang. Untuk mengatasi keterbatasan ini, para ilmuwan menggunakan berbagai perangkat simulasi numerik guna mempelajari evolusi bintang secara teoretis. Beberapa perangkat lunak simulasi yang umum digunakan di bidang astrofisika antara lain STAREVOL, BINSTAR, dan EV/STARS. Masing-masing memiliki keunggulan tersendiri tergantung pada tujuan penelitian dan aspek evolusi bintang yang ingin diteliti. Namun, dari berbagai opsi yang tersedia, MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*) (Paxton dkk., 2011) menjadi salah satu yang paling akurat karena kemampuannya yang canggih dan fleksibel dalam memodelkan evolusi bintang tunggal maupun sistem bintang ganda. MESA memungkinkan pengguna untuk menentukan berbagai parameter fisik seperti massa, radius, komposisi kimia, hingga periode orbit dalam sistem bintang ganda, serta mendukung proses kompleks seperti transfer massa dan kehilangan massa. Karena keakuratan, dokumentasi yang baik, dan komunitas pengguna yang aktif, MESA dianggap sebagai salah satu perangkat simulasi numerik paling maju saat ini untuk studi evolusi bintang.

Berbagai studi terdahulu telah menunjukkan keandalan MESA dalam memodelkan evolusi bintang, khususnya dalam konteks sistem ganda. Schindler dalam 2015 menggunakan MESA untuk memeriksa evolusi interior bintang sdB dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data asteroseismologi termasuk ukuran pusat konveksi yang awalnya lebih kecil ($0.17-0.18 M_{\odot}$) daripada yang diindikasikan oleh observasi, serta mengeksplorasi efek overshoot (Schindler dkk., 2015).

Penelitian terhadap evolusi sistem bintang ganda seperti DN Orionis penting dilakukan karena sistem semacam ini menyimpan informasi krusial mengenai proses transfer massa dan evolusi dinamis dua bintang yang saling berinteraksi. Dengan memodelkan evolusi kedua bintang secara simultan, dapat diperoleh pemahaman yang lebih menyeluruh tentang bagaimana perubahan parameter struktur internal seperti massa, radius, suhu efektif, dan periode orbit saling memengaruhi seiring waktu. Perubahan struktur internal dan dinamika orbit dianalisis menggunakan perangkat lunak MESA yang memungkinkan pelacakan evolusi detail dari masing-masing bintang. Transfer massa dari bintang donor mengubah distribusi tekanan dan temperatur internal, memengaruhi laju fusi nuklir dan mempercepat atau memperlambat evolusi. Sementara itu, redistribusi momentum sudut akibat hilangnya massa menyebabkan periode orbit sistem meningkat secara signifikan.

1.2 Rumusan Masalah

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan evolusi sistem bintang ganda DN Orionis dengan menggunakan kode MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*) (Paxton dkk., 2015). Berdasarkan fenomena transfer massa yang terjadi dalam sistem ini, beberapa pertanyaan kunci dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana mekanisme transfer massa dalam sistem bintang ganda DN Orionis mempengaruhi evolusi masing-masing bintang?
2. Bagaimana perubahan struktur internal dan parameter orbit bintang ganda DN Orionis seiring waktu?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memodelkan evolusi sistem bintang ganda DN Orionis menggunakan *Modules for Experiments in Stellar Astrophysics* (MESA) (Paxton dkk., 2015), dengan fokus pada aspek-aspek berikut:

1. Menganalisis mekanisme transfer massa yang terjadi pada sistem bintang ganda DN Orionis.
2. Memahami pengaruh transfer massa terhadap perubahan struktur bintang dan parameter orbit sistem.

1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian ini tetap fokus dan terarah, maka diberikan beberapa batasan masalah, yaitu:

1. Model MESA yang disimulasikan adalah sebuah model yang terisolasi dari faktor eksternal.
2. Model MESA hanya disimulasikan evolusi hingga tahap akhir transfer massa tanpa melanjutkan ke tahap evolusi akhir kedua bintang.
3. Data input yang digunakan dalam model MESA terbatas pada parameter awal bintang yang bersumber dari literatur.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan beberapa manfaat, antara lain:

1. Menambah wawasan terkait dinamika transfer massa dalam sistem bintang ganda, khususnya DN Orionis.
2. Memberikan kontribusi bagi pengembangan model evolusi bintang ganda, yang dapat digunakan dalam penelitian lebih lanjut.