



Pemodelan Evolusi Sistem Bintang Ganda Tipe Algol Berbantuan MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*) : Studi Kasus DN Orionis

Deva Refika Nansyah, Judhistira Aria Utama, Selly Feranie

Artikel ini telah dipresentasikan pada kegiatan Seminar Nasional Fisika (Sinafi X) & International Physics Conference (IPC)

Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia

16 Agustus 2025

Abstract

The DN Orionis binary star system was a semi-detached binary undergoing mass transfer using Roche Lobe Overflow (RLOF) mechanism. This process played a role in the evolution of both stars, influencing physical parameters such as mass, radius, effective temperature, and orbital dynamics. This study aimed to analyze the impact of mass transfer on the evolution of both stars, focusing on changes in their parameters after the mass transfer ended without extending to their final evolutionary stages. Using MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*), the evolution of the DN Orionis system was modeled. Initially, the primary star had a smaller mass $M = 1.8 M_{\text{sun}}$ than the secondary $M = 3.1 M_{\text{sun}}$, with an orbital period of $P = 2.5$ days. Mass transfer increased the primary's mass to $M = 2.9 M_{\text{sun}}$, while the secondary lost most of its mass, leaving $M = 0.23 M_{\text{sun}}$. The radii and effective temperatures of both stars changed significantly: the secondary's radius contracted from $R = 5.67 R_{\text{sun}}$ to $R = 0.0174 R_{\text{sun}}$, while the primary expanded from $R = 1.5 R_{\text{sun}}$ to $R = 25.72 R_{\text{sun}}$. The primary evolved into a sub-red giant with a effective temperature $\log T_{\text{eff}} = 3.688$, while the secondary became a white dwarf with a effective temperature $\log T_{\text{eff}} = 4.2682$. Angular momentum redistribution caused the orbital period to increase to $P = 20.9$ days. This study provided insights into how mass transfer shaped the evolution and parameters of semi-detached binary stars before reaching their final evolutionary stages, demonstrating that significant mass ratio inversion and orbital period expansion are key outcomes of Roche Lobe Overflow in systems like DN Orionis.

Keywords (kata kunci): *Semi-detached binary · Roche Lobe Overflow (RLOF) · Mass Transfer · Stellar Evolution · DN Orionis*

PENDAHULUAN

Penelitian sistem bintang ganda telah dimulai sejak lama. Salah satu tokoh penting dalam studi awal sistem ini adalah 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).

✉ Deva Refika Nansyah Selly Feranie
devarefika@upi.edu feranie@upi.edu
Judhistira Aria Utama
j.aria.utama@upi.edu

¹Physics Study Program, Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung, Indonesia.

How to Cite: Nansyah, D. R., Utama, J. A. & Feranie, S.(2025). Pemodelan Evolusi Sistem Bintang Ganda Tipe Algol Berbantuan MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*) : Studi Kasus DN Orionis. *Prosiding Seminar Nasional Fisika*, 4(1), 14-27
<https://proceedings.upi.edu/index.php/sinafi/>

Bintang terbentuk dari awan molekuler raksasa yang mengalami kontraksi gravitasi akibat gangguan eksternal seperti gelombang kejut supernova atau tekanan radiasi dari bintang masif di sekitarnya, yang memicu fragmentasi dan pembentukan protobintang (Shu dkk., 1987). Dalam fase ini, energi dihasilkan dari kontraksi gravitasi, dan saat suhu inti mencapai ~ 10 juta kelvin, reaksi fusi hidrogen dimulai, menandai awal fase deret utama yang ditandai oleh keseimbangan hidrostatis antara tekanan radiasi dan gaya gravitasi (McKee & Ostriker, 2007). Pada fase deret utama, bintang menghasilkan energi melalui fusi hidrogen menjadi helium dengan jalur fusi yang bergantung pada massa: rantai proton–proton untuk bintang bermassa rendah dan siklus CNO (carbon–nitrogen–oxygen) untuk bintang bermassa besar (Clayton, 1968). Setelah hidrogen inti habis, bintang bermassa rendah seperti Matahari akan menjadi raksasa merah dan mengalami helium flash sebelum stabil sementara di cabang horizontal (Iben Jr., 1991), sedangkan bintang bermassa besar melanjutkan fusi hingga unsur besi dalam struktur berlapis seperti bawang, sebelum kolaps menjadi supernova (Woosley dkk., 2002). Akhir hidup bintang bergantung pada massanya: bintang bermassa rendah menjadi katai putih yang stabil karena tekanan degenerasi elektron (Miller Bertolami, 2016), sementara bintang bermassa besar menghasilkan bintang neutron atau lubang hitam jika inti yang kolaps melampaui batas TOV (Tolman–Oppenheimer–Volkoff), sekaligus menyebarkan unsur berat ke ruang antarbintang dan mendorong daur ulang materi di galaksi (Heger dkk., 2003).

Salah satu sistem bintang ganda yang menarik untuk dipelajari adalah sistem tipe Algol, yaitu sistem semi-terpisah (semi-detached) yang menunjukkan fenomena transfer massa kompleks. Dalam sistem ini, bintang yang lebih kecil justru telah kehilangan sebagian besar massanya melalui proses transfer massa ke bintang yang lebih masif, sehingga memperlambat evolusinya (Kounkel dkk., 2024).

Mekanisme transfer massa dijelaskan melalui konsep *Roche lobe*, yaitu batas imajiner yang menggambarkan wilayah dominasi gravitasi tiap bintang dalam sistem biner. Jika salah satu bintang mengembang hingga mengisi batas Roche-nya, material dapat melintasi titik Lagrange pertama (L1) dan mengalir ke bintang pasangannya (Eggleton, 1983). Proses ini memengaruhi jalur evolusi kedua komponen, termasuk perubahan massa, ukuran, dan luminositas (Eggleton, 2006). Pada bintang penerima, akumulasi massa dapat mempercepat pembakaran nuklir, meningkatkan luminositas, dan memperpendek masa hidupnya (Podsiadlowski dkk., 1992). Dalam beberapa kasus ekstrem, fenomena ini menghasilkan pembaharuan bintang (rejuvenation), di mana bintang penerima tampak lebih muda dari usia sebenarnya. Pada sistem Algol, transfer massa dapat membalikkan urutan evolusi, sehingga bintang yang awalnya lebih kecil menjadi lebih masif dari pasangannya (Nelson & Eggleton, 2001).

Secara teoritis, arah perubahan periode orbit bergantung pada rasio massa sistem ($q = \text{Massa donor}/\text{Massa penerima}$). Saat $q > 1$, transfer massa dari donor yang lebih masif ke penerima yang lebih ringan cenderung memperpendek periode orbit. Sebaliknya, saat $q < 1$, periode orbit dapat meningkat (Pols, 2011). Prediksi teoritis ini dapat dibandingkan dengan tanda-tanda perubahan periode yang diamati pada sistem nyata seperti DN Orionis.

Dalam banyak kasus, transfer massa bersifat non-konservatif, di mana sebagian materi yang ditransfer tidak ditangkap oleh bintang pendamping melainkan terlempar ke luar sistem melalui angin bintang atau mekanisme lain. Akibatnya, tidak hanya massa, tetapi juga momentum sudut sistem mengalami perubahan, yang dapat memperpendek atau memperpanjang periode orbit (Van Rensbergen dkk., 2011). Laju transfer massa dihitung

secara fisis, menggunakan pendekatan seperti formulasi Ritter pada tahun 1988 atau Kolb & Ritter pada tahun 1990 (Kolb & Ritter, 1990; Ritter, 1988).

DN Orionis merupakan sistem bintang ganda tipe Algol yang terletak di rasi Orion dan telah dikaji sebagai salah satu contoh klasik dari sistem bintang ganda dengan transfer massa (Avvakumova dkk., 2013). Sistem ini terdiri dari bintang primer tipe spektrum A0 dengan massa sekitar $2,80 M_{\odot}$ dan bintang sekunder tipe G5III dengan massa sekitar $0,34 M_{\odot}$ (Eggleton, 2002; Etzel & Olson, 1995). Rasio massa yang sangat kecil ($q \approx 0,12$) menunjukkan bahwa sistem ini berada pada fase $q < 1$, sehingga secara teoritis periode orbit seharusnya meningkat seiring berlangsungnya transfer massa. Namun, hasil observasi jangka panjang DN Ori masih menyisakan ketidakpastian terkait laju transfer massa dan arah perubahan periode orbit, sehingga memerlukan kajian lebih lanjut.

Berbagai perangkat lunak telah dikembangkan untuk memodelkan evolusi bintang tunggal maupun ganda, seperti STAREVOL, BINSTAR, dan EV/STARS. Dari berbagai opsi yang tersedia, MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*) menjadi salah satu yang paling akurat karena kemampuannya dalam memodelkan proses kompleks seperti transfer massa dan kehilangan massa (Paxton dkk., 2010). MESA telah terbukti andal dalam berbagai studi evolusi bintang, baik dengan membandingkan hasil simulasi terhadap data asteroseismologi (Schindler dkk., 2015). maupun dengan menghasilkan trek evolusi bintang yang dapat divalidasi melalui diagram HR observasi (Kippenhahn dkk., 2013).

Penelitian sebelumnya oleh Kamal (2014) telah mencoba memodelkan sistem DN Orionis dengan fokus pada evolusi bintang sekunder. Namun, studi tersebut belum mengevaluasi perubahan evolusi bintang primer secara terperinci, sehingga dinamika interaksi keduanya belum tergambarkan secara komprehensif (Kamal dkk., 2014). Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan evolusi kedua komponen DN Orionis secara simultan dengan bantuan MESA, untuk menilai kesesuaian hasil simulasi dengan observasi serta menjawab ketidakpastian mengenai parameter orbit dan fenomena transfer massa pada sistem ini.

METODE

Penelitian ini adalah penelitian kuantitatif dengan pendekatan komputasional-simulatif (eksperimental numerik) yang dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak MESA (*Modules for Experiments in Stellar Astrophysics*) yang diinstal pada sistem operasi Linux di komputer laboratorium bumi dan antariksa pada tahun 2024 sampai 2025. 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.

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. 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 - 5 massa Matahari, sedangkan bintang primer (penerima) memiliki massa dalam rentang 1 - 10 Massa Matahari (Pustyl'nik & 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 $1,8 M_{\odot}$, massa bintang primer dipilih sebesar $3,1 M_{\odot}$, 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).

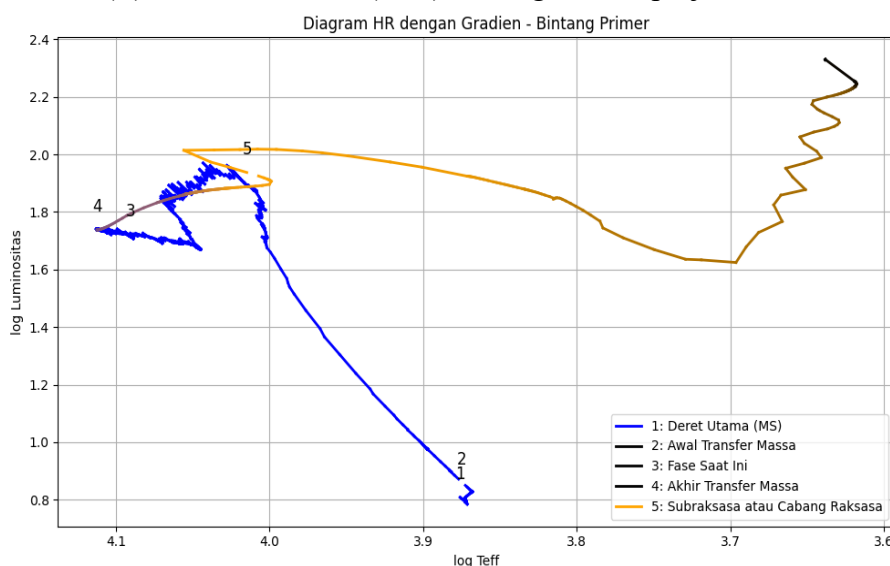
Setelah simulasi dijalankan, MESA menghasilkan data output dalam bentuk berkas teks yang terstruktur. Semua data ini dicatat dalam file seperti `history.data`, `binary_history.data`, dan `profile.data`. File `history.data` menyimpan data evolusi dari masing-masing bintang, sedangkan `binary_history.data` 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. 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. Plotting ini membantu dalam mengidentifikasi peristiwa penting seperti awal transfer massa, perubahan periode orbit, dan fase akhir evolusi masing-masing komponen bintang.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari penelitian simulasi DN Orionis terbagi ke beberapa diagram dan grafik. Seperti diagram HR, grafik massa terhadap waktu, grafik radius terhadap waktu, grafik laju transfer massa, periode sistem dan struktur internal bintang.

Diagram Hertzsprung-Russell

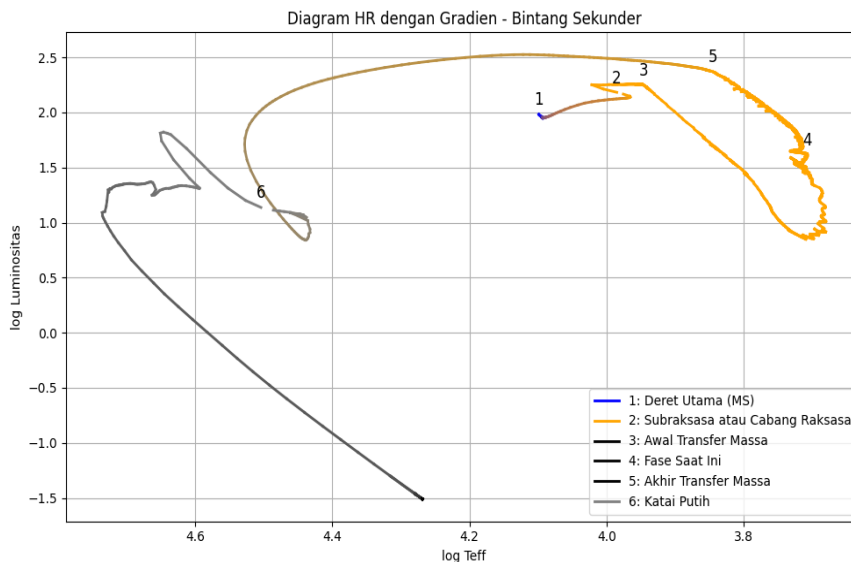
Diagram Hertzsprung-Russell (HR) bintang primer dalam sistem DN Orionis menunjukkan evolusi luminositas (L) dan suhu efektif (T_{eff}) bintang selama perjalanan evolusinya.



Gambar 1. Diagram Hertzsprung-Russell bintang primer DN Orionis

Bintang primer dalam sistem DN Orionis memulai evolusinya pada tahap Zero Age Main Sequence (ZAMS), yaitu saat bintang pertama kali menstabilkan diri di deret utama dengan pembakaran hidrogen di inti sebagai sumber energi utamanya. Pada fase ini, luminositas dan suhu efektifnya relatif konstan, mencerminkan tahap stabil terpanjang dalam hidupnya. Seiring waktu, bintang primer mulai mentransfer massa ke pasangannya melalui mekanisme Roche lobe overflow (RLOF), menandai awal fase subraksasa dengan peningkatan luminositas. Namun, grafik evolusi menunjukkan penurunan luminositas setelahnya, yang kemungkinan disebabkan oleh perubahan struktur internal akibat kehilangan massa. Saat ini, bintang primer berada pada fase sebagai bintang A0 yang lebih panas, sedang menerima materi dari bintang sekunder melalui transfer massa, membentuk cakram akresi yang menghasilkan garis emisi dalam spektrum. Transfer massa ini menjaga luminositas tinggi yang khas dari sistem tipe Algol. Setelah transfer massa berhenti karena perubahan periode orbit yang membuat bintang tidak lagi mengisi batas Roche-nya, bintang mulai berevolusi sendiri secara terpisah dari pasangannya. Dalam fase lanjutan, bintang primer mengalami peningkatan luminositas yang drastis, menandakan peralihan menuju fase subraksasa atau bahkan cabang raksasa, akibat pembakaran hidrogen di lapisan luar inti yang menyebabkan ekspansi besar pada lapisan luarnya.

Diagram Hertzsprung-Russell (HR) bintang sekunder dalam sistem DN Orionis menunjukkan evolusi luminositas (L) dan suhu efektif (Teff) bintang selama perjalanan evolusinya.



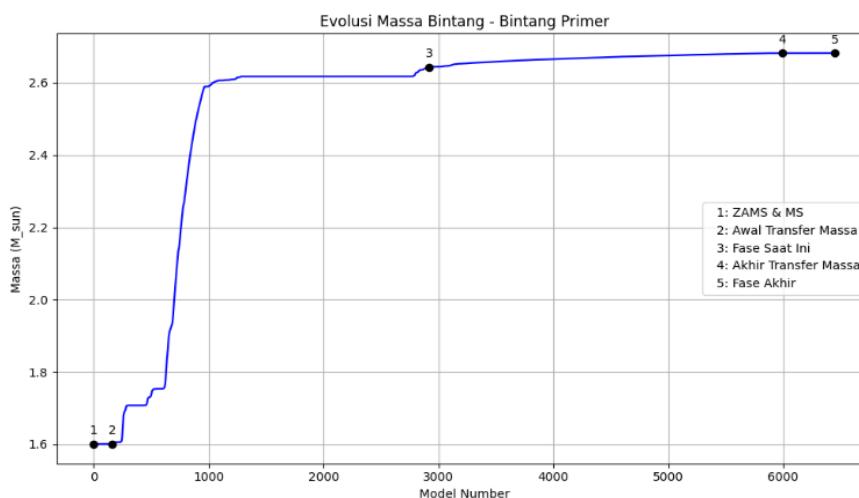
Gambar 2. Diagram Hertzsprung-Russell bintang sekunder DN Orionis

Bintang sekunder dalam sistem DN Orionis memulai evolusinya pada tahap Zero Age Main Sequence (ZAMS), yaitu saat ia mulai membakar hidrogen di inti secara stabil dan menghasilkan energi melalui fusi, menjadikannya fase terpanjang dalam hidup bintang dengan luminositas dan suhu efektif yang relatif konstan. Seiring waktu, saat hidrogen inti habis, bintang memasuki fase subraksasa, ditandai dengan peningkatan luminositas akibat pembakaran hidrogen di kulit luar inti dan ekspansi lapisan luar. Saat ini, bintang sekunder berada dalam fase raksasa G5III yang kehilangan materi karena telah melampaui batas Roche,

sehingga material mengalir ke bintang primer yang lebih panas. Luminositasnya yang tidak lazim mencerminkan evolusi sebelumnya sebagai komponen primer dalam sistem. Awal transfer massa ditunjukkan oleh penurunan luminositas, yang disebabkan oleh hilangnya massa dan penyesuaian struktur internal bintang akibat RLOF. Pada akhir fase transfer massa, bintang mengalami ekspansi maksimum dan kehilangan massa secara intens hingga akhirnya transfer berhenti, karena massa tersisa tidak cukup dan jarak antar bintang meningkat akibat penambahan periode orbit. Setelah tidak lagi mengisi batas Roche, interaksi antar bintang berhenti, dan bintang sekunder mulai berevolusi secara mandiri hingga akhirnya menjadi katai putih. Penurunan luminositas drastis menandai masuknya ke tahap ini, di mana tidak ada lagi reaksi fusi, dan cahaya yang dipancarkan hanya berasal dari pendinginan sisa panas. Hal ini menandakan tahap akhir dari evolusinya.

Evolusi Massa Bintang

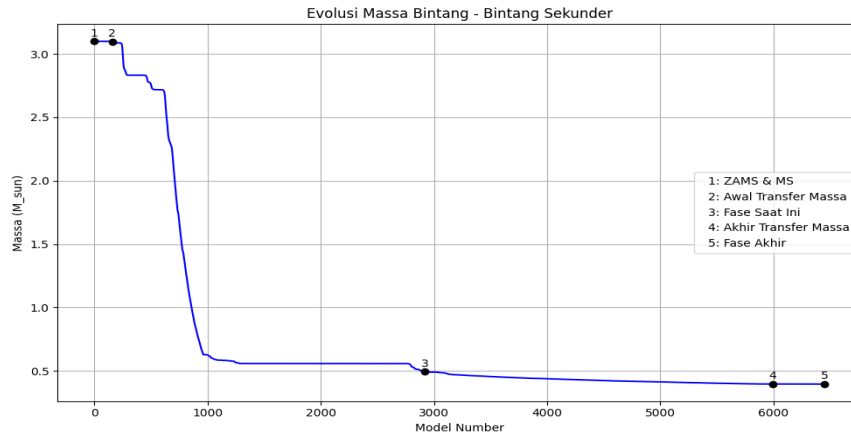
Pada grafik evolusi massa bintang primer, bintang ini awalnya memiliki massa sebesar $1,8 M_{\odot}$. Pada tahap awal evolusi, bintang berada dalam kondisi stabil sebagai bagian dari sistem bintang ganda. Namun, ketika pasangan bintangnya (yang lebih masif pada awalnya) memasuki fase evolusi lanjut dan mulai kehilangan massa, terjadi proses transfer massa. Massa dari pasangan bintang mengalir menuju bintang primer melalui aliran *Roche lobe*, sehingga bintang primer mengalami akresi massa secara signifikan. Proses transfer ini menyebabkan massa bintang primer bertambah hingga mencapai $2,9 M_{\odot}$ pada akhir proses transfer massa.



Gambar 3. Grafik evolusi massa bintang primer terhadap waktu

Pada grafik evolusi massa bintang sekunder, bintang ini awalnya memiliki massa sebesar $3,1 M_{\odot}$. Sebagai komponen yang lebih masif pada awal evolusi, bintang sekunder menjalani fase pembakaran inti hidrogen dengan stabil sebelum akhirnya memasuki fase evolusi lanjut. Ketika bahan bakar inti hidrogen mulai habis, bintang sekunder mengalami ekspansi lapisan luar dan memasuki tahap sub giant. Pada fase ini, bintang sekunder mulai kehilangan massa secara signifikan melalui proses aliran Roche lobe, di mana sebagian besar massanya ditransfer ke bintang primer. Proses transfer massa ini berlangsung secara bertahap, menyebabkan massa bintang sekunder berkurang drastis hingga mencapai $0,23 M_{\odot}$. Penurunan massa yang signifikan ini membuat bintang sekunder kehilangan kemampuan untuk mempertahankan pembakaran nuklir di inti, sehingga evolusinya berlanjut menuju tahap akhir sebagai katai putih.

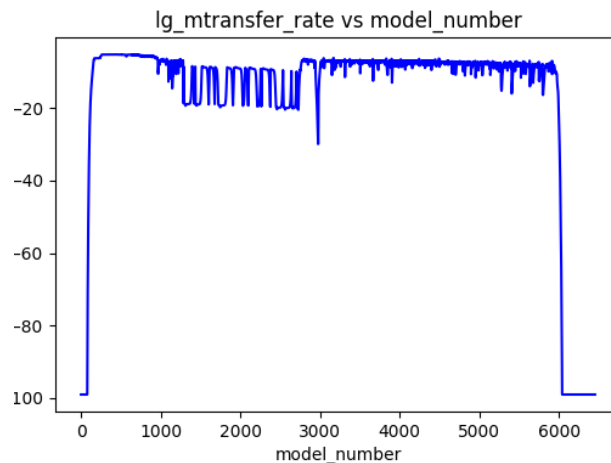
Dalam kondisi ini, bintang hanya terdiri dari inti yang sangat padat dan panas yang tersisa setelah lapisan luarnya terlepas.



Gambar 4. Grafik evolusi massa bintang sekunder terhadap waktu

Evolusi Laju Transfer Massa Bintang

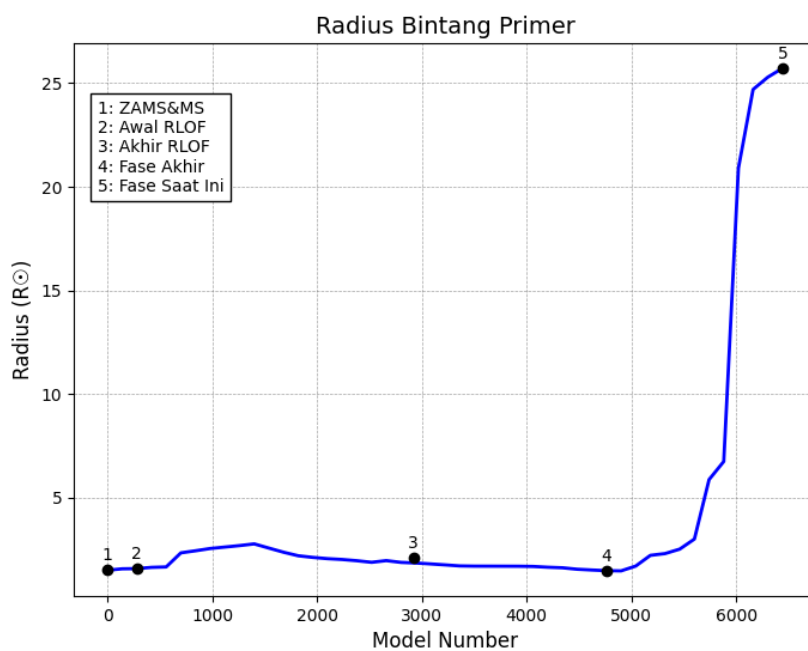
Simulasi evolusi bintang ganda DN Orionis menggunakan MESA menghasilkan profil tingkat transfer massa yang ditunjukkan pada Gambar. Pada awal evolusi, sebelum terjadi kontak, laju transfer massa sangat rendah dengan nilai sekitar $1,3 \times 10^{-10}$ massa Matahari per tahun. Ketika donor mulai meluap batas Roche lobe (RLOF), terjadi kenaikan tajam hingga mencapai puncak sekitar 0,098 massa Matahari per tahun, dengan variasi nilai antara $1,0 \times 10^{-8}$ hingga 0,1 massa Matahari per tahun. Fase ini menandai terjadinya transfer massa intensif dari bintang donor ke akretor. Setelah inversi massa tercapai, yaitu ketika bintang akretor menjadi lebih masif daripada donor, laju transfer massa menurun kembali hingga sekitar $1,3 \times 10^{-10}$ massa Matahari per tahun, yang menandakan berakhirnya fase transfer massa. Fluktuasi kecil pada fase akhir menunjukkan adanya ketidakstabilan orbit atau variasi dalam struktur bintang donor.



Gambar 5. Grafik evolusi laju transfer massa terhadap waktu

Evolusi Radius Bintang

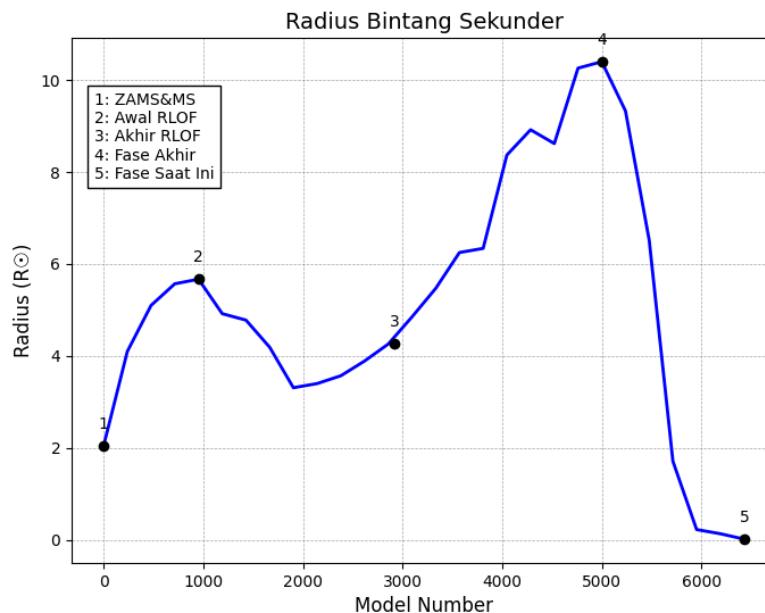
Evolusi Radius bintang primer dalam sistem bintang ganda penerima massa menunjukkan perubahan yang sangat kompleks, mencerminkan dampak proses transfer massa terhadap struktur bintang tersebut. Grafik di bawah menggambarkan evolusi radius bintang penerima dalam skala logaritmik, yang memberikan wawasan tentang bagaimana bintang ini beradaptasi selama fase-fase kritis evolusinya, termasuk saat menerima massa dari bintang donor melalui mekanisme *Roche Lobe Overflow* (RLOF). Pada awal evolusi, radius bintang primer relatif stabil dengan nilai sekitar $1,5 R_{\odot}$. Ketika RLOF pertama kali terjadi pada radius $1,58 R_{\odot}$, bintang mulai menerima massa dari bintang donor. Proses ini menyebabkan ekspansi bertahap pada radius bintang, hingga mencapai $2,772 R_{\odot}$. Setelah fase ekspansi awal, radius bintang primer mengalami kontraksi yang perlahan. Radius turun dari $2,772 R_{\odot}$ menuju $1,47 R_{\odot}$ saat RLOF berakhir. Namun, setelah RLOF berakhir, radius bintang penerima mulai meningkat kembali. Radiusnya bertambah secara signifikan dari $1,702 R_{\odot}$ hingga mencapai $25,72 R_{\odot}$.



Gambar 6. Grafik evolusi radius bintang primer terhadap waktu

Evolusi radius bintang sekunder dalam sistem bintang ganda menunjukkan perubahan signifikan selama siklus kehidupannya, terutama ketika terjadi fenomena transfer massa melalui mekanisme *Roche Lobe Overflow* (RLOF). Pada awal evolusi, radius bintang sekunder mengalami peningkatan bertahap, dari nilai awal sekitar $2,05 R_{\odot}$ hingga mencapai puncaknya sebelum masuk ke fase RLOF pertama pada $5,67 R_{\odot}$. Setelah melewati fase RLOF, radius bintang mengalami fluktuasi akibat redistribusi massa dan energi. Fluktuasi ini terlihat dari

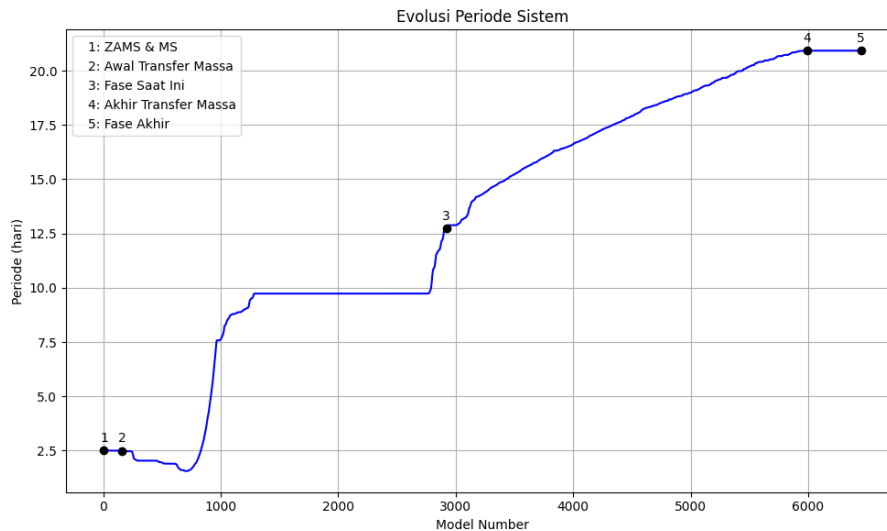
penurunan radius hingga mencapai nilai minimum 3,31 R_{\odot} yang diikuti oleh peningkatan kembali hingga sekitar 6,34 R_{\odot} . Setelah fase akhir, radius bintang menurun secara drastis, yang menandai akhir dari fase utama evolusinya. Radius turun hingga mencapai nilai yang sangat kecil, yaitu 0,0174 R_{\odot} .



Gambar 7. Grafik evolusi radius bintang sekunder terhadap waktu

Perubahan Orbital Bintang

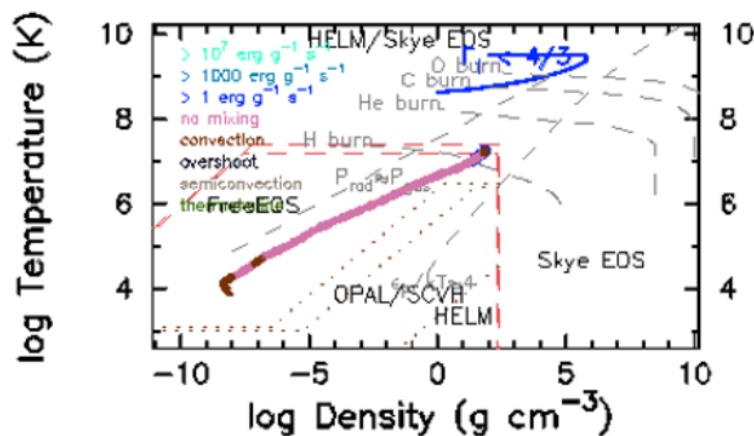
Evolusi periode orbital sistem ditunjukkan pada Gambar. Pada tahap awal (ZAMS dan Main Sequence), periode orbit kedua bintang sekitar 2,5 hari. Ketika donor lebih masif ($q > 1$), transfer massa awal menyebabkan penyusutan periode orbit. Setelah sistem memasuki fase transfer massa utama dan terjadi inversi massa ($q < 1$), orbit mulai mengalami pemuaian. Hal ini sejalan dengan teori bahwa transfer massa dari bintang lebih ringan ke yang lebih masif akan memperlebar orbit (Eggleton, 2006). Pada akhir simulasi, periode orbit sistem mencapai sekitar 20 hari. Dengan demikian, DN Orionis memperlihatkan evolusi orbit dalam dua fase utama: penyusutan saat donor lebih masif, dan pemuaian setelah inversi massa tercapai.



Gambar 8. Grafik evolusi periode orbit bintang

Evolusi Struktur Internal Bintang Primer

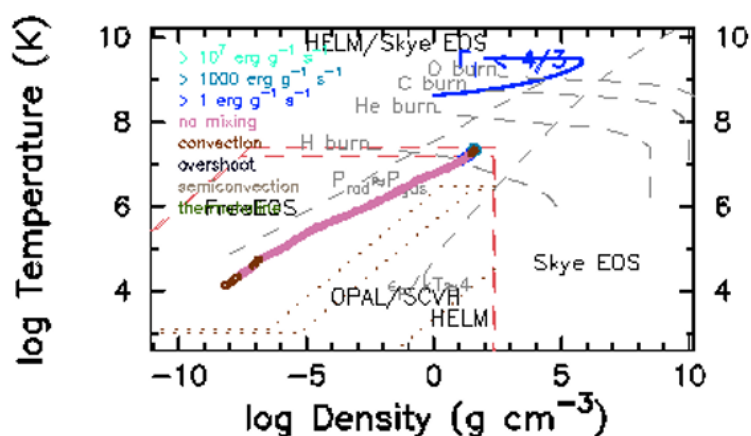
Grafik hubungan temperatur dan densitas bintang primer menunjukkan evolusi kondisi fisis di dalam bintang. Pada grafik ini, terdapat zona konveksi kecil di bagian terdalam bintang, yang ditandai oleh perubahan mendadak pada pola kurva. Mayoritas wilayah interior bintang menunjukkan sifat tidak mengalami pencampuran (*non-mixing*). Setelah zona pembakaran hidrogen (*H-burn*), terjadi zona konveksi lainnya yang bertepatan dengan zona pembakaran helium (*He-burn*). Di bagian terluar grafik, garis biru muncul yang menandakan adanya energi dengan nilai sebesar 1 erg per gram per detik, yang menunjukkan pelepasan energi dari lapisan terluar bintang.



Gambar 9. Grafik temperatur dan densitas awal transfer massa bintang primer

Pada tahap akhir transfer massa, grafik yang menggambarkan hubungan antara temperatur dan densitas memperlihatkan pola yang mirip dengan tahap awal transfer massa. Pola ini mencakup keberadaan zona konveksi kecil di bagian inti terdalam bintang, yang ditandai dengan perubahan tajam pada kurva. Sebagian besar interior bintang tetap menunjukkan karakteristik tidak bercampur (*non-mixing*). Setelah zona pembakaran hidrogen (*H-burning*), terlihat kembali zona konveksi kecil yang berhubungan dengan pembakaran helium (*He-*

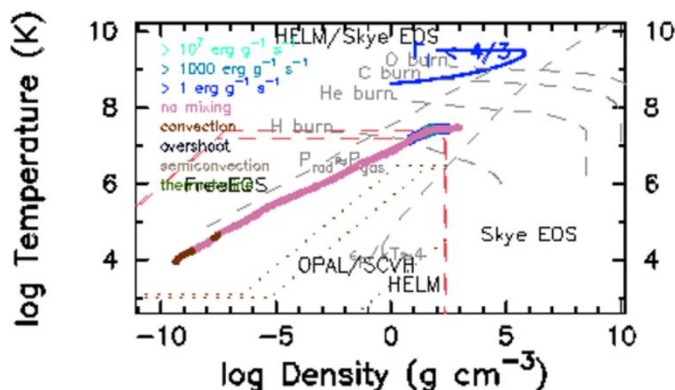
burning). Di lapisan paling luar, garis biru dengan energi sebesar 1 erg per gram per detik masih terlihat, menandakan pelepasan energi dari lapisan terluar bintang.



Gambar 10. Grafik temperatur dan densitas akhir transfer massa bintang primer

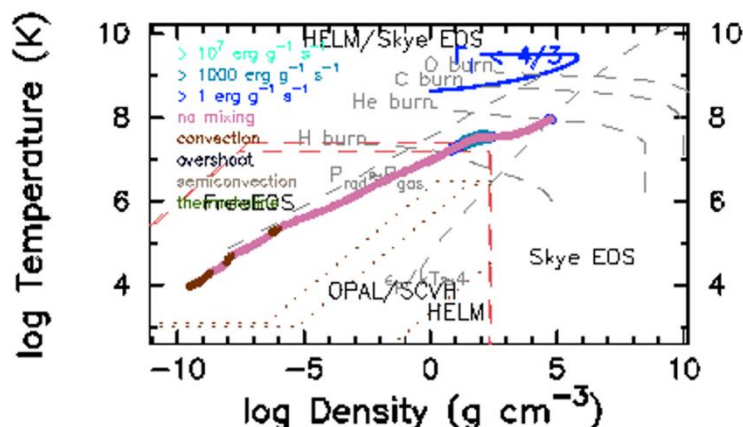
Evolusi Struktur Internal Bintang Sekunder

Grafik hubungan antara temperatur dan densitas menunjukkan pola yang konsisten dengan tahap ZAMS dan MS. Zona terdalam menunjukkan adanya konveksi kecil di inti, yang merupakan hasil dari pembakaran hidrogen pada tahap awal evolusi bintang. Di luar zona konveksi, terdapat zona konveksi kecil kembali, yang menandakan adanya pembakaran dilapisan luar bintang. Garis biru di bagian terluar grafik menunjukkan pelepasan energi dengan nilai sekitar 1 erg per gram per detik, mencerminkan radiasi dari permukaan bintang.



Gambar 11. Grafik temperatur dan densitas awal transfer massa bintang sekunder

Pada akhir transfer massa, Grafik temperatur dan densitas menunjukkan perubahan struktur dalam bintang akibat transfer massa. Di bagian inti, terdapat zona pembakaran helium yang ditunjukkan oleh garis "He burn." Kurva temperatur-densitas menunjukkan peningkatan densitas di bagian inti dan transisi yang lebih curam menuju lapisan luar, yang merupakan hasil dari massa yang hilang akibat transfer ke bintang primer. Zona konveksi tetap terbatas di inti dengan pengaruh minim di lapisan luar.



Gambar 12. Grafik temperatur dan densitas akhir transfer massa bintang sekunder

Efek Transfer Massa Terhadap Parameter DN Orionis

Hasil penelitian mengenai evolusi sistem DN Orionis memberikan wawasan penting dalam memahami dinamika dan hasil akhir dari sistem bintang ganda tipe Algol. DN Orionis, sebagai contoh sistem yang mengalami transfer massa, menegaskan peran krusial dari proses tersebut dalam membentuk karakteristik akhir kedua komponen bintang dan konfigurasi sistem secara keseluruhan. Transfer massa dari bintang sekunder ke bintang primer tidak hanya mengubah massa masing-masing bintang, tetapi juga memengaruhi struktur internal dan jalur evolusi mereka.

Berdasarkan simulasi MESA, massa bintang primer meningkat dari $1,8 M_{\odot}$ menjadi sekitar $2,8 M_{\odot}$, sementara massa bintang sekunder menurun drastis dari $3,1 M_{\odot}$ menjadi $0,34 M_{\odot}$. Hasil ini sejalan dengan tren observasi, di mana $M_1 \approx 2,80 M_{\odot}$ dan $M_2 \approx 0,34 M_{\odot}$. Dari sisi orbit, periode sistem berevolusi dari 2,5 hari pada awal ZAMS menjadi sekitar 13 hari pada fase saat ini, cukup dekat dengan periode hasil pengamatan yaitu 12.96 hari.

Tabel 1. Perbandingan hasil model dengan observasi

Parameter	Simulasi (fase saat ini)	Observasi (Literatur)	Selisih
$M_1 (M_{\odot})$	2,8	2,8	0,01>
$M_2 (M_{\odot})$	0,34	0,34	0,01>
$R_1 (R_{\odot})$	2,02	2,36	0,34
$R_2 (R_{\odot})$	6,34	6,66	0,32
P (hari)	13	12.96	0,04

Dari tabel terlihat bahwa model mampu menangkap konfigurasi umum DN Orionis, terutama pada massa primer dan periode orbit. Namun, radius bintang primer dan suhu efektif menunjukkan selisih yang lebih besar dibandingkan hasil observasi. Perbedaan ini dapat ditelusuri ke sejumlah faktor, seperti asumsi konservatif pada transfer massa ($\beta = 1$), yang mengabaikan kemungkinan hilangnya massa ke luar sistem, serta efek hilangnya momentum sudut akibat pembuangan massa. Selain itu, ketidakpastian dalam pengukuran observasional, khususnya radius dan suhu efektif, dapat pula menjadi penyebab selisih tersebut.

Tabel 2. Detail Perubahan Parameter Sistem DN Orionis

Fase	Umur (Tahun)	P (hari)	M1 (M \odot)	M2 (M \odot)	R1 (R \odot)	R2 (R \odot)	Teff1 (K)	Teff2 (K)
ZAMS & MS	$7,73 \times 10^{-4}$	2,5	1,8	3,1	1,5	2,05	7450	12407
Awal RLOF	$3,05 \times 10^{-8}$	2,5	1,8	3,098	1,58	5,67	7493	8824
Fase Saat Ini	$3,08 \times 10^{-8}$	13	2,8	0,34	2,02	6,34	12195	5123
Akhir RLOF	$3,11 \times 10^{-8}$	20,9	2,9	0,23	1,47	10,4	12947	7277
Fase Akhir	$7,2 \times 10^{-8}$	20,9	2,9	0,23	25,72	0,0174	4878	18603

SIMPULAN

Proses transfer massa yang terjadi dalam sistem bintang ganda DN Orionis memiliki peran penting dalam membentuk evolusi sistem ini secara keseluruhan. Pada awalnya, DN Orionis terdiri dari bintang primer bermassa lebih kecil ("1,8" "M" " \odot ") dan bintang sekunder yang lebih masif ("3,1" "M" " \odot "), dengan periode orbit singkat (2,5 hari). Transfer massa melalui overflow Roche-Lobe (RLOF) menyebabkan material dari bintang sekunder berpindah ke bintang primer, sehingga massa bintang primer meningkat menjadi "2,9" "M" " \odot ", sedangkan massa bintang sekunder menurun drastis menjadi "0,23" "M" " \odot ". Transfer massa ini menghasilkan perubahan signifikan dalam parameter fisik kedua komponen bintang dan dinamika orbital sistem. Periode orbit meningkat menjadi 20,9 hari sebagai konsekuensi redistribusi momentum sudut akibat transfer massa. Selain itu, bintang sekunder yang kehilangan hampir seluruh massanya berevolusi menjadi objek kecil yang sedang mengalami transisi menuju fase katai putih, dengan suhu efektif yang jauh lebih tinggi dibandingkan bintang primer.

REFERENCES

- Aitken, R.G. (1935). Binary Stars. *Nature*, 136(3441), 590–591. <https://doi.org/10.1038/136590a0>
- Avvakumova, E.A., Malkov, O.Yu., & Kniazev, A.Yu. (2013). Eclipsing variables: Catalogue and classification. *Astronomische Nachrichten*, 334(8), 860. <https://doi.org/10.1002/asna.201311942>
- Clayton, D.D. (1968). *Principles of Stellar Evolution and Nucleosynthesis*. University of Chicago Press.
- Eggleton, P.P. (1983). Approximations to the radii of Roche lobes. *The Astrophysical Journal*, 268, 368–369. <https://doi.org/10.1086/160960>
- Eggleton, P.P. (2006). *Evolutionary Processes in Binary and Multiple Stars*. Cambridge University Press.
- Eggleton, P.P., & Kiseleva-Eggleton, L. (2002). The Evolution of Cool Algols. *The Astrophysical Journal*, 575(1), 461–473. <https://doi.org/10.1086/341215>
- Etzel, P.B., & Olson, E.C. (1995). DN Orionis: A Long-Period Mass-Transferring ‘‘Slightly Detached’’ Algol Binary. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 110, 1809. <https://doi.org/10.1086/117652>
- Heger, A., Fryer, C.L., Woosley, S.E., Langer, N., & Hartmann, D. H. (2003). How Massive Single Stars End Their Life. *The Astrophysical Journal*, 591(1), 288–300. <https://doi.org/10.1086/375341>
- Iben, I., Jr. (1991). Single and Binary Star Evolution. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 76, 55-122. <https://doi.org/10.1086/191565>

- Kamal, M.A., Prabowo, S., & Fitriyani, R. (2014). Pemodelan struktur dan evolusi sistem bintang ganda dekat tipe Algol (Skripsi sarjana, Universitas Islam Negeri Sunan Kalijaga Yogyakarta).
- Kippenhahn, R., Weigert, A., & Weiss, A. (2013). *Stellar Structure and Evolution* (2nd ed.). Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3>
- Kolb, U., & Ritter, H. (1990). A comparative study of the evolution of a close binary using a standard and an improved technique for computing mass transfer. *Astronomy and Astrophysics*, 236, 385–392.
- Kounkel, M., Statti, M., Kulkarni, A., Stassun, K. G., & Sun, M. (2024). Stellar properties of an actively accreting Algol-type eclipsing binary 2M16212643+2136590. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 527(2), 3806–3817. <https://doi.org/10.1093/mnras/stad3439>
- McKee, C.F., & Ostriker, E.C. (2007). Theory of Star Formation. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 45(1), 565–687. <https://doi.org/10.1146/annurev.astro.45.051806.110602>
- Miller Bertolami, M.M. (2016). New models for the evolution of post-asymptotic giant branch stars and central stars of planetary nebulae. *Astronomy & Astrophysics*, 588, A25. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201526577>
- Nelson, C.A., & Eggleton, P.P. (2001). A Complete Survey of Case A Binary Evolution with Comparison to Observed Algol-type Systems. *The Astrophysical Journal*, 552(2), 664–678. <https://doi.org/10.1086/320560>
- Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., Herwig, F., Lesaffre, P., & Timmes, F.X (2010). Modules for experiments in stellar astrophysics (MESA). *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 192(1), 3. <https://doi.org/10.1088/0067-0049/192/1/3>
- Peters, G.J. (2001). The Algol-Type Binaries. In D. Vanbeveren (Ed.), *The Influence of Binaries on Stellar Population Studies*, 264, 79. https://doi.org/10.1007/978-94-015-9723-4_6
- Podsiadlowski, P., Joss, P.C., & Hsu, J.J.L. (1992). Presupernova Evolution in Massive Interacting Binaries. *The Astrophysical Journal*, 391, 246. <https://doi.org/10.1086/171341>
- Pols, O. R. (2011). *Stellar structure and evolution*. Astronomical Institute, Utrecht University. <https://books.google.co.id/books?id=sawHtAEACAAJ>
- Pustyl'nik, I., & Glazunova, L. (2003). Mass transfer and loss in binary stars. *Astronomy Reports*, 47(1), 53–66. <https://doi.org/10.1134/1.1536965>
- Ritter, H. (1988). Turning on and off mass transfer in cataclysmic binaries. *Astronomy and Astrophysics*, 202, 93–100.
- Schindler, J.T., Green, E.M., Arnett, W.D., & Townsend, R.H.D. (2015). MESA models of subdwarf B stars and g-mode pulsations. *The Astrophysical Journal*, 806(2), 178. <https://doi.org/10.1088/0004-637X/806/2/178>
- Shu, F.H., Adams, F.C., & Lizano, S. (1987). Star formation in molecular clouds: observation and theory. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 25, 23–81. <https://doi.org/10.1146/annurev.aa.25.090187.000323>
- van Rensbergen, W., Mennekens, N., de Greve, J.P., Jansen, K., & de Loore, B. (2011). Evolutionary models of binaries. Dalam C. Neiner, G. Wade, G. Meynet, & G. Peters (Ed.), *Active OB Stars: Structure, Evolution, Mass Loss, and Critical Limits*, 272, 486–491. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/S1743921311011136>
- Woosley, S.E., Heger, A., & Weaver, T.A. (2002). The evolution and explosion of massive stars. *Reviews of Modern Physics*, 74(4), 1015–1071. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.74.1015>