

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Bintang adalah “atom” alam semesta (Palmerini, 2023). Bintang lahir dari awan gas antar bintang (molekuler), yang hidup dalam jangka waktu tertentu dengan suplai energi internal-nya dari hasil fusi nuklir dalam interior bintang. Fusi nuklir pada bintang menjadi salah satu penentu bintang bisa berevolusi dan berakhir mati ketika suplai energi tersebut habis (Padoan et al., 2012; Palmerini, 2023).

Evolusi bintang umumnya dipengaruhi oleh tiga parameter utama, yaitu masa awal ( $M_i$ ), metalitas ( $Z$ ), dan laju rotasi (Gao et al., 2018; Kashino et al., 2022). Studi evolusi bintang merupakan salah satu elemen yang penting dalam mempelajari evolusi bintang. Evolusi bintang digambarkan menggunakan diagram Hertzsprung-Russell (HR). Diagram HR dikemukakan oleh Hertzsprung dan Russell, dimana diagram ini menunjukkan hasil *track* bintang selama berevolusi dengan relasi antara luminositas ( $L$ ) dan temperatur efektif ( $T_{\text{eff}}$ ). Pada diagram HR pulau identifikasi berbagai jenis bintang dan fase-fase apa saja yang dilalui selama evolusi-nya, yaitu *Main Sequence*, *Red Giants Branch*, *Horizontal Branch*, *Asymptotic Giant Branch*, *White Dwarf*, dll (Bono et al., 2020; LeBlanc, 2010).

Fase evolusi yang akan dibahas pada penelitian ini adalah fase *Asymptotic Giant Branch* (AGB). Fase AGB merupakan fase evolusi terakhir dari bintang bermassa rendah-menengah ( $M_i \leq 8M_{\odot}$ ). Fase evolusi ini sangat penting bagi bintang dengan massa rendah-menengah karena menjadi fase peralihan (kehilangan massa) sebelum evolusinya berlanjut menuju jalur fase pasca-AGB, planetary nebula, dan berakhir pada jalur pendinginan katai putih. Hasil evolusi dari fase transisi ini memungkinkan bintang akan berakhir menjadi bintang katai putih Helium (*He White Dwarf*), Karbon-Oksigen (*CO White Dwarf*), ataupun Oksigen-Neon (*ONe White Dwarf*) tergantung massa awal serta kelimpahan unsur-unsur elemen fusi nuklir pada interior bintang (den Hartogh et al., 2019; Limongi et al., 2025; Miller Bertolami, 2016; Salaris et al., 2014).

Fase AGB ini merupakan fase yang menarik untuk dikaji karena memiliki beberapa fenomena yang unik (Lamers & M. Levesque, 2017), salah satunya yang akan dibahas pada penelitian ini yaitu fenomena *dredge-up*. Fenomena ini terjadi ketika elemen pembakar pada bintang dibawa ke permukaan melalui proses pencampuran yang didorong oleh konveksi (Tosi et al., 2022). Proses pencampuran ini memperkaya fotosfer bintang dengan mentransformasikan elemen pembakar bintang dari atmosfer yang kaya akan oksigen dengan rasio C/O <1 (*O-rich*) menjadi atmosfer yang kaya akan karbon (*C-rich*) dengan rasio C/O >1 (Kamath & Van Winckel, 2022; Lee, 2023). Selama fenomena tersebut berlangsung akan membuat mantel terluar (*surface*) dari bintang menjadi sangat terang dan membesar, sementara atmosfernya mengalami penurunan suhu yang terjadi dalam siklus berulang. Sementara itu, elemen pembakar bintang akan sebagai syarat untuk menentukan inti bintang AGB akan berakhir menjadi apa seperti yang dijelaskan pada paragraph sebelumnya (Habing & Olofsson, 2004; Höfner & Freytag, 2020).

Pengaruh *dredge-up* pada dasarnya akan sangat krusial karena dapat memberikan dampak di beberapa aspek. Tiga diantaranya adalah jejak evolusi bintang

pada diagram HR, kelimpahan unsur kimia di permukaan bintang dan penentuan inti bintang (Bono et al., 2020; Fadeyev, 2019). Namun, hingga saat ini mekanisme kehilangan massa dengan pengaruh fenomena *dredge-up* masih belum dipahami sepenuhnya sehingga menjadi tantangan yang belum terpecahkan oleh para astronom (Lattanzio, 1993; Uttenhaler et al., 2019).

Berbagai metode komputasi telah dikembangkan untuk menelusuri peran *dredge-up* dalam menentukan nasib akhir evolusi bintang pada fase AGB. Salah satu contohnya adalah penelitian yang dilakukan oleh Addari et al., (2025), yang membandingkan variasi parameter bebas *overshooting* ( $f_{ov}$ ), yaitu sejauh mana material dalam bintang melampaui batas konvektifnya. Penelitian ini juga mengkaji hal serupa, namun menggunakan perangkat lunak evolusi bintang lain, yaitu *Modules for Experiment in Stellar Astrophysics* (MESA). MESA adalah perangkat lunak *open-source* yang sering digunakan untuk simulasi evolusi bintang.

Penelitian ini akan menelusuri jejak evolusi bintang massa rendah dengan menggunakan kode program evolusi bintang mesa-r24.03.1. Model yang dihasilkan dari program ini kemudian digunakan untuk menyelidiki bagaimana pengaruh efisiensi variasi *overshooting* mempengaruhi fenomena *dredge-up* terhadap kehilangan massa bintang pada fase AGB sehingga mempengaruhi parameter fisis pada evolusi bintang rendah.

## 1.2 Teori

### 1.2.1 Evolusi alam semesta

Alam semesta sebagai “ruang hampa luas dan besar” diyakini berasal dari sebuah mekanisme. Mekanisme ini dikenal sebagai istilah teori *Big Bang*. Mekanisme ini bercerita bagaimana ledakan dari sebuah titik yang super padat dapat menjadi awal dari pembentukan alam semesta. Artinya, dimensi waktu (t) baru dimulai dari ledakan titik super padat ini pertamanya kali terjadi atau ketika  $t = 0$ .

Pada interval waktu 0 hingga  $10^{-43}$  detik, terjadi penyatuan empat gaya fundamental (gravitasi, nuklir lemah, nuklir kuat, dan elektromagnetik) menjadi satu gaya tunggal akibat suhu ekstrem sekitar  $10^{32}$  Kelvin. Periode ini dikenal sebagai era Planck. Seiring penurunan suhu hingga rentang  $10^{29}$  hingga  $10^{22}$  Kelvin, gaya nuklir kuat terpisah dari gaya tunggal, sementara gaya nuklir lemah mendominasi, menyebarkan partikel fundamental secara merata dalam peristiwa yang disebut era Inflasi, yang berlangsung antara  $10^{-36}$  hingga  $10^{-32}$  detik. Ketika suhu terus turun hingga  $10^{15}$  Kelvin, gaya nuklir lemah terpisah, memicu pembentukan medan Higgs pada waktu antara  $10^{-32}$  hingga  $10^{-12}$  detik. Dalam rentang  $10^{-12}$  hingga 10 detik, medan Higgs memberikan massa pada partikel, yang memungkinkan terbentuknya hadron. Alam semesta saat itu didominasi oleh plasma Quark-Gluon (era Quark), di mana quark dan gluon bergabung membentuk hadron dan anti-hadron (era Hadron). Proses ini kemudian meninggalkan lepton (seperti elektron, muon, dan neutrino) serta antilepton, menandai era Lepton dalam sejarah awal alam semesta.

Pada interval waktu 10 detik hingga 17 menit, proton dan neutron bergabung dengan elektron melalui fusi nuklir untuk membentuk inti atom seperti  ${}^1_1\text{H}$ ,  ${}^2_1\text{H}$ ,  ${}^3_2\text{He}$ ,  ${}^4_2\text{He}$  dan  ${}^7_3\text{Li}$ . Inti atom ini tersebar di alam semesta dalam bentuk plasma, menandai era Nucleosintesis. Selanjutnya, pada interval waktu 17 menit hingga 150 juta tahun, proses nukleosintesis dan fusi nuklir berhenti saat rasio hidrogen terhadap helium

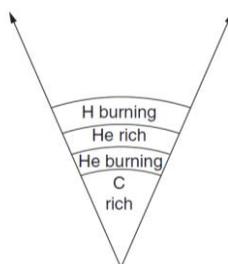
mencapai 3:1. Energi yang dilepaskan dalam bentuk foton mendominasi alam semesta, sehingga periode ini disebut era Foton. Ketika elektron mulai bergabung dengan inti atom untuk membentuk atom netral pada keadaan dasar, terjadi pelepasan foton dalam jumlah besar. Foton-foton ini, yang kini telah bergeser merah (*redshift*) menjadi gelombang mikro, menandai era Rekombinasi. Di antara era Foton dan era Rekombinasi, terjadi era Dark Ages, ketika alam semesta hanya berisi hidrogen netral tanpa cahaya tampak, hingga bintang pertama mulai terbentuk.

Pada interval waktu 200 Myr hingga 1 Gyr, dimulailah era Reionisasi, yang ditandai dengan pembentukan galaksi dan bintang-bintang pertama yang mengionisasi alam semesta. Pada era ini, pembentukan galaksi-galaksi muda, kuasar, dan objek-objek astronomis lainnya terjadi, yang kemudian berkembang menjadi struktur skala besar seperti Galaksi Andromeda, Bima Sakti, dan galaksi lainnya yang kita amati saat ini. Era *Today* atau Saat Ini dimulai dari interval waktu 1 Gyr hingga 13,8 Gyr. Pada era ini, salah satu jejak yang dapat diamati dari masa awal alam semesta adalah *Cosmic Microwave Background* (CMB), yaitu foton terjauh yang terdeteksi. Foton-foton CMB berasal dari sebuah "bola raksasa" dengan radius 46 miliar tahun cahaya, yang dikenal sebagai observable universe—volume alam semesta yang dapat diamati manusia. (Padoan et al., 2012; Palmerini, 2023; Negara et al., 2023; Tyson & Goldsmith, 2005).

### 1.2.2 Evolusi Bintang Bermassa rendah dan Fase AGB

Evolusi bintang secara dasarnya bergantung pada tiga parameter utama, yaitu massa awal, metalisitas ( $Z$ ), dan kecepatan rotasi. Selain itu, faktor mikro seperti komposisi kimia, medan magnet, dan keberadaan sistem biner juga memengaruhi jalur evolusi bintang. Di antara semua parameter tersebut, massa awal merupakan faktor paling menentukan dalam evolusi bintang.

Berdasarkan massa awal, bintang diklasifikasikan menjadi tiga kategori: bintang bermassa rendah ( $M_i \leq 2 M_{\odot}$ ), bintang bermassa menengah ( $2 M_{\odot} \leq M_i \leq 8 M_{\odot}$ ), dan bintang bermassa masif ( $M_i \geq 8 M_{\odot}$ ). Bintang bermassa rendah dan menengah akan mengalami evolusi yang mengarah pada pembentukan inti karbon-oksigen yang terdegenerasi, sehingga tidak memungkinkan terjadinya fusi nuklir lebih lanjut. Selubung luar bintang akan terlepas, membentuk *planetary nebulae* (PN), akhirnya, inti Bintang akan runtuh, menghasilkan katai putih sebagai sisa evolusi terakhir.



**Gambar 1.** Ilustrasi penyusun bintang AGB

Sebelum meledak menjadi PN dan menjadi katai putih, bintang bermassa rendah-menengah akan memasuki fase AGB. Pada fase ini, helium di inti bintang akan habis, dan inti Sebagian besar terdiri dari karbon. Inti yang kaya akan karbon ini dikelilingi oleh lapisan pembakar helium. Di atas lapisan tersebut terdapat zona kaya helium yang

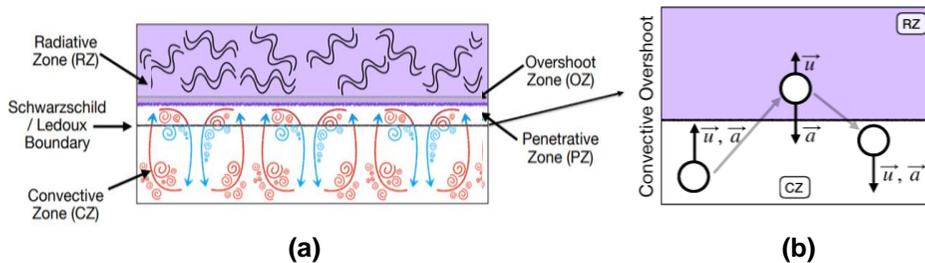
bersifat lambat secara nuklir karena suhunya belum cukup tinggi untuk memulai fusi nuklir helium. Selanjutnya, terdapat lapisan fusi nuklir hidrogen di atas zona lembam ini (dapat dilihat pada gambar 1). Inti Bintang mengalami kontraksi, sementara lapisan helium dan hydrogen terus melakukan fusi nuklir. Di sisi lain, radius bintang terus menerus, dan Bintang tetap berada di fase AGB ini selama  $2 \times 10^7$  tahun. Pada yahap ini, akhir dari fusi nuklir bintang akan terdegenerasi, dan kontraksi inti dihentikan oleh tekanan dari elektron bebas, menandai salah satu tahap akhir dalam evolusi bintang (Habing & Olofsson, 2004; Höfner & Freytag, 2020; LeBlanc, 2010).

### 1.2.3 Konveksi dan *Overshooting* pada Bintang AGB

Sebagian besar bintang, energinya ditransformasikan ke luar oleh radiasi. Ketika transformasi energi oleh radiasi tidak cukup efisien lagi pada lapisan-lapisan bintang, maka konveksi mengambil ahli peran tersebut. Hal ini dijelaskan pada kriteria *Schwarzschild* untuk memahami konsep konvektif sebagai berikut:

$$\nabla_{rad} \equiv \left| \frac{dT}{dr} \right|_{rad} < \nabla_{ad} \equiv \left| \frac{dT}{dr} \right|_{ad} \quad (1)$$

Persamaan 1 di atas, *Schwarzschild* menjelaskan bahwa sebuah lapisan gas di sebuah bintang dan diasumsikan gumpalan gas tersebut secara tidak sengaja mulai bergerak naik ke atas. Ketika gumpalan gas tersebut kembali turun, maka lapisan tersebut dikatakan stabil. Namun, jika gumpalan tersebut terus naik ( $\nabla_{rad} > \nabla_{ad}$  dimana  $\nabla_{rad}$  merupakan gradient radiative dan  $\nabla_{ad}$  merupakan gradient adiatif) maka lapisan tersebut tidak stabil dan gumpalan yang melewati batas konvektif tersebut akan dikatakan sebagai *overshooting* ( $f_{ov}$ ), ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 1 (Anders & Pedersen, 2023).



**Gambar 2.** Ilustrasi pusaran konveksi pada interior bintang (a) dan skema *overshooting* pada batas konveksi (b)

*Dredge-up* pada bintang AGB terjadi ketika elemen pembakar dibawa ke permukaan melalui proses pencampuran yang didorong oleh konveksi. Pencampuran melalui batas konvektif diimplementasikan dengan skema *overshooting*. Skema ini pada bintang AGB menggunakan rumus *exponential diffusive overshoot* oleh Herwig, (2000):

$$D(r) = D_0 \left( -2 \frac{|r - r_0|}{f_{ov} H_p} \right), \quad r_0 = r_{env} \pm f_{0,ov} H_p \quad (2)$$

dimana  $r_{env}$  merupakan koordinat radial dari batas konveksi berdasarkan kriteria Schwarzschild dan sebuah parameter bebas  $f_{ov}$ , diartikan sebagai penentu efisiensi pencampuran ekstra difusif dan dengan demikian seberapa jauh pencampuran tersebut melampaui batas konvektif. Parameter bebas kedua yaitu  $f_{0,ov}$ , dipilih sedemikian rupa sehingga peralihan dari pencampuran konvektif ke *overshoot* terjadi pada jarak  $f_{ov} H_p$  ke

dalam zona konvektif dari batas Schwarzschild dan  $H_p$  adalah ketinggian skala tekanan (Uttenthaler et al., 2019; den Hartogh et al., 2019).

#### 1.2.4 Skema *Dredge-up* selama Pulsasi Termal (TP-AGB)

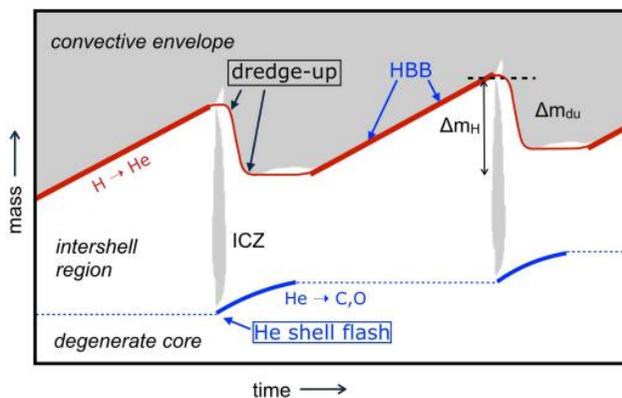
Bintang menyemburkan helium dengan kata lain *thermal pulse* atau pulsasi termal selama rentang waktu  $\sim 10^3$  sampai  $10^5$  tahun. Hal ini terjadi Ketika bintang AGB berhasil melewati fase *horizontal branch*. Pulsasi termal ini berlangsung ketika bintang menuju akhir fase AGB berulang terus-menerus dan memungkinkan terjadi *dredge-up* tiap pulsasinya (Herwig, 2000; Aadri, 2025). Peristiwa ini mereduksi massa inti bintang dan menghemburkan debu fusi nuklir helium ke lapisan terluar seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2. Efisiensi dari *dredge-up* diukur oleh parameter  $\lambda$ , diartikan sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{\Delta M_{dup}}{\Delta M_{core}} \quad (3)$$

dimana  $\Delta M_{dup}$  merupakan massa yang dibawa ke permukaan pada pulsasi termal dan  $\Delta M_{core}$  merupakan pertumbuhan massa inti selama periode *interpulse* atau keterlambatan antar pulsasi termal terjadi (Habing & Olofsson, 2004; Uttenthaler et al., 2019). Interpretasi lambda ini dapat dijelaskan sebagai berikut:

- Jika  $\lambda < 1$ , maka elemen pembakar inti hanya Sebagian yang terangkat ke lapisan bintang
- Jika  $\lambda = 1$ , maka semua elemen pembakar inti yang tumbuh akan diangkat ke lapisan luar bintang
- Jika  $\lambda > 1$ , maka elemen pembakra inti yang diangkat lebih besar dari yang diproduksi selama *thermal pulse* atau pulsasi termal

Efisiensi *dredge-up* ini sangat penting dalam memahami komposisi permukaan bintang yang seberapa kaya akan unsur pembakarnya seperti karbon, oksigen, dsb. Mempengaruhi materi yang akan dilepaskan selama akhir hidup bintang sebagai pembentukan *Planetary Nebulae* (PN). Serta, mengetahui kelimpahan unsur utama pada inti bintang sebagai penentu akhir bintang *white dwarf* (WD) apakah bintang kaya akan karbon ( $C/O > 1$ ) atau kaya akan oksigen ( $C/O < 1$ ) (Marigo, 2022; Tosi et al., 2022).



**Gambar 3.** Skema dredge-up pada dua pulsasi termal

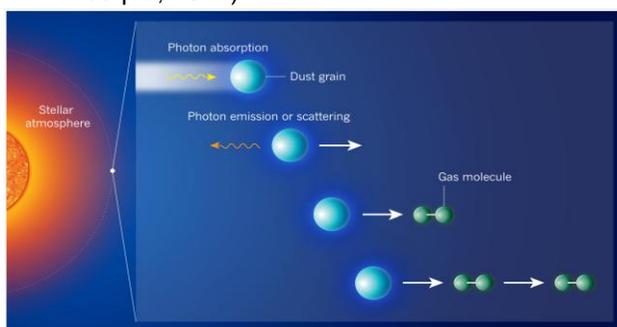
Efisiensi *dredge-up* pada persamaan 2 dan persamaan 3 diimplementasikan pada MESA dengan memasukkan parameter bebas dari *overshooting* dimana pada



kehilangan massa ini teramati besar pada bintang raksasa dan maha raksasa yang berada pada daerah “dingin” di bagian atas kanan diagram HR (RGB, AGB dan bintang massif). Jenis angin ini umumnya digunakan pada bintang AGB karena mekanismenya diperlukan pulsasi dari bintang untuk memproduksi laju kehilangan massa yang tinggi.

Skenario kehilangan massa pada bintang AGB sejatinya merupakan proses dua Langkah yang melibatkan pulsasi bintang dan fenomena konveksi (yang seperti dijelaskan pada bagian sebelumnya), sebagai langkah pertama dan sekaligus juga berperan sebagai pemicu gelombang kejut yang melontarkan material dan interior bintang, yang arahnya radial keluar bintang. Konsekuensi dari gelombang kejut yang dihasilkan oleh kedua proses ini terhadap atmosfer adalah terbentuknya lapisan atau zona kondensasi dengan densitas yang lebih rapat dimana temperaturnya cukup rendah untuk memulai proses pembentukan debu, Gambar 4 (Höfner, 2012).

Mekanisme ini membuat kecepatan angin rendah kisaran  $10 \text{ km s}^{-1}$  dari pulsasi bintang untuk menghasilkan laju kehilangan massa maksimal mencapai  $10^{-5}$  sampai  $10^{-4} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ . Adapun komposisi dari debu ditentukan oleh kelimpahan unsur relative atmosfer bintang, dimana bintang yang kaya akan karbon (*C-rich stars*) penyusun utama dari partikel debunya adalah karbon yang sifatnya amorf. Sementara itu, untuk bintang kelas M (*M-Type object*) penyusun utama dari partikel debunya adalah silikat (Lamers & M. Levesque, 2017).



**Gambar 5.** Mekanisme kehilangan massa *dust-driven winds*

### 1.3 Tujuan dan Manfaat

#### 1.3.1. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Untuk mengkaji pengaruh variasi parameter bebas *overshooting* terhadap model evolusi bintang AGB bermassa rendah dan kaitannya dengan perubahan parameter fisis lainnya.
2. Untuk mengkaji pengaruh nilai efisiensi lambda *dredge-up* sebagai syarat penentuan nasib akhir inti bintang AGB bermassa rendah.

#### 1.3.2. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui dampak dan hubungan yang dihasilkan dari variasi nilai bebas *overshooting* terhadap evolusi bintang pada fase AGB dengan parameter fisis lainnya
2. Membantu menjelaskan pengaruh *dredge-up* sebagai penentu inti bintang AGB

## BAB II

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 2.1. Studi Literatur

Pengerjaan tugas akhir ini tentunya membutuhkan sumber-sumber terpercaya sebagai bukti kejelasan dari penelitian yang diangkat penulis, salah satu caranya dengan studi literatur. Studi literatur yang dilakukan dengan mengutip sumber yang relevan dengan penulis bahas. Sumber pustaka yang dikutip dari penelitian ini antara lain berupa buku dan artikel ilmiah, terkhusus pada artikel ilmiah dan buku astrofisika. Sumber dari pemodelan dan pembahasan yang telah dilakukan sebelumnya pada pustaka-pustaka yang dibaca penulis menjadi tinjauan atau gambaran besar dari studi yang dibahas pada tugas akhir ini.

#### 2.2. Perhitungan dengan Program Komputasi Numerik

Metode komputasi numerik sebagai *tools* pemodelan evolusi bintang pada tugas akhir ini menjadi kemudahan penulis untuk mendeskripsikan fenomena yang diangkat. Pemodelan evolusi bintang untuk memperoleh diagram HR dan parameter fisis bintang lainnya dilakukan dengan menggunakan program komputasi numerik MESA. MESA yang digunakan pada penelitian ini merupakan MESA dengan versi mesa-r24.03.1 yang dirilis pada tanggal 5 Maret 2025 dan dijalankan via *docker* (NuDocker MESA).

##### 2.2.1. Modules for Experiment in Stellar Astrophysics (MESA)

*Modules for Experiment in Stellar Astrophysics* atau bisa disingkat sebagai MESA merupakan salah satu perangkat lunak *open sources* astrofisika berbasis komputasi dengan menggunakan kode pemrograman bahasa fortran 90 yang digunakan untuk memodelkan berbagai fase evolusi bintang (Jermyn et al., 2023; Paxton et al., 2011; Paxton et al., 2013; Paxton et al., 2015; Paxton et al., 2018; Paxton et al., 2019; Wolf et al., 2023). MESA memiliki beragam koleksi modul, masing-masing koleksi modulnya berfungsi untuk menyelesaikan permasalahan tertentu dengan spesifik, koleksi modul ini dapat dilihat pada Gambar 3. MESA sendiri merupakan perkembangan lebih lanjut dan lebih terperinci yang dibuat oleh Bill Paxton, dkk., dari perangkat lunak sebelumnya bernama *Evolve ZAMS* (EZ). Perkembangan perangkat lunak astrofisika ini bertarget pada kemajuan komputer modern untuk penggunaan secara independen (Paxton, 2004; Rees et al., 2023). Modul yang digunakan pada penelitian ini utamanya menggunakan modul MESA *star*, *equation of state* (EOS) dan *kap* (opasitas).

MESA dibuat dengan mengutamakan prinsip sebagai berikut:

1. *Open source*: MESA tersedia secara gratis dan umum dalam *source code* sehingga siapapun dapat mengunduh, meng*compile* dan menjalankan program sesuai dengan tujuan riset tertentu.
2. *Modularity*: dapat digunakan sendiri, berdasarkan modul.
3. *Wide applicability*: dapat digunakan untuk menghitung evolusi bintang dengan berbagai parameter, seperti bintang bermassa kecil hingga bermassa besar, bintang binar (ganda), akresi, laju kehilangan massa, dan lain sebagainya.

4. *Modern techniques*: menggunakan metode numerik yang terkini, seperti menggunakan skema interpolasi untuk orde yang lebih tinggi dibandingkan dengan kode program kode evolusi sebelumnya. Juga mendukung parameter yang diperlukan seperti atmosfer bintang, simulasi *nucleosynthesis*, simulasi angin bintang, dan *hydrodynamics*. MESA juga memasukkan aspek seperti konvektif, medan magnet, dan rotasi bintang.

Name	Type	Purpose
alert	Utility	Error handling
atm	Microphysics	Gray and non-gray atmospheres; tables and integration
const	Utility	Numerical and physical constants
chem	Microphysics	Properties of elements and isotopes
diffusion	Macrophysics	Gravitational settling and chemical and thermal diffusion
eos	Microphysics	Equation of state
interp_1d	Numerics	One-dimensional interpolation routines
interp_2d	Numerics	Two-dimensional interpolation routines
ionization	Microphysics	Average ionic charges for diffusion
jina	Macrophysics	Large nuclear reaction nets using reaclib
kap	Microphysics	Opacities
karo	Microphysics	Alternative low- $T$ opacities for C and N enhanced material
mlt	Macrophysics	Mixing length theory
mtx	Numerics	Linear algebra matrix solvers
net	Macrophysics	Small nuclear reaction nets optimized for performance
neu	Microphysics	Thermal neutrino rates
num	Numerics	Solvers for ordinary differential and differential-algebraic equations
package_template	Utility	Template for creating a new MESA module
rates	Microphysics	Nuclear reaction rates
screen	Microphysics	Nuclear reaction screening
star	Evolution	One-dimensional stellar evolution
utils	Utility	Miscellaneous utilities
weaklib	Microphysics	Rates for weak nuclear reactions

**Gambar 6.** Koleksi Modul pada MESA

Modul MESA star kode evolusi bintang satu dimensi yang dirancang untuk menangani berbagai skenario evolusi bintang, mulai dari bintang bermassa sangat rendah hingga bintang bermassa besar, termasuk tahap evolusi lanjut. MESA star menggunakan metode numerik modern untuk memodelkan fisika, struktur, dan evolusi bintang dengan menyelesaikan persamaan struktur yang terkopel secara bersamaan. Penggunaan *adaptive mesh refinement*, kontrol langkah waktu yang canggih, serta dukungan paralelisme memori bersama melalui OpenMP menjadikan MESA star sebagai alat unggulan dalam simulasi dan penyelesaian persamaan dalam studi evolusi bintang (Jones & Gore, 2015; Paxton et al., 2011).

Penelitian ini menggunakan *inlist* MESA dari Rees dkk., 2023, dengan menjalankan evolusi Bintang bermassa rendah dari *main sequence* hingga *thermal pulse asymptotic giant branch* dengan memasukkan parameter input yang digunakan dalam penelitian ini (dapat dilihat pada sub bab 2.2.3.)

### 2.2.1.1. Input MESA

Dalam menjalankan program evolusi bintang bermassa rendah dengan menggunakan *inlist* MESA ini, terbagi menjadi 6 *inlist*. Tiap *inlist* merupakan fase dari tahapan evolusi bintang, yaitu:

1. *Inlist\_Common*
2. *Inlist\_MS (Main Sequence)*
3. *Inlist\_GB (Giant Branch)*
4. *Inlist\_CHeB (Central Helium Burning)*
5. *Inlist\_EAGB (Early Asymptotic Giant Branch)*
6. *Inlist\_TPAGB (Thermal Pulse Asymptotic Giant Branch)*

Inlist yang tersedia ini akan dijalankan MESA secara berurutan. Setiap inlist tersebut berisi *namelist*, *star job*, *eos*, *kap*, dan *controls* untuk mengeksekusi program (detailnya dapat dilihat pada lampiran 1).

### 2.2.1.2. Output MESA

Keluaran MESA tersedia selama proses eksekusi program dari model evolusi bintang yang kita buat. Setelah selesai, data-data keluaran ini bakal otomatis tersimpan pada lokasi folder yang sudah ditentukan sebelumnya (dapat dilihat pada lampiran 2). Keluaran dari MESA sendiri tersimpan pada folder *logs* yang berisi dua file, yaitu *history file* dan *profile file*.

*History file* tersimpan sebagai *history.data*, dimana file ini merupakan data utama dari evolusi bintang yang berisi hasil eksekusi pemodelan pada MESA. Biasanya file ini terdiri dari massa, temperature, luminositas, umur bintang, kelimpahan unsur kimia, dsb. *Profile file* tersendiri memiliki dua file yang berbeda yaitu *profile.data* dan *profile.index*. *profile.data* berisi data yang lebih spesifik berfokus pada fusi nuklir kelimpahan unsur kimia selama evolusi bintang berlangsung. Sedangkan, *profile.index* berisi informasi perhitungan jumlah model dan jumlah *profile.data* yang dieksekusi oleh MESA.

## 2.2.2. Algoritma Angin Bintang (Kehilangan Massa)

### 2.2.2.1. Algoritma Vassiliadis & Wood

Pada penelitian ini, salah satu algoritma yang digunakan pada jenis angin bintang yang dijelaskan sebelumnya yaitu pulsasi Miras dan bintang AGB oleh *Vassiliadis & Wood*, 1993. Algoritma ini digunakan oleh *Vassiliadis & Wood* untuk meneliti bintang MIRAS dimana bintang ini berada pada fase ABG hingga saat ini. *Vassiliadis & Wood* memperoleh persamaan kehilangan massa dari fluks inframerah yang diamati dari angin berdebu dalam kasus ini yaitu pada bintang MIRA.

Algoritma oleh *Vassiliadis & Wood* ini menyajikan dua persamaan untuk kondisi massa awal bintang yang berbeda yaitu (Rees et al., 2023; *Vassiliadis & Wood*, 1993):

$$\log \dot{M} (M_{\odot} \text{yr}^{-1}) = -11,4 + 0,0125 \times P(\text{days}) \quad (5)$$

persamaan (5) berlaku jika pulsasi terjadi selama  $P < 600$  hari atau dengan massa awal bintang  $M_i < 2,5 M_{\odot}$ .

$$\log \dot{M} (M_{\odot} \text{yr}^{-1}) = -11,4 + 0,0125 \left[ P(\text{days}) - 100 \left( \frac{M_i}{M_{\odot}} - 2,5 \right) \right] \quad (6)$$

persamaan (6) berlaku jika pulsasi terjadi selama  $P < 600$  hari atau dengan massa awal bintang  $M_i > 2,5 M_{\odot}$ .

$$\dot{M} = \frac{L}{c v_{exp}}, \quad v_{exp} (kms^{-1}) = -13,5 + 0,056 \times P(\text{days}) \quad (7)$$

memperoleh nilai pulsasi pada bintang, digunakan persamaan berikut

$$P(\text{days}) = -2,07 + 1,94 \log \left( \frac{R}{R_{\odot}} \right) - 0,9 \log \left( \frac{M_i}{M_{\odot}} \right) \quad (8)$$

Persamaan (7) berlaku pada periode pulsasi yang panjang ( $P \sim 500 - 750$  days) dengan kehilangan massa dibatasi oleh pergerakan radiasi.  $L$  merupakan luminositas matahari dinyatakan dalam  $L_{\odot}$ ,  $c$  merupakan kecepatan cahaya (dalam  $\text{km s}^{-1}$ ) serta  $v_{exp}$

merupakan kecepatan angin bintang berekspansi (dalam  $\text{km s}^{-1}$ ), dengan batasan bahwa  $v_{exp}$  berada pada rentang 3,0 – 15,0 ( $\text{km s}^{-1}$ ). Hal ini disebut sebagai batas atas (*upper limit*) kecepatan bintang dapat berekspansi yang umumnya terdeteksi pada bintang OH/IR dengan laju kehilangan massa yang sangat tinggi (Marigo et al., 1998).

### 2.2.3. Deskripsi Model Bintang

Penelitian ini akan dibuat model bintang tunggal dan tidak berotasi dengan menggunakan program kode evolusi bintang mesa r-24.03.1 versi linux. Model bintang dibuat berdasarkan penelitian Addari et al., 2025 dan implementasi penggunaan MESA dari Rees et al., 2023. Penelitian ini akan membangun model bintang dengan massa awal 0,85  $M_{\odot}$ , 1,85  $M_{\odot}$ , dan 2,85  $M_{\odot}$  dengan metalisitas seperti matahari = 0,014 serta abundansi helium = 0.234.

Model bintang akan dibangun dari fase *Main Sequence* (MS) hingga memasuki pada fase *thermal pulse* AGB (TP AGB). Pada fase TP AGB bintang akan mengalami pulsasi selama masa hidupnya sebelum berakhir “meledak” menjadi *planetary nebulae* (PN) dan mengalami kehilangan massa melalui angin bintang (LeBlanc, 2010). Ketika nilai ini memenuhi, MESA secara otomatis akan memperlambat laju kehilangan massa pada bintang dan akan berhenti ketika memenuhi akhir pulasasi dari model tiap model yang dibuat berdasarkan persamaan 8 dan sekaligus sebagai *stopping condition* pada MESA.

Algoritma angin bintang kehilangan massa atau angin bintang ini yang akan digunakan sebagaimana yang telah dibahas pada bagian 1.2.2. Untuk massa bintang 0,85  $M_{\odot}$  dan 1,85  $M_{\odot}$  akan menggunakan persamaan 5 sedangkan untuk massa 2,85  $M_{\odot}$  akan menggunakan persamaan 6. Penelitian ini akan berfokus bagaimana jejak evolusi bintang selama fase AGB akan berpengaruh dengan mengvariasikan parameter bebas *overshooting* terutama pada bagian batas bawah dari PDCZ.

Penelitian ini menerapkan nilai efisiensi pada batas bawah PCDZ,  $f_{Pdcz} = 0,008$ . Penerapan nilai pada batas bawah PCDZ dapat mengubah kelimpahan unsur di antara cangkang fusi nuklir helium dan hidrogen (*intershell region* pada gambar 2). Serta, semburan helium karena pencampuran akan menjadi kuat. *Overshoot* di bagian bawah *convective envelope* (CE) juga berdampak pada kedalaman yang dicapai selama *dredge-up* terjadi dan dengan demikian parameter pengayaan permukaan pada elemen pembakar pada bintang,  $f_{CE} = 0,016$ . Pada MESA tertera dua parameter bebas pada *overshooting* (seperti yang dijelaskan pada bagian 2.2.3) untuk membuat efisien, kita asumsikan  $f_{ov} = 2f_{0,ov}$ , untuk setiap model massa yang berbeda.

**Tabel 1.** Model Bintang tidak berotasi  $Z = 0,014$

Model	$f_{Pdcz}$	$f_{CE}$
	$f_{ov}$	$f_{ov}$
A0.85-1	0,008	0,016
A0.85-2	0,016	0,032
A1.85-1	0,008	0,016
A1.85-2	0,016	0,032
A2.85-1	0,008	0,016
A2.85-2	0,016	0,032

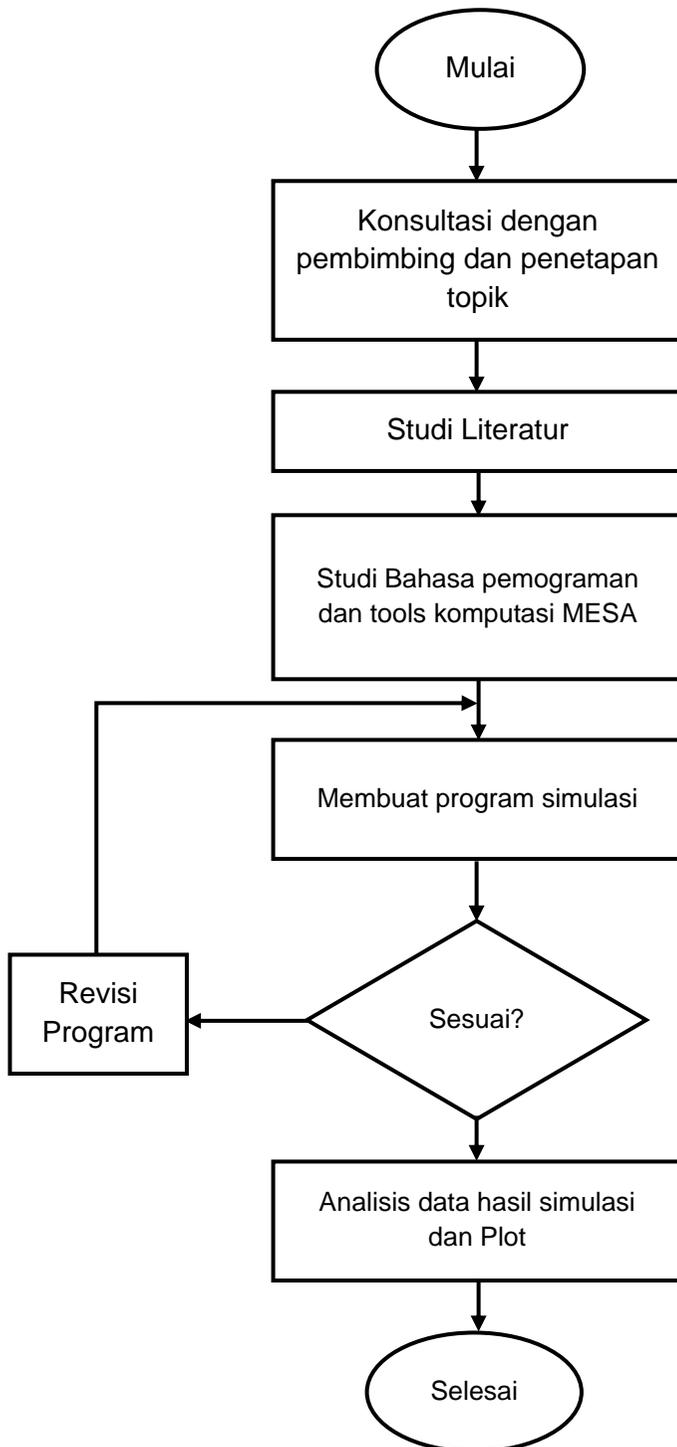
### 2.3. Alat dan Pengolahan Data

Alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. Satu set komputer dengan processor AMD Ryzen 9 5900X (12 core, 24 Threads) dengan menggunakan sistem operasi Linux (Ubuntu)
2. MESA r24.03.1 versi linux sebagai alat komputasi untuk melakukan simulasi dan menelusuri jejak evolusi bintang AGB
3. Jupyter Notebook (Python) sebagai web aplikasi untuk melakukan analisis data dan plotting beberapa grafik tertentu dari MESA.

Data hasil pemodelan evolusi bintang yang diperoleh selanjutnya akan diolah untuk mendapatkan diagram HR dan beberapa plot lainnya yang dibutuhkan untuk menjelaskan pengaruh peningkatan parameter bebas *overshooting* terhadap rumusan masalah.

## 2.4. Bagan Alir Penelitian



**Gambar 7.** Bagan Alir Penelitian