

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan negara eksportir kelapa sawit terbesar di dunia, disusul oleh Malaysia, Thailand, dan Kamboja. Keberhasilan ini tidak terlepas dari luasnya area perkebunan dan tingginya produktivitas tanaman kelapa sawit (Tiara, 2023). Berdasarkan data Kementerian Pertanian Republik Indonesia (Kepmentan No.833 Tahun 2019), luas areal perkebunan kelapa sawit di Indonesia mencapai 16,38 juta hektar yang tersebar di 26 provinsi, baik yang dikelola oleh perusahaan negara, swasta, maupun petani (Qiasa & Niswatin, 2024). Kelapa sawit merupakan komoditas strategis yang berkontribusi besar terhadap devisa negara, *Produk Domestik Bruto* (PDB) sebesar 29,67%, penyediaan lapangan kerja, dan bahan baku berbagai industri seperti pangan, kosmetik, farmasi, dan bioenergi (Purba & Ardiyanti, 2019; Nurliana dkk., 2022; Sari dkk., 2023).

Keberlanjutan industri kelapa sawit menghadapi ancaman serius akibat berbagai penyakit yang disebabkan oleh patogen. Pada fase pembibitan, jamur *Curvularia* sp. diketahui menyebabkan penyakit bercak daun yang dapat menghambat pertumbuhan bibit (Muliani dkk., 2025). Selain itu, jamur *Fusarium oxysporum* f. sp. *elaeidis* (Foe) merupakan penyebab penyakit layu Fusarium pada kelapa sawit (Fosu dkk., 2025). Namun, di antara berbagai penyakit tersebut busuk pangkal batang (BPB) yang disebabkan oleh genus *Ganoderma* yang merupakan penyakit paling penting dan merusak pada perkebunan kelapa sawit karena menyebabkan kerusakan yang progresif hingga kematian tanaman. Gejala BPB meliputi penguningan daun, nekrosis pada pelepah bagian bawah, dan pembusukan pada bagian pangkal bonggol tanaman (Mahmud dkk., 2026). Beberapa spesies dari genus *Ganoderma* yang telah dikaitkan dengan penyakit busuk pangkal batang pada kelapa sawit, yaitu *G. applanatum*, *G. boninense*, *G. zonatum*, *G. chalceum*, *G. lucidum*, *G. miniatocinctum*, *G. ryvardenii*, *G. pseudoferrum*, dan *G. tornatum* (Lekete-lawson dkk., 2025). Namun, spesies *G.*

boninense adalah spesies yang paling virulen dalam menyebabkan insiden penyakit busuk pangkal batang karena agresivitas dan distribusinya yang luas (Khoo & Chong, 2023; Lakshmi dkk., 2025).

Penyakit busuk pangkal batang (BPB) akibat *Ganoderma boninense* telah dilaporkan menyerang perkebunan kelapa sawit di berbagai negara penghasil kelapa sawit, meliputi negara-negara di kawasan Asia Tenggara seperti Indonesia dan Malaysia, kawasan Afrika seperti Angola, Kamerun, Ghana, Nigeria, Zambia, Sao Tome dan Principe, Tanzania, Zimbabwe, dan Republik Kongo, Kawasan Amerika tengah seperti Honduras, dan Kawasan Oseania seperti Papua Nugini (Kamu dkk., 2020). Di antara berbagai wilayah tersebut, kawasan Asia Tenggara terutama Indonesia dan Malaysia yang paling terdampak. Serangannya dapat menurunkan produktivitas hingga 80%, bahkan menimbulkan kerugian ekonomi mencapai USD 250 juta per tahun di Indonesia (Salsabila dkk., 2022). Di beberapa wilayah, seperti Sumatra Utara, sekitar 40-50% tanaman kelapa sawit dilaporkan terinfeksi setelah masa tanam 25 tahun. Dampak serupa juga dilaporkan di Malaysia, di mana penelitian pada tiga perkebunan kelapa sawit di Sabah mengestimasi kehilangan hasil panen mencapai 68,73% dalam waktu 12 bulan, dengan rata-rata kerugian ekonomi sebesar USD 4.112,78 per tahun (Kamu dkk., 2020). Besarnya dampak ekonomi dan penurunan produktivitas yang ditimbulkan menunjukkan bahwa *G. boninense* merupakan ancaman nyata terhadap keberlanjutan industri kelapa sawit.

Infeksi *G. boninense* diawali dengan kolonisasi akar kelapa sawit melalui penetrasi hifa ke dalam jaringan inang. Agar mampu berkembang di dalam jaringan tanaman, jamur menghasilkan berbagai enzim pendegradasi dinding sel atau *cell wall degrading enzymes* (CWDE) yang berperan dalam merombak komponen struktural dinding sel tanaman, terutama lignin. Di antara enzim CWDE yang dihasilkan *G. boninense*, lakase (Lac), mangan peroksidase (MnP), dan lignin peroksidase (LiP) merupakan enzim utama yang berperan dalam degradasi lignin (Bharudin dkk., 2022). MnP mengoksidasi ion Mn^{2+} menjadi Mn^{3+} yang berperan sebagai mediator degradasi lignin. LiP mengoksidasi senyawa lignin non-fenolik yang sulit terdegradasi (Nugroho

dkk., 2025). Sedangkan, lakase mengoksidasi senyawa fenolik dan non fenolik serta berperan dalam detoksifikasi senyawa pertahanan tanaman (Ramzi dkk., 2019). Aktivitas ketiga enzim tersebut menyebabkan rusaknya struktur lignin yang merupakan penghalang utama pada dinding sel tanaman. Degradasi lignin membuka akses terhadap selulosa dan hemiselulosa sehingga dapat dimanfaatkan sebagai sumber nutrisi bagi pertumbuhan jamur (Siddiqui & Ganapathy, 2024). Akibatnya mendukung pertumbuhan miselium, mempercepat kolonisasi jaringan inang, dan memperparah perkembangan penyakit (Khoo & Chong, 2023). Oleh karena itu, MnP, LiP, dan lakase merupakan target molekuler yang potensial untuk dikembangkan sebagai sasaran penghambatan dalam upaya mengendalikan penyakit busuk pangkal batang.

Hingga kini, berbagai upaya telah dilakukan untuk menekan penyebaran penyakit busuk pangkal batang. Umumnya, pengendalian ini masih bergantung pada penggunaan fungisida kimiawi seperti heksakonazol, flusilazol, siprokonazol, flutriafol, tridemorph, triadimenol, oksikardoksin, fumigant, dazomet, dan pyraclostrobin. Fungisida ini bekerja dengan cara menghambat pertumbuhan miselium jamur dan menonaktifkan produksi tubuh buah *G. boninense* (Zakaria, 2023). Meskipun memberikan efek pengendalian jangka pendek, penggunaan fungisida kimia meninggalkan residu bersifat toksik di lingkungan sekitar komunitas tanaman yang dapat mencemari tanah dan air, meracuni organisme non-target seperti serangga tanah dan serangga polinator, serta menimbulkan resistensi patogen (Angraini, 2017). Oleh karena itu, diperlukan alternatif ramah lingkungan berupa pengendalian hayati.

Salah satu pendekatan yang berkembang sebagai alternatif pengendalian ramah lingkungan adalah pemanfaatan agen biokontrol seperti bakteri endofit, yaitu bakteri yang hidup di dalam jaringan tanaman tanpa menimbulkan efek merugikan. Bakteri endofit memiliki kemampuan mengeluarkan metabolit sekunder yang mampu melindungi tanaman dari serangan patogen (Oktavia & Pujiyanto, 2018). Berbagai penelitian menunjukkan bahwa metabolit yang dihasilkan bakteri endofit akar kelapa sawit memiliki aktivitas antifungi terhadap *Ganoderma boninense*, sehingga

berpotensi dikembangkan sebagai alternatif pengendalian yang lebih berkelanjutan dibandingkan fungisida kimia.

Potensi tersebut didukung oleh kemampuan beberapa genus bakteri endofit dari akar kelapa sawit dalam menghasilkan senyawa antijamur. *Pseudomonas* diketahui menghasilkan metabolit sekunder seperti fenazin, oomycin, hidrogen sianida dan pyoverdine yang mampu menghambat berbagai jamur patogen dengan menyebabkan perubahan morfologi miselium menjadi kasar dan keriting (Simionato dkk., 2017; Widiyanti dkk., 2018). Sementara itu, *Bacillus* spp. menghasilkan enzim hidrolitik, seperti kitinase dan glukonase yang merusak dinding sel jamur melalui degradasi kitin dan β -glukan (Elfina dkk., 2024). Selain itu, *Streptomyces* sp. dilaporkan menghasilkan berbagai senyawa antijamur, seperti ribostamycin, salinomycin, *benzyl malic acid* dan β -laktam yang berpotensi menghambat pertumbuhan *Ganoderma boninense* (Muzaimah dkk., 2018). Beragamnya metabolit yang dihasilkan oleh bakteri endofit menunjukkan potensi besar sebagai sumber kandidat senyawa antifungi. Namun, tidak semua senyawa memiliki kemampuan yang sama dalam berinteraksi dengan target molekuler pada *G. boninense*. Oleh karena itu, identifikasi senyawa aktif yang dihasilkan bakteri endofit dan evaluasi potensi interaksi molekulernya perlu dilakukan untuk menyeleksi kandidat yang paling berpotensi dikembangkan sebagai agen pengendalian hayati terhadap *G. boninense* sebelum dilakukan pengujian lebih lanjut.

Metode *in silico* merupakan pendekatan penelitian berbasis komputasi yang memanfaatkan sistem komputer untuk menganalisis dan memprediksi interaksi biologis, sehingga melengkapi metode *in vitro* dan *in vivo* (Khaerunnisa dkk., 2023 dalam Nugroho dkk., 2025). Berbagai penelitian telah melaporkan bahwa senyawa aktif yang dihasilkan oleh bakteri endofit memiliki aktivitas antifungi secara *in vitro*, yang ditunjukkan melalui pembentukan zona hambat terhadap jamur patogen. Namun, pendekatan tersebut belum mampu menjelaskan mekanisme interaksi molekuler. Selain memberikan gambaran awal mengenai potensi aktivitas biologis suatu senyawa, metode *in silico* juga menawarkan berbagai keunggulan, seperti lebih efisien dari segi

waktu dan biaya, tidak memerlukan pengujian biologis, serta memungkinkan penyaringan sejumlah besar senyawa kandidat secara cepat (*high-throughput screening*) (Nugroho dkk., 2025). Salah satu pendekatan *in silico* yang banyak digunakan adalah *molecular docking*, yaitu metode komputasi berbasis struktur yang memprediksi afinitas ikatan dan pola interaksi ligan dengan protein target (Muhammed & Aki-yalcin, 2024).

Meskipun aktivitas antifungi bakteri endofit akar kelapa sawit terhadap *G. boninense* telah banyak dilaporkan, informasi mengenai senyawa aktif mana yang memiliki afinitas paling tinggi terhadap protein lakase, MnP, dan LiP masih terbatas. Penelitian terdahulu telah mengkaji potensi senyawa alami terhadap ketiga protein tersebut, yaitu senyawa yang berasal dari alga (Permatasari & Widiastuti, 2024) dan kurkumin dari *Curcuma longa* (Nugroho dkk., 2025). Namun, potensi metabolit yang dihasilkan oleh bakteri endofit akar kelapa sawit sebagai ligan terhadap protein lakase, MnP, dan LiP masih belum banyak dikaji. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan komputasi untuk mengevaluasi potensi interaksi molekuler senyawa-senyawa tersebut sebelum dilakukan pengujian lebih lanjut secara *in vitro* maupun *in vivo*.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis interaksi molekuler senyawa aktif dari bakteri endofit akar kelapa sawit terhadap protein lakase, mangan peroksidase (MnP) dan lignin peroksidase (LiP) pada *Ganoderma boninense* menggunakan pendekatan *molecular docking*, sehingga diperoleh kandidat senyawa antifungi yang berpotensi dikembangkan sebagai pengendalian hayati penyakit busuk pangkal batang.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang dipaparkan sebelumnya, maka dirumuskan beberapa pertanyaan dalam penelitian sebagai berikut:

1. Bagaimana hasil identifikasi senyawa aktif bakteri endofit akar kelapa sawit berdasarkan analisis GC-MS?
2. Bagaimana interaksi molekuler dan nilai afinitas senyawa aktif dari bakteri endofit kelapa sawit dalam menghambat *Ganoderma boninense* secara *in silico*?

3. Senyawa aktif manakah yang menunjukkan potensi penghambatan paling tinggi terhadap *Ganoderma boninense* secara *in silico*?

1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengidentifikasi senyawa aktif dari bakteri endofit akar kelapa sawit berdasarkan hasil GC-MS yang berpotensi sebagai agen antifungi terhadap *Ganoderma boninense*.
2. Menganalisis interaksi molekuler dan nilai afinitas senyawa metabolit aktif dari bakteri endofit kelapa sawit dalam menghambat *Ganoderma boninense* secara *in silico*.
3. Mengetahui senyawa yang memiliki potensi penghambatan paling tinggi terhadap *Ganoderma boninense*.

1.4. Manfaat Penelitian

1.4.1. Teoritis

Hasil penelitian dapat memperluas pemahaman mengenai mekanisme molekuler senyawa aktif bakteri endofit akar kelapa sawit dalam menghambat pertumbuhan *Ganoderma boninense* melalui pendekatan *in silico*. Selain itu, turut memperkaya lanskap keilmuan dalam bidang bioteknologi, bioinformatika, biokimia, dan mikrobiologi.

1.4.2. Praktis

Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai informasi awal dalam menyeleksi senyawa aktif bakteri endofit yang berpotensi dikembangkan sebagai kandidat antifungi terhadap *Ganoderma boninense*. Informasi mengenai interaksi senyawa dengan protein target *G. boninense* dapat menjadi dasar untuk menentukan senyawa unggulan yang selanjutnya dapat diuji secara *in vitro* dan dikembangkan sebagai kandidat bahan aktif agen hayati untuk pengendalian penyakit busuk pangkal batang pada tanaman kelapa sawit.