

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang Masalah

Peningkatan kasus penyakit kronis dan degeneratif saat ini telah menjadi krisis kesehatan dunia yang sangat serius. Laporan resmi *World Health Statistics* 2024 mencatat bahwa dunia masih menghadapi tantangan berat dalam menekan angka kematian akibat penyakit tidak menular (PTM), yang kini menyebabkan setidaknya 43 juta kematian per tahun, atau setara dengan 75% dari total kematian global (*World Health Organization*, 2025). Beban penyakit ini sangat terasa di negara-negara berkembang, termasuk Indonesia, di mana penyakit kardiovaskular, kanker, gangguan pernapasan, dan diabetes menjadi penyebab utama kematian dini. Berbagai studi kedokteran terkini, seperti yang diulas oleh (Akhigbe & Ajayi, 2021), menunjukkan bahwa mekanisme utama penyebab penyakit kardiometabolik tersebut berakar pada kondisi stres oksidatif. Jomova *et al.* (2023) mendefinisikan kondisi ini sebagai ketidakseimbangan proses biokimia ketika produksi radikal bebas (*Reactive Oxygen Species/ROS*) melampaui kapasitas sistem pertahanan antioksidan tubuh. Jika dibiarkan terus-menerus, akumulasi ROS ini akan merusak biomolekul vital seperti lipid membran dan DNA, yang memicu inflamasi kronis serta disfungsi organ (Juan *et al.*, 2021). Kondisi ini diperparah oleh gaya hidup modern dan polusi lingkungan yang memaksa tubuh bekerja ekstra keras untuk mempertahankan homeostasis, sehingga menimbulkan kebutuhan mendesak akan asupan antioksidan tambahan dari luar.

Industri pangan dan farmasi selama ini sangat bergantung pada antioksidan sintetik seperti BHA (*Butylated Hydroxyanisole*) dan BHT (*Butylated Hydroxytoluene*) karena stabilitasnya yang tinggi serta biaya produksinya yang rendah (Stoia & Oancea, 2022; Gonçalves-Filho & Souza, 2022). Namun, keamanan penggunaan senyawa sintetik tersebut kini menjadi perdebatan krusial karena ditemukannya risiko kesehatan yang signifikan. Riset toksikologi terbaru

oleh Esazadeh *et al.* (2024) melaporkan bukti kuat mengenai efek genotoksik dan sitotoksik akibat penggunaan jangka panjang antioksidan sintetik. Temuan tersebut diperkuat oleh Ren *et al.* (2025) yang mengungkapkan bahwa paparan BHA dan BHT secara akumulatif dapat memicu kerusakan organ vital, mulai dari hepatotoksisitas hingga neurotoksisitas. Juwita dan Suharti (2026) dalam perspektif pembangunan berkelanjutan menekankan bahwa eskalasi risiko kesehatan tersebut telah memicu pergeseran tren kebijakan global menuju pemanfaatan antioksidan alami sebagai bagian dari pencapaian target SDG nomor 3, yaitu menjamin kehidupan sehat dan sejahtera bagi semua usia. Maharani *et al.* (2025) turut menjelaskan bahwa eksplorasi senyawa flavonoid dari biodiversitas lokal Indonesia, seperti pada kulit buah-buahan tropis, menjadi langkah strategis untuk menyediakan kandidat agen terapeutik baru yang lebih aman. Integrasi kearifan hayati lokal dengan standar kebijakan kesehatan global diharapkan dapat menciptakan landasan inovatif dalam mengatasi krisis penyakit degeneratif secara masif dan berkelanjutan.

Sebagai negara megabiodiversitas, Indonesia memiliki kekayaan sumber daya genetik pisang (*Musa spp.*) yang luar biasa. Namun, tinjauan literatur terkini menunjukkan adanya ketimpangan fokus penelitian yang signifikan. Mayoritas studi fitokimia dan farmakologi saat ini masih didominasi oleh eksplorasi pada spesies pisang komersial utama, khususnya kelompok *Musa acuminata* (seperti Pisang Cavendish) yang dianggap paling bernilai ekonomi (Yadav, 2021; Nuur *et al.*, 2021). Sementara itu, varietas pisang lokal yang unik (*indigenous wild species*) justru sering terabaikan, padahal Indonesia memiliki keragaman kultivar yang sangat tinggi (Hapsari *et al.*, 2017). Salah satu spesies lokal yang sangat potensial namun minim perhatian ilmiah adalah Pisang ranggap atau Tongka Langit (*Musa troglodytarum* L.), tanaman asli yang distribusinya terpusat di Indonesia Timur seperti Maluku dan Papua, tetapi juga ditemukan tumbuh subur secara alami di kawasan Gunung Galunggung, Jawa Barat (Hernawati *et al.*, 2021; Dwivany *et al.*, 2020). Keunikan spesies ini tidak hanya terletak pada distribusi geografisnya yang terbatas, tetapi juga pada karakteristik morfologi dan fitokimia yang secara ilmiah membedakannya dari varietas pisang komersial pada umumnya, sehingga menjadikannya objek kajian yang sangat strategis untuk dieksplorasi lebih lanjut.

Pemilihan kulit pisang ranggap sebagai objek kajian dalam penelitian ini bukan semata karena keistimewaan jenisnya, melainkan lebih dilandasi oleh keunikan fitokimia yang secara ilmiah membedakannya dari varietas pisang lain yang lebih banyak diteliti. Memang benar bahwa secara kuantitas, limbah kulit pisang komersial seperti pisang kepok (*Musa paradisiaca*) atau pisang Cavendish (*Musa acuminata*) jauh lebih berlimpah di pasar maupun industri pangan. Namun, kelimpahan volume limbah tidak selalu berbanding lurus dengan kekayaan kandungan bioaktif yang terkandung di dalamnya (Rana *et al.*, 2023). Berbeda dengan pisang komersial yang menggantung ke bawah, tandan buah *Musa troglodytarum* L. tumbuh tegak menghadap langit (*erect bunch*) sehingga kulitnya terpapar sinar ultraviolet (UV) matahari secara langsung sepanjang masa pematangan (Dwivany, Patty, *et al.*, 2020). Paparan radiasi ini terbukti memicu mekanisme pertahanan alami tanaman, di mana kulit pisang yang terpapar UV akan meningkatkan produksi senyawa flavonoid secara signifikan sebagai respons perlindungan diri (Chen *et al.*, 2022). Senyawa ini bertindak seperti tabir surya alami yang melindungi buah dari kerusakan radiasi (Ningsih *et al.*, 2022). Akumulasi senyawa ini pun terlihat jelas dari pigmentasi merah-ungu pekat yang khas pada kulit pisang ranggap. Menurut Juliastuti *et al.* (2021), warna merah pada buah merupakan indikator visual yang kuat akan tingginya kadar antioksidan alami, sehingga adaptasi morfologi terhadap paparan cahaya matahari ini menjadikan kulit pisang ranggap sebagai sumber antioksidan yang lebih potensial untuk dieksplorasi dibandingkan kulit pisang komersial biasa.

Indikasi potensi bioaktif tersebut sejalan dengan bukti empiris di masyarakat, khususnya di kawasan Gunung Galunggung, di mana pisang ranggap telah lama dimanfaatkan dalam pengobatan tradisional. Hernawati *et al.* (2021) mendokumentasikan bahwa masyarakat setempat meyakini varietas ini berkhasiat untuk mengatasi berbagai keluhan penyakit dalam, seperti sakit pinggang, gangguan ginjal, dan diabetes. Meskipun demikian, hingga saat ini pisang ranggap di kawasan Gunung Galunggung belum dikelola melalui sistem budidaya yang terencana. Tanaman ini tumbuh secara tradisional di pekarangan rumah, tepian kolam, atau secara tumpang sari bersama tanaman lain, tanpa upaya pelestarian

maupun pengembangan yang sistematis, sehingga keberadaannya masih sangat terbatas dan belum termanfaatkan secara optimal. Pemanfaatan yang ada saat ini masih sebatas pada konsumsi daging buahnya saja, sementara bagian kulit buah yang tebal dengan pigmentasi mencolok justru dibuang begitu saja dan berakhir menjadi limbah organik. Kondisi ini dikonfirmasi dalam studi pendahuluan yang dilakukan peneliti pada awal Desember 2025 melalui wawancara dengan perwakilan Perhutani kawasan Ekowisata Gunung Galunggung, yang mengungkapkan bahwa masyarakat lokal maupun pengunjung wisata belum mengetahui potensi tersembunyi dari kulit pisang ranggap sehingga bagian tersebut dibuang tanpa pengolahan lebih lanjut. Padahal, studi fitokimia komparatif menunjukkan fakta sebaliknya, di mana kulit pisang dari berbagai varietas sering kali mengandung kadar polifenol dan flavonoid yang lebih tinggi daripada daging buahnya sebagai mekanisme pertahanan tanaman (Parvez *et al.*, 2023). Dengan demikian, limbah kulit pisang ranggap yang selama ini terabaikan justru menegaskan urgensi ilmiahnya tersendiri. Hal ini sejalan dengan prinsip bahwa temuan yang selama ini terabaikan justru berpotensi menyimpan nilai bioaktif terbesar dan layak diteliti secara ilmiah.

Hipotesis mengenai tingginya potensi kulit pisang ranggap ini telah divalidasi melalui studi pendahuluan yang dilakukan peneliti bekerja sama dengan tim riset Universitas Siliwangi yang telah melakukan analisis profil metabolomik di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT), Universitas Gadjah Mada. Pengujian menggunakan instrumen *Liquid Chromatography-Mass Spectrometry* (LC-MS) terhadap ekstrak kulit *Musa troglodytarum* L. tersebut berhasil mengidentifikasi keberadaan 80 ragam senyawa metabolit sekunder. Dari total senyawa yang ditemukan, analisis mendalam mengungkapkan bahwa 17,5% di antaranya merupakan golongan Flavonoid yang terdiri dari 14 senyawa spesifik, termasuk derivat utama seperti *Quercetin*, *Kaempferol*, *Luteolin*, dan *Rutin*. Temuan ini sejalan dengan riset terbaru Pradhan *et al.* (2025) yang mengonfirmasi bahwa kulit pisang merupakan matriks biologis yang kaya akan ragam flavonoid bioaktif dengan potensi terapeutik tinggi. Keberadaan kompleksitas senyawa ini menjadi temuan krusial, karena menurut Mutha *et al.* (2021) dan Ayunda & Malita

(2024), struktur polifenolik yang dimiliki oleh flavonoid tersebut sangat efektif dalam menetralkan radikal bebas dan memodulasi sistem pertahanan seluler. Selain itu, validitas data ini terjamin berkat penggunaan metode LC-MS yang terbukti akurat dan sensitif dalam mendeteksi senyawa tanaman (Rao *et al.*, 2023). Oleh karena itu, keseluruhan senyawa flavonoid yang teridentifikasi ini menjadi kandidat ligan yang sangat strategis untuk diteliti lebih lanjut potensi aktivitas molekulernya.

Meskipun analisis LC-MS telah berhasil memetakan kekayaan senyawa flavonoid pada kulit pisang ranggap, data ilmiah yang menjelaskan mekanisme molekuler senyawa-senyawa tersebut terhadap target biologis spesifik belum tersedia. Penelitian-penelitian sebelumnya memang telah mengkaji potensi farmakologis tanaman ini, namun mayoritas terbatas pada penanganan penyakit diabetes. Secara spesifik, Fauzi *et al.* (2023) melalui studi eksperimental melaporkan bahwa ekstrak kulit pisang ranggap mampu bertindak sebagai agen *insulin-sensitizer* yang efektif menurunkan kadar glukosa darah pada hewan uji. Sementara itu, studi komputasi oleh Hendrawan *et al.* (2024) menemukan bahwa senyawa *campesterol* dari pisang ini berpotensi menghambat kerja enzim *alfa-amilase* dalam pemecahan karbohidrat. Kedua penelitian tersebut cenderung berfokus pada penanganan manifestasi akhir penyakit (hiperglikemia), tetapi belum menyentuh akar penyebab utamanya, yaitu stres oksidatif kronis. Hingga saat ini, belum ada studi yang mengevaluasi apakah ke-14 senyawa flavonoid yang teridentifikasi dalam penelitian ini memiliki kemampuan spesifik untuk mengikat protein Keap1 (*Kelch-like ECH-associated protein 1*). Padahal, protein Keap1 berperan penting sebagai regulator kunci (*master switch*) yang mengontrol sistem pertahanan antioksidan alami tubuh (Baird & Yamamoto, 2020). Tanpa pemahaman mengenai interaksi antara senyawa kulit pisang dengan protein ini, potensi pemanfaatan kulit pisang ranggap hanya akan berhenti pada data kandungan kimia saja tanpa pembuktian farmakologis yang mendalam. Oleh karena itu, ketiadaan data interaksi molekuler terhadap Keap1 menjadi celah penelitian (*gap*) krusial yang harus segera dijawab untuk membuktikan potensi terapeutiknya secara ilmiah.

Keterbatasan studi yang ada, khususnya terkait ketiadaan data interaksi molekuler antara senyawa bioaktif pisang ranggap dan protein Keap1, mendorong penerapan pendekatan penelitian yang lebih efisien dan sistematis. Dalam konteks ini, pendekatan *in silico* melalui simulasi *molecular docking* dipandang sebagai solusi yang relevan untuk mengisi kesenjangan data molekuler tersebut secara terukur. Pendekatan ini diterapkan sebagai strategi penapisan awal (*virtual screening*) karena kemampuannya memprediksi afinitas pengikatan dan mekanisme interaksi dari ke-14 senyawa flavonoid kulit pisang ranggap terhadap reseptor Keap1 secara presisi, tanpa harus melalui proses *trial-and-error* yang kompleks di laboratorium. Selain menawarkan efisiensi waktu dan biaya yang signifikan dibandingkan uji *in vitro* maupun *in vivo*, pendekatan ini juga selaras dengan prinsip *Green Chemistry* karena meminimalkan penggunaan reagen kimia berbahaya dan limbah B3 pada tahap eksplorasi awal (Al-karmalawy *et al.*, 2021). Selain itu, Mushebenge *et al.* (2023) menegaskan bahwa studi komputasi berperan vital dalam memprioritaskan senyawa dengan profil farmakokinetik dan toksisitas terbaik. Dengan demikian, penelitian ini berperan sebagai penyaring ilmiah yang sistematis untuk menyeleksi kandidat inhibitor Keap1 paling potensial dari kulit pisang ranggap, sehingga menyediakan landasan yang kokoh dan terarah bagi pengembangan obat herbal berbasis biodiversitas lokal di masa depan.

Pemilihan protein Keap1 sebagai target penapisan didasarkan pada peran pentingnya sebagai regulator negatif utama dalam jalur persinyalan antioksidan seluler. Dalam kondisi fisiologis normal, Keap1 berfungsi mengikat faktor transkripsi Nrf2 di sitoplasma dan memfasilitasi degradasinya, sehingga ekspresi gen antioksidan tetap rendah. Menurut Baird & Yamamoto (2020), inhibisi terhadap sisi aktif Keap1 oleh senyawa bioaktif dapat mencegah degradasi tersebut, membebaskan Nrf2 untuk bertranslokasi ke inti sel, dan berikatan dengan *Antioxidant Response Element* (ARE). Aktivasi jalur ini kemudian menstimulasi ekspresi enzim sitoprotektif alami tubuh, seperti *Superoxide Dismutase* (SOD) dan *Heme Oxygenase-1* (HO-1), yang berfungsi menetralkan stres oksidatif secara sistemik (Tu *et al.*, 2019). Guna meningkatkan akurasi prediksi mekanisme tersebut dalam simulasi *molecular docking*, penelitian ini menggunakan struktur kristal

protein Keap1 dengan kode PDB 4L7B yang telah terko-kristalisasi dengan ligan alaminya. Berdasarkan data kristalografi sinar-X oleh Jnoff *et al.* (2014), ligan asli (*Native Ligand*) pada kompleks 4L7B memiliki afinitas pengikatan yang spesifik dan tervalidasi, sehingga perbandingannya dengan ligan uji dari kulit pisang ranggap akan menjadi parameter kontrol positif yang valid untuk mengukur potensi inhibisi yang sebenarnya.

Hasil penelitian *in silico* ini tidak hanya memberikan kontribusi dalam bidang farmakologi molekuler, tetapi juga memiliki urgensi untuk dikembangkan sebagai sumber belajar biologi yang kontekstual dan selaras dengan Capaian Pembelajaran Fase F. Pengembangan sumber belajar yang variatif sangat diperlukan karena ketersediaan materi ajar yang relevan berperan vital dalam membantu peserta didik memperoleh informasi, pengetahuan, serta sikap ilmiah yang menunjang proses pembelajaran (Magdalena *et al.*, 2020; Marlina *et al.*, 2024). Integrasi hasil penelitian kontemporer yang memanfaatkan pendekatan bioinformatika, simulasi komputasi, dan kajian molekuler sangat dibutuhkan untuk membantu peserta didik memahami konsep abstrak secara lebih konkret serta meningkatkan relevansi materi dengan perkembangan teknologi sains hayati terkini (Amto *et al.*, 2019). Berdasarkan kebutuhan tersebut, luaran penelitian ini disusun dalam bentuk *booklet* digital yang dirancang untuk menyajikan informasi riset secara ringkas, padat, visual, dan mudah diakses (Hafizah *et al.*, 2022; Hasanah & Fitrihidajati, 2020; Marselina *et al.*, 2024). Konten *booklet* ini secara spesifik memuat potensi antioksidan kulit pisang ranggap, visualisasi interaksi senyawa metabolit sekunder berbasis *molecular docking*, serta mekanisme molekuler penghambatan Keap1 yang diselaraskan dengan materi Bioteknologi Modern pada Fase F, khususnya pada capaian menganalisis penerapan teknologi biologi berbasis komputasi. Melalui penyusunan sumber belajar biologi dalam bentuk bahan ajar pengayaan, penelitian ini diharapkan mampu mengintegrasikan bioteknologi modern dengan konteks biodiversitas lokal, sekaligus menumbuhkan apresiasi peserta didik terhadap nilai tambah kekayaan hayati di lingkungan sekitarnya.

Berdasarkan analisis terhadap permasalahan kesehatan global, potensi biodiversitas lokal, dan kebutuhan pendidikan, penelitian ini memiliki landasan

argumentatif yang kuat dan relevan untuk dilaksanakan. Aspek kebaruan (*novelty*) utama penelitian ini terletak pada pengungkapan mekanisme molekuler senyawa flavonoid dari kulit pisang ranggap sebagai inhibitor spesifik protein Keap1, yaitu protein kunci yang berperan sebagai pengatur awal aktivasi jalur respons antioksidan seluler, yang hingga kini belum banyak dieksplorasi dalam penelitian sebelumnya yang umumnya berfokus pada efek terapeutik lanjutan, seperti pengendalian diabetes atau komplikasinya. Selain itu, integrasi temuan molekuler berbasis simulasi *in silico* ke dalam penyusunan sumber belajar biologi dalam bentuk bahan ajar pengayaan pada materi Bioteknologi Modern Fase F menghadirkan dimensi kebaruan dalam pendidikan sains melalui perpaduan antara teknologi komputasi modern dan pemanfaatan biodiversitas lokal. Melalui pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan kontribusi ganda, baik secara ilmiah dengan menyediakan landasan farmakologis yang rasional dan berbasis bukti bagi pemanfaatan limbah kulit pisang ranggap sebagai kandidat obat herbal terstandar, maupun secara edukatif dengan menyediakan sumber belajar biologi yang kontekstual, yang berpotensi meningkatkan literasi sains serta apresiasi peserta didik terhadap kekayaan hayati Indonesia. Dengan demikian, penelitian berjudul “Studi *In Silico* Senyawa Metabolit Sekunder Kulit Pisang ranggap (*Musa troglodytarum* L.) sebagai Kandidat Antioksidan untuk Sumber Belajar Biologi” menjadi relevan, bernilai strategis, dan penting untuk dilaksanakan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah yang dibahas pada penelitian ini yaitu: “bagaimana hasil studi *in silico* senyawa metabolit sekunder kulit pisang ranggap (*Musa troglodytarum* l.) sebagai kandidat antioksidan untuk sumber belajar biologi?”.

1.3 Definisi Operasional

Untuk menyamakan persepsi dan menghindari potensi interpretasi ganda terhadap istilah-istilah kunci, penelitian ini merumuskan definisi operasional. Definisi ini secara khusus bertujuan untuk memberikan penjelasan dan batasan

yang jelas mengenai variabel atau istilah yang tercantum dalam judul, sehingga memudahkan pembaca dalam memahami konteks penelitian.

1.3.1 *In Silico*

Studi *in silico* dalam penelitian ini didefinisikan sebagai pendekatan penelitian berbasis komputasi yang memanfaatkan simulasi digital untuk memprediksi, menganalisis, dan memvisualisasikan interaksi molekuler secara virtual. Fokus utama studi ini adalah mengevaluasi potensi antioksidan senyawa-senyawa bioaktif kulit pisang ranggap melalui teknik penambatan molekuler (*molecular docking*). Metode *molecular docking* bekerja dengan cara menyimulasikan orientasi dan kekuatan ikatan antara molekul kecil (ligan) dengan makromolekul protein target (reseptor) untuk memperoleh konformasi ikatan paling stabil berdasarkan nilai *Binding Affinity*. Protein target yang digunakan sebagai reseptor dalam simulasi ini adalah *Kelch-like ECH-associated protein 1* (Keap1) dengan kode PDB: 4L7B, yang berperan sebagai regulator kunci dalam sistem pertahanan antioksidan seluler. Keseluruhan proses studi *in silico* ini melibatkan pemanfaatan berbagai basis data dan perangkat lunak bioinformatika, meliputi PubChem, RCSB Protein Data Bank (PDB), *PASS Online*, PyRx (berbasis AutoDock Vina), SWISS-MODEL, SwissADME, SAVES v6.0 (UCLA), pkCSM, ProTox 3.0, serta BIOVIA *Discovery Studio Visualizer 2025*.

1.3.2 Senyawa Metabolit Sekunder Kulit Pisang Ranggap

Senyawa metabolit sekunder dalam penelitian ini merujuk pada gugus senyawa bioaktif yang terkandung dalam kulit pisang ranggap (*Musa troglodytarum* L.) dan berperan dalam aktivitas farmakologis, khususnya sebagai antioksidan. Identifikasi profil senyawa ini tidak dilakukan melalui pengujian laboratorium dalam penelitian ini, melainkan mengacu pada data empiris hasil analisis *Liquid Chromatography-Mass Spectrometry* (LC-MS) yang diperoleh melalui studi kolaborasi di Laboratorium Penelitian dan Pengujian Terpadu (LPPT) Universitas Gadjah Mada. Berdasarkan hasil analisis tersebut, teridentifikasi sebanyak 80 senyawa metabolit sekunder yang tergolong ke dalam beberapa kelompok utama, yaitu flavonoid, asam fenolat, terpenoid, steroid, dan asam lemak. Secara operasional, penelitian ini membatasi fokus analisis *in silico* pada 14

senyawa flavonoid terpilih yang terdeteksi, yang diduga kuat berkontribusi dominan terhadap aktivitas antioksidan, untuk diuji interaksinya secara komputasi terhadap reseptor Keap1.

1.3.3 Kandidat Antioksidan

Kandidat antioksidan dalam penelitian ini diartikan sebagai senyawa metabolit sekunder spesifik dari kulit pisang ranggap (*Musa troglodytarum* L.) yang, berdasarkan hasil simulasi *in silico*, menunjukkan prediksi interaksi yang kuat dan stabil dengan protein target Keap1. Variabel ini ditentukan melalui proses penapisan (*screening*) terhadap data sekunder hasil analisis *Liquid Chromatography-Mass Spectrometry* (LC-MS) yang diperkuat oleh kajian literatur mengenai keterkaitan struktur kimia dengan aktivitas antioksidan. Secara operasional, penelitian ini menguji seluruh 14 senyawa flavonoid yang teridentifikasi sebagai ligan uji, yaitu *Kaempferol*, *Kaempferol-3-rhamnoside*, *Kaempferol-7-O- β -D-glucoside*, *Quercetin*, *Kaempferol-7-rhamnoside-4'-glucoside*, *Luteolin*, *Kaempferol-3-O-D-glucoside* (*Astragalin*), *Luteolin-7-glucoside*, *Naringenin*, *Rutin*, *Trifoliol*, *Epigallocatechin*, *Leucodelphinidin*, dan *Leucocyanidin*. Seluruh senyawa tersebut dianalisis interaksinya terhadap protein Keap1 menggunakan pendekatan *molecular docking* untuk memperoleh nilai afinitas pengikatan (*Binding Affinity*). Nilai afinitas pengikatan yang paling negatif diinterpretasikan sebagai indikasi stabilitas kompleks ligan-reseptor tertinggi. Sebagai pembanding (kontrol positif), digunakan ligan asli (*Native Ligand*) yang terko-kristalisasi pada struktur protein Keap1 (PDB ID: 4L7B). Senyawa dengan profil afinitas pengikatan terbaik selanjutnya ditetapkan sebagai kandidat antioksidan paling potensial untuk direkomendasikan pada penelitian eksperimental lanjutan.

1.3.4 Sumber Belajar Biologi

Sumber belajar biologi dalam konteks penelitian ini didefinisikan sebagai produk media edukatif yang disusun berdasarkan hasil temuan penelitian untuk menunjang proses pembelajaran biologi, yang diwujudkan dalam bentuk *booklet* digital. *Booklet* ini memaparkan secara sistematis potensi biodiversitas lokal pisang ranggap, kandungan senyawa metabolit sekundernya, serta mekanisme molekuler

aktivitas antioksidan yang divisualisasikan melalui teknik *molecular docking*. Mengingat fokus utama penelitian ini adalah pendekatan *in silico*, maka isi *booklet* ini dirancang agar tetap konsisten dengan pendekatan tersebut, yaitu menyajikan potensi bioaktif pisang ranggap secara ilmiah melalui visualisasi hasil *molecular docking* dan mekanisme molekuler penghambatan Keap1 yang diselaraskan dengan materi Bioteknologi Modern Fase F. Kontekstualisasi terhadap biodiversitas lokal pisang ranggap disampaikan melalui narasi pengantar yang menjelaskan keunikan spesies ini dan alasan ilmiah pemilihannya sebagai objek kajian, sehingga peserta didik dapat mengapresiasi keterkaitan antara kekayaan hayati lokal dengan teknologi sains modern tanpa menggeser fokus pembahasan dari pendekatan komputasi yang menjadi inti penelitian ini.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendeskripsikan hasil studi *in silico* senyawa metabolit sekunder kulit pisang ranggap (*Musa troglodytarum* L.) sebagai kandidat antioksidan untuk sumber belajar biologi.

1.5 Kegunaan Penelitian

1.5.1 Kegunaan Teoritis

Secara teoritis, penelitian ini diharapkan dapat memberikan tiga kontribusi utama bagi ilmu pengetahuan. Pertama, penelitian ini berkontribusi dalam menyediakan data ilmiah molekuler mengenai mekanisme interaksi senyawa flavonoid dari kulit pisang ranggap sebagai inhibitor spesifik protein Keap1 dalam jalur pertahanan antioksidan. Kedua, hasil studi ini berfungsi sebagai bukti ilmiah (*scientific evidence*) yang memperkuat hipotesis mengenai potensi bioaktif pisang ranggap yang selama ini lebih banyak didasarkan pada pengetahuan tradisional semata. Ketiga, temuan ini akan memperkaya literatur ilmiah tentang spesies *Musa troglodytarum* L. yang masih minim publikasi, sehingga dapat menjadi referensi basis data fitokimia dan farmakologi bagi pengembangan riset obat herbal di masa depan.

1.5.2 Kegunaan Praktis

1.5.2.1 Bagi Masyarakat dan Lingkungan Berbasis Ekowisata

Hasil penelitian ini memberikan dasar ilmiah mengenai nilai tambah kulit pisang ranggap yang selama ini dipandang sebagai limbah organik. Temuan ini mendukung konsep pemanfaatan sumber daya hayati lokal secara berkelanjutan melalui pendekatan valorisasi limbah (*waste valorization*), yang berpotensi mengurangi akumulasi sampah organik di kawasan wisata dan pertanian. Bagi pengelola kawasan berbasis ekowisata, termasuk pihak Perhutani Ekowisata Gunung Galunggung, data ilmiah dari penelitian ini dapat dimanfaatkan sebagai referensi valid untuk memperkaya narasi eduwisata (*storytelling*) mengenai keunikan biodiversitas lokal serta pentingnya konservasi tanaman lokal. Dengan demikian, penelitian ini berkontribusi secara tidak langsung dalam mendukung kesadaran lingkungan, pelestarian varietas pisang ranggap, serta pemanfaatan sumber daya alam yang lebih ramah lingkungan.

1.5.2.2 Bagi Peneliti

Hasil studi *in silico* ini berfungsi sebagai data penapisan awal (*virtual screening*) yang sangat berharga dan hipotesis yang kuat bagi para peneliti lain. Temuan ini dapat menjadi landasan untuk melakukan penelitian lanjutan pada tahap *in vitro* dan *in vivo* secara lebih terarah, efisien, dan hemat biaya karena kandidat senyawa antioksidan terbaik telah teridentifikasi. Selain itu, metodologi integrasi data metabolomik dengan simulasi molekuler yang digunakan dalam penelitian ini dapat menjadi model acuan bagi penelitian serupa yang bertujuan untuk mengeksplorasi potensi bioaktif dari tanaman-tanaman lokal lainnya di Indonesia.

1.5.2.3 Bagi Dunia Pendidikan

Penelitian ini memberikan kontribusi praktis bagi dunia pendidikan melalui penyediaan sumber belajar biologi berupa *booklet* digital berbasis riset. *Booklet* ini dirancang secara spesifik untuk menjadi materi pendukung yang relevan dengan implementasi kurikulum terbaru guna memfasilitasi pembelajaran mendalam pada Capaian Pembelajaran (CP) Fase F materi Bioteknologi Modern. Selain itu, *booklet* ini juga dapat digunakan sebagai studi kasus yang kontekstual dan aplikatif bagi

mahasiswa pada mata kuliah Bioinformatika, sehingga dapat menjembatani teori komputasi dengan pemanfaatan sumber daya hayati lokal secara nyata.