

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA, KERANGKA BERPIKIR DAN HIPOTESIS

2.1 Kajian Pustaka

2.1.1 Tanaman Cabai Merah

a. Klasifikasi Tanaman Cabai

Sistem klasifikasi botani tanaman cabai menurut ITIS - Report: Capsicum annuum (2024), sebagai berikut :

Kingdom	:	Plantae
Divisi	:	Spermatophyta
Kelas	:	Dicotyledonae
Ordo	:	Solanales
Famili	:	Solanaceae
Genus	:	Capsicum
Spesies	:	<i>Capsicum annuum</i> L.

b. Morfologi Tanaman Cabai

Sebenarnya, bentuk luar atau morfologi tanaman cabai tidak asing bagi sebagian besar orang Indonesia, terutama mereka yang tinggal di daerah pedesaan atau pegunungan. Orang-orang di perkotaan seringkali tidak pernah melihat tanaman cabai, yang mereka kenal hanyalah buah cabai yang dapat dimakan sebagai sayur (Lagiman & Supriyanta, 2021).

Menurut Lagiman & Supriyanta (2021) Spesies dan varietas menentukan ukuran daun tanaman cabai. Daun cabai memiliki bentuk oval, lonjong, atau bahkan lanset. Permukaan daun cabai bisa halus atau berkerut. Permukaan bagian bawah biasanya hijau muda, hijau pucat, atau hijau kebiruan. Daun cabai memiliki panjang antara 3 dan 11 cm dan lebar antara 1 dan 5 cm. tanaman cabai masuk pada jenis tanaman perdu yang dimana memiliki batang yang tidak terbuat dari kayu. Batang tanaman cabai tumbuh hingga mencapai titik tertentu, tanaman cabai biasanya membentuk banyak percabangan. Namun batang besar tumbuh hingga dua meter.

Batang cabai juga berwarna hijau muda, hijau tua dan warna kayu cokelat apabila batang telah tua. Hal ini yang menjadi batang cabai disebut sebagai kayu semu yang mengeraskan jaringan parenkim. Akar dari tanaman cabai ini hanya serabut dan sistem perakaran yang rumit, biasanya akan bersimbiosis dengan beberapa mikroorganisme yang menghasilkan bintil akar. Tanaman cabai tidak memiliki akar tunggang, namun akar tumbuh ke arah bawah dan berfungsi sebagai akar tunggang semu.

Bentuk bunga tanaman cabai adalah bentuk bintang, meskipun bervariasi. Ini menunjukkan bahwa tanaman cabai masuk dalam subkelas Asteridae yang merupakan keluarga berbunga bintang. Bunga akan tumbuh pada ketiak, tunggal atau bergerombol dalam tandan. Ada dua hingga tiga bunga dalam satu tandan. Mahkotanya berwarna putih, putih kehijauan, atau ungu. Yang memiliki diameter antara 5 dan 20 milimeter. Bunga tanaman cabai merupakan bunga sempurna, bunga betina dan jantan masak hampir bersamaan sehingga dapat menyerbukan sendiri (*selfing*). Namun penyerbukan silang (*crossing*) dapat dilakukan untuk mendapat hasil cabai yang lebih baik, angin atau lebah biasanya membantu penyerbukan tanaman cabai. Bentuk buah dari tanaman cabai dikelompokkan menjadi enam kelompok, menurut International Plant Genetics Resources Institute (1995): *Elongate* (memanjang), *Almost round* (bulat), *Tringular* (segitiga), *Campanulate* (kotak meruncing), *Blocky* (kotak), dan lainnya.

Warna buah cabai biasanya berwarna hijau tua, hijau, putih, atau putih kekuningan, tetapi ketika buah menjadi tua berubah warna menjadi merah, merah tua, hijau kemerahan, bahkan menjadi merah gelap mendekati ungu.

Cabai besar memiliki permukaan buah yang rata atau licin, diameter tebal, dan dagingnya tebal. Memiliki biji di dalam, yang terbagi menjadi tiga kelompok yaitu berbiji banyak, berbiji sedikit, dan tidak berbiji. Berbentuk pipih, biji berwarna putih krem atau putih kekuningan. Biji memiliki diameter antara 1 dan 3 milimeter dan ketebalan antara 0,2 dan 1 milimeter. Bentuknya tidak teratur, seperti bentuk oktagon. Gambar 1 menunjukkan buah cabai merah besar pada saat di tanaman.



Gambar 1. Morfologi cabai merah besar

Sumber : Dok. Pribadi

c. Syarat Tumbuh Tanaman Cabai

Syarat tumbuh merupakan kondisi optimal yang dibutuhkan tanaman untuk dapat tumbuh dan berkembang dan memberikan hasil dengan baik. Pada umumnya syarat tumbuh meliputi tiga faktor yang diperinci menjadi dua faktor alamiah dan satu faktor sosial. Faktor alamiah terdiri dari tanah, iklim dan kondisi lingkungan. Sedangkan, faktor sosial berupa sosial ekonomi (Lagiman & Supriyanta, 2021).

Tanah yang ideal terdiri dari komponen masa padatan, air, dan udara terbagi rata. Dengan kondisi tersebut maka akan menjamin daya tahan air, aerasi, drainase dan aktivitas mikroorganisme tanah. Untuk budidaya tanaman cabai sendiri idealnya memiliki tanah yang subur dengan kandungan bahan organik sekurang-kurangnya 1,5%, unsur hara, air, serta terbebas dari organisme pengganggu tanaman (Sevirasari dkk., 2023).

Iklim yang cocok dari tanaman cabai ialah pada ketinggian 0-1.500 meter di atas permukaan laut, namun dengan suhu yang optimal berkisar 21-28°C dan pada fase pembungaan membutuhkan suhu udara berkisar 18,3-26,7°C. Suhu rata-rata di atas 32°C dapat mengakibatkan tepung sari menjadi tidak berfungsi. Curah hujan yang tinggi dapat menyebabkan tanaman cabai mudah terserang penyakit yang disebabkan oleh jamur. Curah hujan yang ideal bagi tanaman cabai berkisar 600-1.200 mm/tahun (Sevirasari dkk., 2023). pH tanah yang cocok bagi tanaman cabai berkisar 5,5 hingga 7,0.

Pada tanaman cabai pengukuran pH tanah cukup penting, karena untuk pertumbuhan tanaman agar bisa optimal. pH yang ideal untuk tanaman cabai yaitu 5,5-6,8. Apabila $pH > 7$ maka akan menyebabkan tanaman menjadi kerdil, daun menguning, dan muncul gejala klorosis yang diakibatkan kekurang unsur hara besi (Fe). Sedangkan apabila $pH < 5,5$ akan menyebabkan tanaman kekurangan unsur hara CA, Mg, P atau bisa menyebabkan keracunan Al dan Mn akibat terlalu masam, sehingga perlu ditambahkan dolomit untuk menstabilkan pH tanah (Sevirasari dkk., 2023).

2.1.2 Penyakit Antraknosa

a. Morfologi *Colletotrichum* sp.

Fungi *Colletotrichum* sp. memiliki konidiofor yang pendek dan konidia dibentuk dalam aservulus. Stroma *Colletotrichum* terdiri dari massa miselium berbentuk aservulus yang bersepta dan panjangnya berkisar antara 30 dan 90 μm , dengan perkembangan biasanya merupakan perpanjangan dari setiap aservulus. Konidia bersel tunggal dan berukuran 5–15 (Purwanti, 2017).

Aservulus tersusun di bawah epidermis tanaman inang. Epidermis pecah apabila konidia telah dewasa. Konidia keluar dengan bentuk percikan berwarna putih, kuning, jingga, hitam, atau warna lain sesuai dengan pigmen yang ada pada konidia. Gambar berikut menunjukkan morfologi jamur *Colletotrichum* sp. yang merupakan patogen penyebab penyakit antraknosa pada cabai



Gambar 2. Morfologi *Colletotrichum* sp.

Sumber : Marsuni (2020)

b. Penyakit antraknosa

Antraknosa merupakan salah satu jenis penyakit utama tanaman cabai merah yang disebabkan oleh adanya infeksi jamur *Colletotrichum* sp. Antraknosa dapat

menyebabkan dieback atau mati pucuk pada tanaman dewasa yang kemudian diikuti infeksi pada buah, sehingga pada akhirnya menurunkan produktivitas tanaman cabai (Prasetyo, 2017).

Penyakit antraknosa atau yang lebih dikenal dengan istilah patek adalah penyakit yang hingga saat ini masih menjadi momok bagi petani cabai, karena bisa menyebabkan kegagalan panen. Badan Litbang Pertanian (2016) melaporakan bahwa kehilangan hasil cabai diperkirakan berkisar antara 20% – 90% terutama pada saat musim penghujan. Penyakit antraknosa bergejala mati pucuk yang berlanjut ke bagian tanaman sebelah bawah. Daun, ranting, dan cabang menjadi kering berwarna coklat kehitam-hitaman. Pada batang cabai, aservulus cendawan terlihat seperti tonjolan. Patogenitas *Colletotrichum* sp. sangat kuat sehingga dapat menurunkan produksi cabai (Herwidayati dkk., 2016). Spesies *Colletotrichum* penyebab antraknosa cabai paling banyak ditemukan di Indonesia antara lain *C. acutatum*, *C. cloeosporioides*, *C. capsici*, *C. siamense*, *C. makassarens*, *C. scovillei*, *C. truncatum*, *C. fructicula*, dan *C. nymphaeae* (Anggrahini dkk. (2020)). Patogen *Colletotrichum* sp. diketahui dapat ditekan dengan aplikasi fungisida sintetis berbahan aktif mancozeb. Namun demikian, penggunaan fungisida sintetis yang tidak bijaksana dapat menimbulkan dampak buruk terhadap kesehatan manusia, kualitas lingkungan, dan berpengaruh pada resistensi patogen (Arie dkk., 2015). Oleh karena itu, diperlukan alternatif pengendalian antraknosa yang ramah lingkungan, misalnya penggunaan fungisida nabati. Gambar 3 menunjukkan gejala pernyakit antraknosa pada tanaman cabai merah yang disebabkan oleh *Colletotrichum* sp. pada buah cabai merah dan Gambar 4 menunjukkan gejala penyakit antraknosa pada buah cabai merah secara umur.



Gambar 3. Penyakit antraknosa pada tanaman cabai merah besar

Sumber :



Gambar 4. Gejala penyakit antraknosa

Sumber: Marsuni (2020)

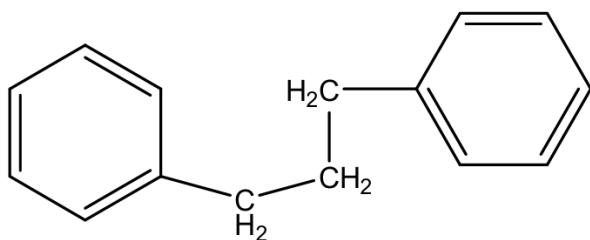
2.1.3 Metabolit Sekunder Tanaman Kelor

Tanaman kelor seringkali menjadi bahan pangan pelengkap ataupun sebagai obat herbal maupun kosmetik secara tradisional maupun modern. Di Indonesia, kelor ini biasanya digunakan untuk bahan pelengkap makanan maupun sebagai obat herbal. Dikarenakan ada beberapa senyawa yang berasal dari tanaman kelor ini yang mengandung antioksidan, antikanker, antibiotik dan menghambat efek karsiogenik. Penelitian yang dilakukan oleh Dwika dkk. (2016) tanaman kelor memiliki kandungan senyawa bioaktif yaitu flavonoid, alkaloid, fenolat, triterpenoid/steroid, dan tanin. Sedangkan minyak biji kelor terkandung beberapa senyawa yaitu asam oleat (70%), asam palmitat, asam palmitoleat, asam linoleat, flavonoid, alkaloid (Risang Ayu dkk., 2024). Sebenarnya beberapa senyawa metabolit sekunder ini dapat digunakan sebagai pestisida nabati untuk mengendalikan hama maupun penyakit. Adapun senyawa – senyawa yang dapat digunakan sebagai pestisida nabati ialah minyak atsiri, flavonoid, alkaloid, tanin, dan saponin (Wardani & Yudaputra, 2015).

Alkaloid sendiri merupakan suatu golongan senyawa organik yang banyak ditemukan di alam. Alkaloid biasa ditemukan dihampir semua bagian tanaman yaitu biji, daun, ranting, dan kulit kayu. Alkaloid ini biasanya ditemukan dalam jumlah yang sedikit dan harus dipisahkan dari campuran senyawa yang rumit yang berasal

dari jaringan tanaman itu sendiri (Ningrum dkk., 2016). Dari semua alkaloid yang ada dialam, ada alkaloid yang memiliki sifat beracun dan ada yang bersifat sebagai obat (Lee dkk., 2014; Nasrul & Chatri, 2024). Alkaloid mengandung paling sedikit sebuah atom nitrogen yang memiliki sifat basa. Alkaloid berasal dari beberapa asam amino yang dibedakan atas alkaloid alisiklik berasal dari asam amino ornitin dan lisin, alkaloid aromatik berasal dari fenilalanin dan tirosin, dan alkaloid aromatik jenis indol berasal dari triptofan (Dalimunthe & Rachmawan, 2017). Wujud dari alkaloid ini sendiri ialah padat seperti kristal, namun beberapa alkaloid dapat berwujud cair pada suhu ruang seperti nikotin. Senyawa ini mempunyai rasa yang pahit serta bentuk garam (kristal) dapat larut dalam air dan pelarut organik dalam bentuk bebas atau basa (Nasrul & Chatri, 2024). Menurut Mustikasari & Ariyani (2016), senyawa alkaloid ini mempunyai aktivitas sebagai antimikroba dengan merusak dinding sel mikroba.

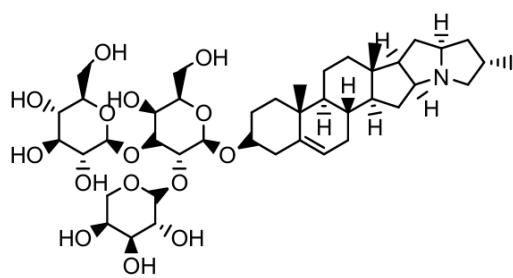
Flavonoid merupakan senyawa metabolit sekunder yang termasuk dalam kelompok senyawa fenol yang struktur benzenanya tersubstitusi dengan gugus OH. Senyawa flavonoid ini ialah senyawa terbesar yang ditemukan di alam dan biasa ada pada akar, kayu, kulit, daun, batang, buah, maupun buah dan berfungsi untuk antibakteri, antioksidan, antiinflamasi, antivirus, dan antifungi (I. S. Ningsih dkk., 2023). Flavonoid ini berasal dari 2-phenyl-benzyl- γ -pyrone yang disintesis melalui jalur fenilpropanoid (Mierziak dkk., 2014). Senyawa flavonoid bersifat mudah teroksidasi pada suhu tinggi dan tidak tahan panas (Nasrul & Chatri, 2024). Flavonoid berfungsi menjadi antifungi dengan menghambat pertumbuhan konidia jamur patogen, karena flavonoid bersifat lipofilik yang dapat merusak membran mikroba (Chatri dkk., 2022). Senyawa flavonoid ini mempunyai senyawa genistein yang berguna sebagai penghambat pembelahan atau proferasi sel jamur dengan menembus sel dinding jamur menuju membran sel. Fenolik yang ada di flavonoid dapat merusak sel sitoplasma dan menyebabkan kebocoran inti sel jamur (Kartika dkk., 2022).



Gambar 5. Rumus Struktur Flavonoid

Sumber : (Noer dkk., 2018)

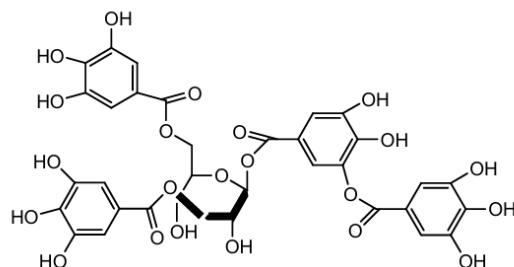
Saponin ialah jenis glikosida yang banyak ditemukan dalam tanaman. Saponin merupakan golongan senyawa alam yang rumit dan mempunyai massa molekul besar terdiri dari aglikon baik steroid atau triterpenoid dengan satu atau lebih rantai gula/ glikosida dan berdasarkan sifat kimiawinya. Saponin ini dibagi dalam dua kelompok yaitu steroid 27 atom C dan triterpenoid dengan 30 atom C (Nasrul & Chatri, 2024). Saponin berasal dari kata soap yang memiliki arti sabun. Saponin juga memiliki diversifikasi struktur yang luas dan senyawa saponin tertentu memiliki sifat surfaktan yang menyebabkan lisis pada dinding sel makhluk hidup (Nasrul & Chatri, 2024). Dikarenakan saponin ini memiliki efek antibakteri dan antijamur. Efek mengakibatkan jamur terganggu karena adanya gugus monosakarida dan turunan dari saponin dapat berguna sebagai deterjen dan dapat mengganggu stabilitas membran sel yang ada pada jamur (Bayuaji dkk., 2012). Saponin menjadi antifungi dikarenakan zat aktif permukaannya mirip detergen, dengan menurunkan tegangan permukaan membran sterol dari dinding sel jamur sehingga meningkatkan permeabilitasnya (Chatri dkk., 2022).



Gambar 6. Rumus Struktur Saponin

Sumber : (Noer, Pratiwi, dan Gresinta 2018)

Tanin ialah senyawa kimia yang termasuk dalam kelompok polifenol dan dapat bereaksi dengan besi untuk menghasilkan warna gelap (Ghamba dkk., 2014; Nurjannati dkk., 2018). Tanin ini secara alami larut dalam air dan memberi warna yang bervariasi mulai dari terang sampai merah tua atau cokelat, karena pada setiap turunan tanin memiliki warna berbeda, tergantung pada sumbernya (Achmad dkk., 2015). Senyawa tanin ini dapat ditemukan hampir pada seluruh bagian tanaman seperti pada daun, batang, kulit kayu, dan juga buah (Sajaratud Dur, 2013). Fungsi dari tanin sebagai antifungi ialah dengan menghambat biosintesis ergosterol. Ergosterol ialah sterol utama yang diproduksi oleh fungi, berfungsi sebagai komponen dari dinding sel jamur (Hong dkk., 2011).



Gambar 7. Rumus Struktur Tanin

Sumber : (Noer dkk., 2018)

2.1.4 Protein Cutinase

Spesies *Colletotrichum* ialah patogen tanaman hemibiotrofik yang menggunakan kedua bentuk akuisisi nutrisi, yaitu taktik infeksi biotrofik dan nekrotrofik secara berurutan untuk menyerang dan menyebabkan penyakit pada tanaman inang (Alkan dkk. 2015). Pada dasarnya jamur ketika akan menginfeksi sebuah inang maka akan ada tahapan-tahapan yang akan dilakukan. Infeksi yang diakibatkan oleh jamur nekrotrof ini umumnya melibatkan tahapan penempelan konidia, pembentukan kuman, penetrasi ke dalam inang, pembentukan lesi primer, perluasan lesi, dan maserasi jaringan yang diikuti sporulasi (Villafana & Rampersad, 2020). Selanjutnya, jamur biasanya akan memanipulasi proses-proses pertumbuhan dan perkembangan dari inangnya, dalam hal ini jamur *Colletotrichum* sp. ini dapat mempengaruhi proses pematangan buah cabai (*Capsicum annuum* L.).

seperti contohnya yang diutarakan oleh Alkan dkk. (2015) menyatakan bahwa *C. gloeosporioides* dapat menginduksi biosintesis etilen, etilen ini terlibat dalam tahap pematangan buah tomat, yaitu perubahan warna dari hijau menjadi kuning kecoklatan, merah muda, atau merah.

Cutinase (EC: 3.1.1.74) adalah anggota keluarga lipase alfa/beta hidrolase (Villafana & Rampersad, 2020). Enzim ini mampu menghidrolisis ester asam lemak dan triasilgliserol yang dimulsi seefisien seefisien lipase, dan oleh karena itu, enzim ini dianggap sebagai perantara esterase dan lipase (Nyyssölä, 2015). Enzim cutinase ini mampu menghidrolisis ikatan ester dalam kutin yang merupakan komponen penting dalam kutikula yang ditemukan pada tanaman tingkat tinggi (Li dkk., 2021). Adapun enzim ini berperan dalam penyerapan karbon untuk pertumbuhan saprofit, peletakan struktur jamur pada permukaan inang, dan tahap awal penetrasi jamur (Auyong, 2015). Monomer cutin ini dapat memicu dan mengeskpresikan sintesis cutinase yang diperlukan jamur untuk melakukan penetrasi ke dalam jaringan tanaman. Maka dari itu, protein cutinase memiliki peran yang penting dalam pensinyalan permukaan tanaman yang memunculkan diferensiasi struktur jamur yang diperlukan untuk infeksi (Villafana & Rampersad, 2020).

Pada jamur *Colletotrichum sp.*, enzim cutinase memainkan peran penting di awal infeksi. Setelah spora menempel pada tanaman, jamur ini membentuk appressorium, sebuah struktur khusus untuk menembus lapisan luar tanaman yang disebut kutikula. Appressorium lalu mengeluarkan cutinase untuk melarutkan lapisan kutin, memfasilitasi penetrasi dan invasi ke dalam jaringan tanaman inang (Li dkk., 2021).

Menargetkan protein ini dengan biofungisida berpotensi mengganggu proses infeksi dan mengendalikan penyebaran *C. gloeosporioides*. Maka dari itu mengidentifikasi senyawa fitokimia dengan afinitas ikatan yang kuat terhadap protein cutinase (Benatar dkk., 2024). Protein cutinase ini akan dijadikan molekul reseptör atau target. Reseptör sendiri ialah protein atau molekul yang berada di permukaan sel atau juga di dalam sel yang dapat berinteraksi dengan ligan. Menurut Alberts dkk. (2015) fungsi utama reseptör ialah menerima sinyal dari ligan dan meneruskan sinyal tersebut ke dalam sel untuk menghasilkan respon fisiologis.

2.1.5 *In Silico* dan *Molecular Docking*

In silico adalah salah satu metode yang dapat digunakan untuk mencari senyawa kandidat yang dijadikan sebagai bahan pestisida untuk mengendalikan hama atau penyakit tanaman. penggunaan metode ini banyak sekali keuntungan yang didapat yaitu efisiensi biaya penelitian dan efisiensi mencari senyawa – senyawa kandidat yang dapat berpotensi terhadap target dalam bentuk visualisasi dan dapat dilakukan metode lanjutan yaitu *molecular docking*. Secara umum *in silico* ini dipilih dibandingkan dengan metode lain seperti *in vivo* dan *in vitro* untuk membantu memprediksi serta memberikan hipotesis tentang aktivitas suatu senyawa atau ligan karena proses dari keduanya terkadang sulit menjelaskan secara sederhana terjadinya mekanisme ligan dan target serta membutuhkan waktu yang lebih panjang dan biaya yang tidak murah (Mirza, 2019). Dalam hal ini penggunaan metode pengujian *in silico* sebaiknya digunakan sebelum di uji *in vitro* dan *in vivo*. Karena metode pengujian *in silico* digunakan untuk merancang, memprediksi stabilitas, sifat fisika dan kimia, serta mengoptimalkan ekspresi dari host (Dana dkk., 2020).

Metode ini digunakan untuk memvisualkan molekul tiga dimensi (3D) yang dapat dilakukan atau digabungkan dengan *real-time* (Foscato & Jensen, 2020). Pada tahun 1989 bertempat di Los Alamos, New Meksiko, istilah *in silico* ini digunakan dalam workshop yang berjudul *Cellular Automata: Theory and Application*. Penggunaan *in silico* ini juga berkontribusi dalam penanganan penyakit baru dan pengembangan obatnya (Khaerunnisa dkk., 2020).

Molecular docking ini menjadi salah satu dari penggunaan berbasis komputerisasi yang dapat digunakan untuk menentukan pola interaksi antara molekul ligan dan reseptor. Untuk saat ini penelitian yang berbasis *molecular docking* ini ialah farmasi dan biologi, namun dapat berkembang ke ranah pertanian atau kelautan. Biasanya proses *docking* sangat penting dalam dunia medis untuk merancang, mengoptimalkan, dan menemukan obat (Hardjono, 2015). Molekular dapat menjelaskan mekanisme interaksi antara senyawa metabolit sekunder dari tumbuhan dengan protein yang berperan pada pertumbuhan sel kanker (Komari dkk., 2022). Dalam hal ini yang berinteraksi ialah antara senyawa metabolit

sekunder pada minyak atsiri biji kelor dan protein yang ada pada *Colletotrichum* sp. berapa scoring yang terjadi. Dengan hal ini dapat mengetahui bagaimana pengembangan selanjutnya dan dapat diuji secara *in vitro* dan *in vivo*. Metode ini dilakukan dengan dua langkah dasar, yaitu konformasi dan posisi ligan serta pengikatannya, serta metode pengambilan sampel dan skema analisis akhir. (Meng dkk., 2012).

Proses *docking* ini masuk kedalam uji *in silico* karena dapat memprediksi aktivitas molekul terhadap sel target. *Docking* ini bertujuan untuk mengetahui, menyelaraskan dan menyesuaikan antara molekul kecil (ligan) dan molekul besar (protein). Adapun tujuan dari Molecular Docking Aktivitas Senyawa Antioksidan yaitu untuk mengetahui aktivitas senyawa antioksidan pada beberapa tanaman di Indonesia (Novia Fransiska dkk., 2023). Hasil dari *docking* ini biasanya dalam bentuk *Rerank score* (RS) atau nilai energi. Biasanya proses *docking* ini dilakukan pada sektor farmasi dan biologi. Pada sektor pertanian, proses ini bisa saja menyasar produk aplikatif berupa pestisida untuk mengendalikan masalah hama dan penyakit pada tanaman (Aditya Parikesit dkk., 2017).

Beberapa software yang dapat digunakan dalam *molecular docking* yaitu discovery studio yang dapat digunakan untuk mengedit, visualisasi, membuka dan melakukan analisis data. AutoDock Vina yang digunakan untuk melakukan *scoring* atau *screening virtual*. PyMOL yang digunakan untuk menampilkan gambar 3D serta untuk memahami struktur biologi. Serta situs website yaitu PDB (Protein data bank) (<https://www.rcsb.org/>) yang digunakan untuk mengunduh makro molekul biologis. PubChem (<https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/>) yang digunakan untuk mengunduh struktur 3D senyawa ligan atau senyawa kimia yang digunakan dalam penambatan. Pass Server (Way2Drug) (<https://www.pharmaexpert.ru/passonline/>) yang digunakan untuk bioaktivitas dari senyawa tersebut (Widodo dkk., 2018).

Menurut Stefaniu (2019) terdapat beberapa langkah yang digunakan untuk mempelajari *Molecular docking* yaitu sebagai berikut:

- a. Preparasi ligan, optimalisasi ligan dan analisis struktur 3D. Diantara beberapa konformer ligan yang digunakan adalah yang paling stabil.

- b. Preparasi reseptor. Penggunaan protein harus fleksibel dalam mengikat ligannya sehingga molekul air harus dilepaskan sebelum melakukan *docking*.
- c. Identifikasi *binding site*. Langkah ini memiliki peranan penting dalam merancang obat dengan komputasi yang digunakan untuk mengidentifikasi dan menganalisa lokasi yang mengikat dan memprediksi reseptor.

2.1 Kerangka Pemikiran

Gangguan penyakit pada tanaman cabai sangat kompleks, baik pada musim hujan maupun pada musim kemarau (Inaya dkk., 2022). Salah satu penyakit utama yang membatasi produksi adalah antraknosa, juga dikenal sebagai patek, yang disebabkan oleh jamur *Colletotrichum* sp. dan menyerang hampir semua tanaman cabai di dunia (Oo & Oh, 2016). Serangan OPT (organisme Pengganggu Tanaman) masih menjadi tantangan yang memerlukan manajemen yang terpadu dan sistematis.

Pengendalian penyakit antraknosa biasanya dilakukan dengan menggunakan fungisida sintetis. Namun, metode ini memiliki konsekuensi yang merugikan, termasuk residu berbahaya pada buah cabai, pencemaran lingkungan, kematian mikroba yang bermanfaat, dan berkembangnya strain *Colletotrichum* yang resisten terhadap bahan kimia (Andriani dkk., 2017). Oleh karena itu, dibutuhkan alternatif pengendalian antraknosa cabai yang tidak hanya efektif, tetapi juga mengurangi dampak negatif. Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah penggunaan ekstrak tanaman sebagai fungisida nabati. Didalam ekstrak tanaman sendiri biasanya mengeluarkan metabolit sekunder. Senyawa antijamur yang berasal dari tanaman sebagian besar, diketahui merupakan metabolit sekunder tanaman, terutama golongan fenolik dan terpen dalam minyak atsiri (Ningsih dkk., 2017).

Salah satu tanaman yang memiliki minyak atsiri ialah kelor (*Moringa oleifera* L.). Bagian tanaman kelor seperti akar, bunga, kulit batang, batang, daun dan biji kelor memiliki kandungan senyawa yang bersifat antimikroba (Yahya dkk., 2021). Hal ini diperkuat oleh pernyataan dari Santoso (2023) pada ekstrak biji kelor mengandung senyawa alkaloid, fenolik, saponin, tannin, steroid/triterpenoid, flavonoid, dan glikosida. Kandungan lainnya ialah protein kationik, kuersetin, 4-

(α -L-ramnosiloksi)-benzil isotiosianat, fenol, 2,4-bis(1,1-dimetil), kaemferol, napin-1A peptida. Dengan adanya beberapa senyawa yang berpotensi menjadi fungisida nabati seperti alkaloid dan flavonoid yang dapat merusak sel-sel yang ada pada jamur.

Hal tersebut diperkuat oleh penelitian yang dilakukan oleh Rahayu (2009) senyawa alkaloid mampu menekan pertumbuhan jamur dan merusak komponen yang ada di dalam sel jamur dengan cara mendenaturasi protein sehingga menyebabkan degradasi membran dan mati, sedangkan menurut Soetan dkk. (2006) senyawa flavonoid dapat mengganggu membran sel jamur dengan membentuk protein ekstraseluler dan merusak dinding sel jamur. Ekstrak tanaman yang kaya akan sineol, minyak atsiri dan alkaloid dapat berfungsi sebagai biofungisida dengan sifat anti bakteri dan antijamur (Rosdiana dkk., 2024).

Karena hal tersebut maka diperlukan pendekatan penelitian yang mencakup uji *in silico*, *in vitro*, dan *in vivo*. Uji *in silico* dengan metode *molecular docking* dapat memvisualisasikan struktur kompleks yang terbentuk dari interaksi dua atau lebih molekul contohnya protein dan asam nukleat (Ruyck dkk., 2016). Lebih lanjut, menurut Aamir dkk. (2018) uji *in silico* dengan metode *molecular docking* yang diikuti oleh penilaian *in vitro* dapat berguna untuk mengembangkan formulasi komersial fungisida baru, baik secara tunggal atau kombinasi dengan fungisida yang lebih baik, atau digunakan dengan pendekatan terintegrasi lainnya seperti yang telah dilakukan dalam pengelolaan penyakit fusarium pada buah tomat. Selanjutnya dari uji *in silico* dilakukan validasi dengan eksperimen *in vitro* untuk mengevaluasi kemampuan minyak atsiri biji kelor dalam menghambat pertumbuhan *Colletototrichum* sp. di laboratorium. Pada penelitian *in vivo* dilakukan untuk menilai efektifitas miyak atsiri biji kelor pada kondisi nyata buah cabai yang terinfeksi secara langsung dan *real-time*, karena analisis dilakukan pada organisme hidup tempat interaksi protein-protein terjadi.

Pada penelitian yang dilaporkan Yahya dkk. (2021b) perlakuan ekstrak biji kelor terhadap *Alternaria* sp. memiliki persentase penghambatan sebesar 53,2% dengan diameter 5,37 cm, dengan berat miselium 0,21 gram yang dilakukan secara *in vitro*, selanjutnya rerata diameter gejala cendawan *Alternaria* sp. sebesar 1,71 cm

dan persentase penghambatannya sebesar 49% pada *in vivo*, sehingga ekstrak biji kelor cukup efektif sebagai penghambatan pestisida. Pada laporan penelitian Nugraheni dkk. (2014) yang menggunakan minyak atsiri serai wangi terhadap *Colletotrichum gloeosporioides* didapat persentase hambatannya tebesar 90.22% dengan menggunakan konsentrasi sebesar 1500 ppm dan pada konsentrasi paling rendah 500 ppm didapat daya hambatnya sebesar 25.56% pada hari ketujuh pengamatan. Lebih lanjut pada penelitian tersebut yang menggunakan konsentrasi 500 ppm, 750 ppm, 1000 ppm, 1250 ppm, dan 1500 ppm. Penggunaan konsentrasi tersebut didapat persentase hambatan yang cukup tinggi, apakah dengan menggunakan minyak atsiri biji kelor dapat menghambat *Colletotrichum* sp. pada tanaman cabai.

Dari uraian di atas minyak atsiri biji kelor (*Moringa oleifera*) dapat berpotensi sebagai fungisida nabati yang efektif untuk mengendalikan penyakit antraknosa (*Colletotrichum* sp.) pada cabai dengan pengujian *in silico* (*molecular docking*), *in vitro*, dan *in vivo*. Dengan konsentrasi pada pengujian *in vitro* ialah 750 ppm, 1000 ppm, 1250 ppm, dan 1500 ppm.

2.2 Hipotesis

Berdasarkan kajian dan kerangka pemikiran diatas maka hipotesis yang akan dikemukakan oleh peneliti adalah:

- a. Dapat diketahui interaksi pengikatan molekul ligan dari senyawa metabolit minyak atsiri biji kelor (*Moringa oleifera* L.) pada protein cutinase dari *Colletotrichum* sp.
- b. Dapat diketahui bahwa minyak atsiri biji kelor dapat mengendalikan penyakit antraknosa (*Colletotrichum* sp.) pada tanaman cabai merah besar (*Capsicum annuum* L.).
- c. Dapat diketahui konsentrasi minyak atsiri biji kelor (*Moringa oleifera* L.) yang paling efektif dalam mengendalikan penyakit antraknosa (*Colletotrichum* sp.) pada buah cabai (*Capsicum annuum* L.).