

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA, KERANGKA BERPIKIR, DAN HIPOTESIS

2.1 Tinjauan pustaka

2.1.1 Penyakit antraknosa (*Colletotrichum spp.*)

Antraknosa merupakan penyakit tanaman yang disebabkan oleh jamur fitopatogen dari genus *Colletotrichum*. Antraknosa merupakan penyakit yang paling umum menyerang pada pertanaman hortikultura (Aisyah dkk., 2023). Infeksi patogen ini dapat terjadi sejak masa budidaya di lapangan sampai periode penyimpanan pascapanen (Zhafarina, Wibowo, dan Widiastuti., 2021). Dalam budidaya cabai rawit sendiri, penyakit antraknosa menjadi kendala utama karena dapat menyebabkan kehilangan hasil panen mencapai 100% (Syahfitri dkk., 2018). Terdapat banyak jenis keragaman spesies *Colletotrichum* yang diketahui banyak ditemukan menyerang tanaman cabai di Indonesia seperti *Colletotrichum acutatum*, *Colletotrichum gloeosporioides* dan *Colletotrichum capsici* (Anggrahini dkk., 2020).

Gejala yang ditimbulkan akibat infeksi jamur *Colletotrichum* yaitu gejala nekrosis berwarna cokelat kehitaman yang ditemukan pada buah, daun, dan ranting tanaman cabai rawit (Hodiyah dkk., 2024). Pada buah cabai gejala antraknosa dimulai dengan munculnya bercak-bercak berwarna cokelat gelap, kemudian berkembang menjadi area busuk lunak. Pada bagian tengah buah terdapat kumpulan titik-titik hitam disebut *acervulus* yang menyebabkan buah menjadi kering dan keriput (Anggrahini dkk., 2020; Mariana dkk., 2021). Pada daun, gejala yang terjadi berupa bercak-bercak kecil berwarna cokelat muda atau kuning. Bercak-bercak ini pada awalnya kecil, kemudian membesar, akhirnya menyatu dan membentuk lesi yang besar (Hodiyah dkk., 2024).

Jamur *Colletotrichum* merupakan genus jamur yang dikenal sebagai agen penyebab penyakit antraknosa. Salah satu faktor virulensi utama patogen ini adalah kemampuannya untuk menembus dan menginfeksi jaringan tanaman inang melalui kutikula, yang merupakan lapisan pelindung luar tanaman yang tersusun dari polimer lemak bernama kutin (Villafana and Rampersad, 2020).

Protein merupakan komponen utama dalam struktur dan fungsi sel jamur. Protein CDC42 termasuk dalam kelompok *small GTPase* yang berfungsi sebagai pengatur utama dalam pembentukan dan pertumbuhan sel jamur, termasuk pembentukan *appressorium*, yaitu struktur yang digunakan jamur *Colletotrichum* untuk menembus dan menginfeksi tanaman. Protein ini tidak bekerja sendiri, tetapi saling berhubungan dengan protein lain seperti SHO1, STE50, SPA2, dan CLA4, yang semuanya terlibat dalam jalur MAPK (*Mitogen-Activated Protein Kinase*) yaitu jalur sinyal pertumbuhan dan infeksi jamur. Jika kerja CDC42 terganggu, maka bisa menyebabkan gangguan pada keseluruhan proses infeksi jamur, mulai dari pertumbuhan hifa jamur, reproduksi, hingga pengaturan bentuk sel jamur. (Papathoti *et al.*, 2022)

Cutinase (EC 3.1.1.74) merupakan enzim ekstraseluler yang termasuk kedalam anggota keluarga lipase *alfa/beta hydrolase* (Nyyssölä, 2015; Villafana and Rampersad, 2020). Enzim *cutinase* ini mampu menghidrolisis ikatan ester dalam kutin yang merupakan komponen utama dalam kutikula yang ditemukan pada tanaman tingkat tinggi (Li *et al.*, 2021), sehingga dapat memfasilitasi penetrasi patogen melalui kutikula tanaman.

Pada *Colletotrichum* sp, *cutinase* berperan sebagai enzim kunci dalam tahap awal infeksi patogen, khususnya dalam penetrasi primer ke jaringan tanaman inang. Setelah spora jamur mendarat di permukaan tanaman, jamur membentuk struktur infeksi khusus yang disebut *appressorium*, yang digunakan untuk menembus kutikula. Selama proses ini, *cutinase* diekspresikan dan disekresikan oleh *appressorium* untuk memecah lapisan kutin, yang memungkinkan jamur menembus dan menginviasi jaringan tanaman.

2.1.2 Pestisida nabati

Organisasi Pangan Dunia *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) mendefinisikan pestisida sebagai zat atau campuran zat yang digunakan untuk mengendalikan, mencegah, memusnahkan hama, hewan, atau penyakit yang disebabkan oleh vektor, tanaman tidak diinginkan, atau spesies hewan yang mempengaruhi produksi, pengelolaan, penyimpanan, pengangkutan,

dan penjualan produk pangan (Pathak *et al.*, 2022). Dalam artikel lain Daraban, Hlihor, and Suteu., (2023) mendefinisikan pestisida sebagai zat kimia yang dirancang untuk membunuh atau menunda pertumbuhan serangga, tikus, jamur, dan gulma yang mengganggu atau merusak pertumbuhan tanaman, semak, pohon, hutan, dan vegetasi lain yang dimaksudkan untuk kepentingan manusia.

Semua jenis pestisida kimia pada dasarnya beracun dan dapat menyebabkan risiko jangka panjang bagi lingkungan dan manusia karena daya tahannya di lingkungan atau dalam jaringan organisme. Mayoritas pestisida bersifat tidak spesifik dan dapat membunuh organisme lain yang tidak berbahaya atau bahkan bermanfaat. Oleh karena itu diperlukannya alternatif lain yang bisa meminimalisir dampak dari penggunaan pestisida kimia salah satunya yaitu biopestisida.

Biopestisida didefinisikan sebagai produk alami dari organisme hidup termasuk tanaman, nematoda, dan mikroorganisme seperti jamur, bakteri, dan virus yang membatasi atau mengurangi populasi hama (Samada dan Tambunan, 2020). Sementara *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (FAO) dan *World Health Organization* (WHO) mendefinisikan biopestisida sebagai konsep umum yang diterapkan untuk produk alami yang berasal dari alam, seperti mikroorganisme atau tanaman, atau zat semiokimia, yang dapat dirancang dan diterapkan dalam formulasi yang mirip dengan pestisida kimia konvensional dan biasanya digunakan untuk pengendalian jangka pendek. (FAO dan WHO, 2017).

Salah satu turunan dari biopestisida adalah pestisida nabati, yaitu zat alami yang diekstraksi dari tanaman yang digunakan untuk mengelola hama dan penyakit pertanian (Souto *et al.*, 2021). Pestisida nabati bukan sekadar bahan mentah dari tumbuhan, melainkan bahan yang dihasilkan dari tumbuhan dalam keadaan segar atau kering. Sebagian besar pestisida nabati adalah metabolit sekunder dalam tumbuhan atau bagian-bagiannya yang berfungsi sebagai pestisida yang diekstraksi menggunakan pelarut yang dapat melarutkan bahan aktif kimia di dalamnya. Pelarut yang paling umum digunakan adalah air, etanol, aseton, dan pelarut organik lainnya (Haritha *et al.*, 2021).

2.1.3 Daun kelor

Tanaman kelor (*Moringa oleifera*) dikenal juga sebagai pohon ajaib (*The Miracle Tree*) merupakan salah satu tanaman yang terkenal karena kandungan nutrisi dan keserbagunaan nya sebagai obat. Hampir setiap bagian dari tanaman ini bermanfaat secara ilmiah, mulai dari akar, kulit kayu, getah, daun, bunga, buah, hingga bijinya. Tanaman yang termasuk dalam family *Moringaceae* ini termasuk tanaman berjenis perdu berumur panjang berupa semak atau pohon dengan ketinggian 7 sampai 12 meter dan memiliki diameter kurang lebih 30 cm. daun tanaman kelor memiliki karakteristik berwarna hijau, bersirip tak sempurna, kecil, berbentuk telur, beranak daun gasal, dan tersusun majemuk dalam satu tangkai (Marhaeni, 2021). Pohon dan daun kelor dapat dilihat pada Gambar 1 dan 2.



Gambar 1 Pohon Kelor (*Moringa oleifera*)



Gambar 2 Daun Kelor (*Moringa oleifera*)

Berdasarkan data *Global Biodiversity Information Facility* (GBIF, 2023) tanaman kelor memiliki klasifikasi taksonomi sebagai berikut:

Kingdom	:	Plantae
Phylum	:	Tracheophyta
Class	:	Magnoliopsida
Ordo	:	Brassicales
Family	:	Moringaceae
Genus	:	<i>Moringa</i>
Species	:	<i>Moringa oleifera</i> Lamk.

Tanaman kelor (*Moringa oleifera*) telah digunakan secara tradisional untuk berbagai keperluan kesehatan dan pengobatan. Daun dari tanaman ini dipilih karena potensi senyawa bioaktif yang terkandung di dalamnya. Beberapa penelitian terdahulu telah menemukan potensi farmakologis dari daun kelor, seperti aktivitas antimikroba, antioksidan, antikanker, dan antijamur yang sebagian besar disebabkan oleh kandungan senyawa bioaktif di dalamnya.

Beberapa kelompok senyawa bioaktif utama yang ditemukan dalam daun kelor yaitu glikosida, flavonoid, alkaloid, saponin, tanin, dan fenol (Ayirezang Azumah, and Achio., 2020). Flavonoid merupakan senyawa fenolik yang dikenal memiliki aktivitas antioksidan tinggi. Flavonoid dapat mengganggu permeabilitas sel jamur dengan berinteraksi dengan membran, yang menyebabkan deformasi protein membran, mengganggu protein membran dan menghambat aktivitas enzim yang terkait dengan membran (Pusztahelyi, Holb, and Pocsi., 2015). Pada daun kelor senyawa flavonoid yang diidentifikasi yang memiliki aktivitas antimikroba berupa *quercetin* dan *kaempferol* (Ahmadu *et al.*, 2021). Alkaloid bekerja dengan melibatkan penghambatan sintesis dinding sel jamur atau mengganggu jalur metabolisme jamur. Sedangkan saponin memiliki aktivitas antijamur dengan cara merusak membran sel jamur dan menyebabkan peningkatan permeabilitas membran dan keluarnya isi sel, yang akhirnya menyebabkan lisis (pecahnya sel) (Pusztahelyi dkk., 2015).

Dalam penelitiannya (Ahmadu *et al.*, 2021) menyatakan bahwa daun kelor mengandung senyawa fenolik, alkaloid, dan saponin yang menunjukkan aktivitas antijamur yang signifikan terhadap *Botrytis cinerea* yang menyebabkan penyakit jamur abu-abu pada tomat. Selain itu Suraka dkk (2022) juga melaporkan bahwa kandungan senyawa bioaktif dari daun kelor menunjukkan aktivitas antijamur terhadap patogen *Aspergillus flavus* dan *Rhizopus stolonifer*. Senyawa alkaloid yang terdeteksi dalam ekstrak daun kelor juga diketahui memiliki aktivitas antijamur yang dapat menghambat pertumbuhan *Penicillium marneffei*, *Cryptococcus* spp., *Candida* spp., *Penicillium* spp., *Epidermophyton* spp., *Microsporum* spp., *Fusarium* spp., *Aspergillus flavus*, *Aspergillus niger*, *Rhizopus* dan *Aspergillus fumigatus* (Bagheri *et al.*, 2020).

2.1.4 Molecular docking

In silico merupakan suatu istilah yang menggambarkan “melakukan di komputer atau melalui simulasi komputer”. Istilah ini pertama kali dikenalkan ke publik pada tahun 1989 pada workshop “*Cellular Automata: Theory and Application*” di Meksiko oleh Pedro Miramontes, seorang ahli matematika dari *National Autonomous University of Mexico* (Khaerunnisa, Suhartati, dan Awaluddin., 2020). Metode *in silico* merupakan pendekatan berbasis komputer yang digunakan untuk mensimulasikan dan memprediksi proses biologis, kimia atau fisik menggunakan algoritma, perangkat lunak, dan model matematika. Metode *in silico* menggunakan alat komputasi untuk menganalisis interaksi obat-protein dengan menghubungkan parameter fisik, kimia dan matematika terutama melalui *molecular docking* dan teknik QSAR (Daniel, 2024).

Metode *in silico* membantu penyaringan ribuan atau bahkan jutaan senyawa potensial dalam waktu singkat sebelum dilakukan uji *in vitro* dan *in vivo*. Metode ini memiliki banyak keuntungan diantaranya efisiensi waktu dan biaya, skrining senyawa potensial dalam waktu singkat, pengurangan uji eksperimental, dan memungkinkan visualisasi mekanisme kerja senyawa terhadap targetnya (Kommalapati *et al.*, 2023). Salah satu aplikasi pendekatan *in silico* paling umum adalah *molecular docking*.

Molecular docking adalah teknik komputasi yang digunakan untuk memprediksi interaksi antara molekul kecil (ligan) dengan protein target. Metode ini membantu dalam penemuan dan pengembangan obat dengan memodelkan pengikatan ligan-protein (Sahu *et al.*, 2024). Sementara Nagtilak (2024) menyatakan bahwa *molecular docking* adalah teknik komputasi yang memodelkan interaksi antara dua atau lebih molekul, terutama berfokus pada interaksi protein-ligan. Ini memainkan peran penting dalam penemuan obat dengan memprediksi afinitas dan konformasi pengikatan, sehingga memfasilitasi identifikasi kandidat obat potensial. Metode ini telah menjadi terkenal karena kemajuan dalam kekuatan komputasi dan algoritma, menjadikannya pendekatan yang cepat dan hemat biaya baik dalam pengaturan penelitian maupun komersial.

Dalam dunia fitopatologi, penerapan *molecular docking* menjadi sangat penting terutama dalam memprediksi dan memahami interaksi antara molekul dengan protein target dalam fitopatogen. Pada dasarnya pestisida bekerja dengan cara mengganggu proses biokimia tertentu di suatu titik target di dalam patogen. *Molecular docking* dapat membantu memodelkan bagaimana molekul pestisida berinteraksi dengan protein targetnya. Dengan adanya teknik *molecular docking* hal ini dapat membantu memahami bagaimana perubahan pada target dapat mempengaruhi efektivitas pestisida, serta dapat menjelaskan mengapa beberapa molekul lebih beracun dibandingkan yang lain (Mishra *et al.*, 2019).

2.2 Kerangka berpikir

Cabai rawit (*Capsicum frutescens* L.) adalah salah satu komoditas sayuran yang banyak dibudidayakan di Indonesia. Cabai rawit banyak dikonsumsi baik dalam bentuk segar maupun olahan. Pada umumnya cabai rawit digunakan dalam industri makanan sebagai bahan tambahan dan penyedap untuk meningkatkan citarasa makanan. Selain itu cabai rawit juga banyak diolah untuk digunakan sebagai bahan baku industri makanan seperti saus, bubuk cabai, penyedap serta industri farmasi (Sofiarani dan Ambarwati, 2020).

Antraknosa merupakan salah satu penyakit penting dalam budidaya cabai rawit yang dapat menyebabkan kerugian sampai 100% (Syahfitri dkk., 2018). Penyakit antraknosa menyerang buah cabai yang ditandai dengan munculnya bintik bintik kecil kehitaman dan sedikit melekuk. Pada serangan parah, bercak akan bersatu dan merata hampir di seluruh permukaan kulit buah. Selanjutnya buah yang terinfeksi mengerut, membusuk dan rontok (Prihatiningsih, Djatmiko, dan Erminawati., 2020). Sampai sekarang pengendalian penyakit ini masih bertumpu pada penggunaan pestisida kimia yang memiliki banyak kekurangan, terutama paparan residu yang bisa berdampak pada makhluk hidup dan lingkungan.

Kemajuan teknologi saat ini dapat dimanfaatkan dalam bidang pertanian khususnya untuk menemukan senyawa kimia yang berpotensi mengatasi penyakit pada tanaman. Salah satu metode yang bisa digunakan yaitu pendekatan *in silico* dengan *molecular docking*. *Molecular docking* adalah teknik komputasi yang

memodelkan interaksi antara dua atau lebih molekul, terutama berfokus pada interaksi protein-ligan. Ini memainkan peran penting dalam penemuan obat dengan memprediksi afinitas dan konformasi pengikatan, sehingga memfasilitasi identifikasi kandidat obat potensial (Nagtilak, 2024).

Pengujian *in silico* menggunakan metode *molecular docking*, yang kemudian dilanjutkan dengan evaluasi *in vitro*, berpotensi membantu dalam pengembangan formulasi fungisida komersial baru. Fungisida ini dapat dirancang untuk digunakan secara mandiri, dikombinasikan dengan fungisida lain yang lebih efektif, atau diterapkan sebagai bagian dari pendekatan pengelolaan terpadu (Aamir *et al.*, 2018).

Dalam salah satu kasus aplikasi *molecular docking* digunakan untuk mengidentifikasi *fitoaleksin*, khususnya *Spirobrassinin*, sebagai agen antijamur potensial terhadap *Alternaria brassicicola* dan *Alternaria brassicae*, patogen utama penyakit *blight* pada tanaman mustard rapeseed (Pathak *et al.*, 2016). Dalam kasus lain metode *molecular docking* ini telah digunakan untuk mengilustrasikan mode pengikatan senyawa turunan *nereistoksin* terhadap penghambatan enzim *asetilkolinesterase* (AChE) pada serangga hama (Yan *et al.*, 2024).

Daun kelor memiliki kandungan senyawa flavonoid, triterpenoida, saponin, dan tanin yang mampu menghambat pertumbuhan jamur (Amira dan Panggeso, 2022). Senyawa flavonoid memiliki kemampuan untuk menghambat aktivitas enzim, mengganggu membran sel jamur, dan menekan jalur biosintesis yang esensial bagi pertumbuhan dan infeksi jamur. Oniha *et al* (2021) menyebutkan bahwa ekstrak daun kelor dengan konsentrasi 1,56% mampu menghambat pertumbuhan (*Minimum Inhibitory Concentration*) jamur *Aspergillus* spp., *Penicillium* spp., *Rhizopus* spp., dan *Trichoderma* spp. Sementara itu, nilai *Minimum Fungicidal Concentration* (MFC), yaitu konsentrasi minimum untuk membunuh jamur, berada pada rentang 3,12% sampai 6,25%. Ekstrak daun kelor memiliki aktivitas senyawa antijamur yang setara atau lebih tinggi dari fungisida ketoconazole.

Dalam penelitian Lestari dan Panggeso (2022) menyebutkan bahwa ekstrak daun kelor dengan konsentrasi 5% mampu menekan pertumbuhan jamur *Fusarium*

oxysporum secara *in vitro* dengan daya hambat sebesar 25,92%. Penelitian lain (Erawati, Yulia, dan Dono., 2023) menyebutkan bahwa ekstrak kelor 5% dengan tambahan POC mampu menekan kejadian penyakit akibat jamur *Alternaria solani* sampai 77,8% secara *in vivo* pada buah tomat. Sementara dalam penelitian Amira dan Panggeso (2022) mengungkapkan bahwa ekstrak daun kelor 0,5 % mampu menghambat pertumbuhan *Colletotrichum capsici* secara *in vitro* dengan daya hambat sebesar 65,83%. Namun, Ekstrak yang digunakan berupa ekstrak pekat yang diperoleh melalui proses pengentalan menggunakan vacuum rotary evaporator. Namun, penggunaan *vacuum rotary evaporator* terbatas pada laboratorium dan sulit diakses oleh petani. Oleh karena itu, diperlukan pengujian ulang dengan metode maserasi yang lebih sederhana, disertai variasi konsentrasi lebih tinggi, untuk meningkatkan efektivitasnya dalam menghambat *Colletotrichum* sp. baik secara *in vitro* maupun *in vivo*.

Oleh karena itu, daun kelor berpotensi menjadi fungisida alami yang efektif untuk mengendalikan penyakit antraknosa pada cabai rawit, dengan mengidentifikasi kesesuaian senyawa kimianya menggunakan teknik *molecular docking* secara *in silico* dan mengukur aktivitas penghambatannya secara *in vitro* dan *in vivo*.

2.3 Hipotesis

Berdasarkan uraian pada kerangka berpikir di atas, maka dirumuskan hipotesis sebagai berikut:

1. Terdapat senyawa bioaktif dalam ekstrak daun kelor yang mampu mengikat protein penting didalam jamur *Colletotrichum* sp. dan diketahui mekanisme interaksinya yang dianalisis melalui metode *in silico* dengan pendekatan matematis dan komputasional.
2. Ekstrak daun kelor mampu mengendalikan jamur *Colletotrichum* sp. pada buah cabai rawit berdasarkan uji statistik.
3. Diketahui konsentrasi ekstrak daun kelor yang paling baik dalam menghambat pertumbuhan *Colletotrichum* sp. pada buah cabai rawit berdasarkan uji statistik.