

DINAMIKA DAN ADAPTASI GULMA PADA SISTEM BUDIDAYA KEDELAI JENUH AIR DI LAHAN RAWA: KAJIAN LITERATUR

WEED DYNAMICS AND ADAPTATION IN WATERLOGGED SOYBEAN CULTIVATION SYSTEMS IN SWAMPY AREAS: A LITERATURE REVIEW

Edi Susilo^{1)*}, Wismalinda Rita²⁾, Hesti Pujiwati³⁾

¹⁾Program Studi Agroteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Ratu Samban, Jl. Jenderal Sudirman No. 87 Arga Makmur, Kabupaten Bengkulu Utara, Propinsi Bengkulu, Indonesia

²⁾Program Studi Peternakan, Fakultas Pertanian dan Peternakan, Universitas Muhammadiyah Bengkulu, Jl. Bali, Kampung. Bali, Teluk Segara, Kota Bengkulu, Propinsi Bengkulu, Indonesia

³⁾Program Studi Agroekoteknologi, Jurusan Budidaya Pertanian, Fakultas Pertanian, Universitas Bengkulu, Jl. WR Supratman Kandang Limun Kota Bengkulu, Propinsi Bengkulu, Indonesia

*Korespondensi author email: susilo_agr@yahoo.com

ABSTRAK

Lahan rawa memiliki peluang besar untuk mendukung perluasan produksi kedelai, tetapi pemanfaatannya menghadapi kendala hidrologi, kimia tanah, dan keberadaan gulma yang beradaptasi terhadap kondisi jenuh air. Ringkasan ini menjelaskan bahwa pengaturan muka air membentuk tekanan selektif berupa hipoksia atau anoksia yang menekan gulma darat sensitif, sekaligus mendorong dominansi spesies semiakuatik yang mampu membentuk aerenkim, akar adventif, metabolisme fermentatif, dormansi biji, dan penyebaran melalui air. Perubahan komunitas tersebut memengaruhi kompetisi gulma dengan kedelai dalam memperoleh cahaya, unsur hara, air, dan ruang tumbuh, serta memperkuat pengaruh alelopati. Karena itu, pengelolaan gulma perlu mengintegrasikan tata air, teknik budidaya, penyiangan mekanis, penggunaan herbisida secara selektif, pengelolaan bank biji, dan pemanfaatan bioherbisida berbasis alelokimia agar produktivitas kedelai meningkat tanpa memperbesar risiko pencemaran dan resistensi gulma..

Kata kunci : kedelai, lahan rawa, sistem jenuh air, dinamika gulma, bioherbisida

ABSTRACT

Swamplands offer significant potential to support expanded soybean production, but their utilization faces challenges from hydrology, soil chemistry, and the presence of weeds adapted to water-saturated conditions. This summary explains that water table regulation creates selective pressures in the form of hypoxia or anoxia, which suppress sensitive terrestrial weeds, while simultaneously promoting the dominance of semi-aquatic species capable of aerenchyma formation, adventitious roots, fermentative metabolism, seed dormancy, and waterborne dispersal. These community changes influence weed competition with soybeans for light, nutrients, water, and growing space, and enhance allelopathic influences. Therefore, weed management requires integrating water management, cultivation techniques, mechanical weeding, selective herbicide use, seed bank management, and allelochemical-based bioherbicides to increase soybean productivity without increasing the risk of pollution and weed resistance.

Keywords: soybeans, swamplands, water-saturated systems, weed dynamics, bioherbicides

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang

Keterbatasan lahan subur di Pulau Jawa mendorong pemanfaatan lahan. Keterbatasan lahan subur di wilayah sentra produksi mendorong pemanfaatan lahan

suboptimal, termasuk rawa pasang surut dan rawa lebak, untuk pengembangan kedelai. Lahan rawa memiliki luasan yang besar dan berpotensi memperluas basis produksi pangan di luar Pulau Jawa. Meskipun demikian, keberhasilannya sangat

bergantung pada kemampuan teknologi budidaya dalam mengendalikan kelebihan air, kemasaman, ketidakstabilan unsur hara, dan gangguan biotik. Sistem budidaya jenuh air dikembangkan sebagai pendekatan yang mempertahankan kelembapan tanah secara stabil tanpa merendam penuh tajuk tanaman, sehingga kedelai dapat memanfaatkan air secara lebih efisien pada lingkungan rawa (Sagala et al., 2011).

Lahan rawa bukan sekadar lahan dengan kandungan air tinggi, melainkan ekosistem yang mengalami perubahan muka air, kondisi reduksi-oksidasi, dan aktivitas mikroorganisme secara dinamis. Perubahan tersebut menentukan ketersediaan unsur hara, pembentukan senyawa toksik, serta kemampuan akar tanaman memperoleh oksigen. Dalam konteks produksi kedelai, tantangan ini menjadi semakin kompleks karena tanaman harus beradaptasi terhadap hipoksia, sementara gulma tertentu justru memperoleh keuntungan ekologis dari lingkungan basah. Oleh sebab itu, pemanfaatan rawa memerlukan pengelolaan yang menyatukan konservasi lingkungan, tata air, pemilihan varietas, dan pengendalian organisme pengganggu (Susilawati et al., 2017).

Gulma merupakan pembatas biotik penting karena mengurangi ketersediaan sumber daya bagi kedelai sejak fase awal pertumbuhan. Persaingan terjadi melalui perebutan cahaya, air, ruang tumbuh, dan unsur hara, sedangkan sebagian gulma menghasilkan metabolit sekunder yang menekan perkecambahan atau pertumbuhan tanaman utama. Pada infestasi berat dan tanpa pengendalian, kehilangan hasil kedelai dapat menjadi sangat besar karena tajuk tanaman terlambat menutup, pertumbuhan akar terganggu, dan pembentukan polong

berkurang. Besarnya dampak tersebut menunjukkan bahwa pengendalian gulma harus diposisikan sebagai bagian utama dari strategi peningkatan produktivitas, bukan sekadar kegiatan tambahan setelah gulma terlihat dominan (Efendy et al., 2020).

Kondisi jenuh air mengubah hubungan antara tanaman, tanah, dan gulma melalui penurunan difusi oksigen ke dalam pori tanah. Tekanan tersebut menyeleksi spesies berdasarkan kemampuan bertahan pada lingkungan anaerob. Gulma darat yang tidak memiliki mekanisme toleransi akan mengalami hambatan perkecambahan dan pertumbuhan, sedangkan gulma yang mampu mempertahankan metabolisme pada oksigen rendah dapat meningkatkan dominansinya. Akibatnya, komposisi komunitas tidak bersifat tetap, tetapi bergeser mengikuti kedalaman air, lama genangan, pengeringan, pengolahan tanah, dan karakteristik bank biji yang tersedia di dalam profil tanah (Paiman, Ardiyanta, et al., 2022).

Kajian mengenai dinamika gulma pada budidaya kedelai jenuh air penting karena strategi pengendalian yang efektif di lahan kering belum tentu memberikan hasil sama di lahan rawa. Penggunaan herbisida tanpa memahami ekologi gulma dapat menekan spesies sensitif, tetapi sekaligus memberi ruang bagi spesies toleran untuk berkembang. Pendekatan ekologis dibutuhkan untuk mengenali perubahan komposisi, periode kritis persaingan, pola regenerasi dari bank biji, dan mekanisme adaptasi yang memungkinkan gulma bertahan. Pemahaman tersebut menjadi dasar penyusunan pengelolaan terpadu yang lebih efektif, ekonomis, dan berkelanjutan (Ahadiyat & Sarjito, 2022).

2. KARAKTERISTIK LAHAN RAWA DAN SISTEM BUDIDAYA KEDELAI JENUH AIR

2.1. Karakteristik dan Tipe Lahan Rawa

Lahan rawa terbentuk pada wilayah yang mengalami kejenuhan air secara permanen atau periodik akibat pengaruh pasang surut, curah hujan, limpasan, dan posisi topografi yang rendah. Kejenuhan air mengisi sebagian besar pori tanah sehingga pertukaran gas berlangsung lambat dan konsentrasi oksigen di zona perakaran menurun. Keadaan ini membedakan rawa dari lahan kering karena proses dekomposisi, mineralisasi, dan transformasi unsur berlangsung dalam kondisi reduktif. Lingkungan tersebut juga membentuk komunitas tumbuhan khas yang terdiri atas spesies terestrial toleran kelembapan, tumbuhan semiakuatik, serta gulma air yang mempunyai strategi adaptasi berbeda (Ikhsan et al., 2020).

Rawa pasang surut terutama dipengaruhi oleh gerakan air laut atau sungai, sedangkan rawa lebak lebih banyak dipengaruhi oleh hujan dan limpasan dari daerah hulu. Rawa pasang surut memiliki fluktuasi muka air yang mengikuti siklus pasang, sehingga kualitas air dan sifat kimia tanah dapat berubah relatif cepat. Rawa lebak menunjukkan pola genangan musiman dengan kedalaman dan durasi yang berbeda menurut posisi bentang lahan. Perbedaan sumber air tersebut menentukan pola tanam, kebutuhan saluran, waktu tanam, dan risiko munculnya gulma tertentu yang sesuai dengan kondisi basah atau fase pengeringan (Susilawati et al., 2017).

Pada rawa lebak, kedalaman dan lama genangan menjadi dasar penting untuk menilai kesesuaian lahan. Rawa dangkal memiliki periode tergenang lebih singkat

dan relatif lebih mudah dikelola, sedangkan rawa sedang dan rawa dalam membutuhkan pengendalian air yang lebih intensif. Variasi tersebut memengaruhi suhu tanah, kadar oksigen, laju dekomposisi bahan organik, dan mobilitas unsur hara. Bagi gulma, perubahan muka air menciptakan rangkaian habitat yang berbeda sepanjang musim, sehingga spesies yang muncul pada awal tanam belum tentu sama dengan spesies yang mendominasi pada pertengahan atau akhir pertumbuhan kedelai (Abdullah et al., 2021).

Genangan menyebabkan respirasi akar beralih dari kondisi aerob menuju jalur yang menghasilkan energi lebih rendah. Apabila berlangsung lama, proses tersebut dapat diikuti akumulasi etanol, asam organik, metana, dan senyawa lain yang mengganggu fungsi membran serta penyerapan hara. Tekanan fisiologis juga meningkat ketika akar, mikroorganisme, dan proses kimia tanah menggunakan oksigen yang jumlahnya terbatas. Kedelai yang tidak mampu menyesuaikan metabolisme akan mengalami penurunan pertumbuhan akar, klorosis, berkurangnya luas daun, dan rendahnya pembentukan biomassa, sedangkan gulma toleran dapat mempertahankan pertumbuhan melalui perubahan anatomi dan metabolisme (Firmansyah, 2018).

Fluktuasi basah dan kering menyebabkan potensial redoks tanah berubah secara berulang. Pada fase tergenang, beberapa unsur mengalami reduksi dan dapat menjadi lebih mudah larut, sedangkan pada fase pengeringan terjadi oksidasi yang mengubah bentuk kimia unsur tersebut. Perubahan mendadak dapat menimbulkan ketidakseimbangan hara dan meningkatkan pembentukan spesies

oksigen reaktif pada jaringan tanaman. Karena itu, pengelolaan rawa harus menghindari perubahan air yang terlalu ekstrem dan mempertahankan kondisi yang cukup stabil untuk kedelai, tetapi tetap mampu memberi tekanan terhadap gulma yang sensitif terhadap kekurangan oksigen (Zhou et al., 2020).

2.2. Prinsip Budidaya Jenuh Air

Budidaya jenuh air mempertahankan muka air di bawah permukaan tanah agar tanah tetap lembap sampai jenuh tanpa menjadikan seluruh tanaman terendam. Saluran di antara bedengan berfungsi sebagai sumber air sekaligus pengatur kedalaman muka air. Pada kedalaman yang tepat, akar kedelai memperoleh pasokan air secara kontinu, sementara bagian atas zona perakaran masih memiliki aerasi yang memungkinkan respirasi berlangsung. Prinsip ini berbeda dari penggenangan penuh karena tujuan utamanya adalah menstabilkan ketersediaan air dan menghindari stres kekeringan, bukan menutup seluruh permukaan lahan dengan lapisan air dalam (Sagala et al., 2011).

Kedalaman muka air harus disesuaikan dengan tekstur tanah, fase pertumbuhan, curah hujan, dan toleransi varietas. Muka air yang terlalu dekat dengan permukaan dapat meningkatkan hipoksia dan memperbesar risiko kerusakan akar, sedangkan muka air yang terlalu dalam mengurangi manfaat sistem jenuh air. Pengaturan sekitar beberapa sentimeter di bawah permukaan sering digunakan untuk menjaga keseimbangan antara suplai air dan oksigen. Keberhasilan sistem ini tidak hanya bergantung pada tinggi muka air, tetapi juga pada kestabilan kondisi tersebut agar tanaman tidak terus-menerus mengalami

transisi mendadak antara anaerob dan aerob (Ningsih et al., 2016).

Pada tanaman toleran, kejenuhan air merangsang pembentukan jaringan berongga yang meningkatkan pergerakan oksigen dari tajuk menuju akar. Jaringan tersebut membantu mempertahankan respirasi pada bagian akar yang berada dalam tanah dengan oksigen terbatas. Pembentukan aerenkim biasanya berlangsung melalui perubahan sel korteks dan dipengaruhi oleh etilen serta sinyal stres. Tanaman yang mampu membentuk struktur ini secara cepat mempunyai peluang lebih besar mempertahankan penyerapan air dan hara. Mekanisme serupa juga ditemukan pada gulma lahan basah, sehingga adaptasi anatomi menjadi faktor penentu dalam kompetisi antara kedelai dan gulma (Colmer & Voesenek, 2009).

Budidaya jenuh air dapat menekan sebagian gulma karena perkecambahan benih membutuhkan oksigen untuk mengaktifkan metabolisme. Benih yang tidak toleran mengalami penurunan respirasi, penggunaan cadangan makanan yang tidak efisien, dan kegagalan membentuk akar awal. Namun, efek ini tidak berlaku seragam. Beberapa gulma mampu berkecambah pada konsentrasi oksigen rendah, mempertahankan dormansi sampai kondisi membaik, atau memanfaatkan jaringan aerenkim setelah bibit terbentuk. Dengan demikian, air berfungsi sebagai alat seleksi ekologis, tetapi tidak dapat diperlakukan sebagai metode tunggal untuk mengendalikan seluruh komunitas gulma (Paiman, Ardiyanta, et al., 2022).

Siklus pengeringan diperlukan untuk memperbaiki aerasi, mengurangi akumulasi senyawa toksik, dan memulihkan fungsi

akar. Akan tetapi, pengeringan yang terlalu cepat dapat menimbulkan stres reoksigenasi karena jaringan yang sebelumnya berada dalam kondisi rendah oksigen tiba-tiba menerima pasokan oksigen tinggi. Kondisi tersebut memicu pembentukan radikal bebas dan dapat merusak membran sel. Pengelolaan yang baik harus mengatur waktu, durasi, dan kecepatan perubahan muka air sehingga kedelai dapat beradaptasi secara bertahap, sementara gulma tetap mengalami gangguan pada fase perkecambahan atau pertumbuhan awal (Pan et al., 2021).

Dari perspektif pengendalian gulma, budidaya jenuh air memiliki dua konsekuensi. Pertama, kondisi anaerob terbatas mengurangi kemunculan spesies terestrial yang sensitif. Kedua, penerapan yang berulang dapat memilih komunitas gulma baru yang lebih toleran terhadap genangan. Oleh karena itu, evaluasi keberhasilan tidak cukup hanya berdasarkan penurunan jumlah gulma sesaat, tetapi harus memperhatikan perubahan jenis, dominansi, produksi biji, dan kemampuan spesies bertahan dalam bank biji. Sistem ini akan lebih efektif apabila dipadukan dengan penyiangan, pengelolaan tajuk, mulsa, dan pencegahan pembentukan biji gulma (Rao et al., 2017).

3. DINAMIKA KOMUNITAS GULMA PADA JENUH AIR

3.1. Komposisi, Dominansi, dan Pergeseran Komunitas

Komunitas gulma pada pertanaman kedelai umumnya terdiri atas kelompok rumput, teki, dan daun lebar. Pada lahan jenuh air, proporsi ketiga kelompok berubah sesuai toleransi masing-masing terhadap kelembapan dan kekurangan oksigen. Gulma terestrial yang membutuhkan aerasi

tinggi cenderung berkurang, sedangkan spesies semiakuatik dan gulma lahan basah meningkat. Pergeseran tersebut dapat terlihat dari perubahan kerapatan, frekuensi, biomassa, serta nilai dominansi relatif. Karena setiap kelompok mempunyai pola pertumbuhan dan reproduksi berbeda, identifikasi komposisi menjadi langkah awal untuk menentukan metode pengendalian yang sesuai (Imaniasita et al., 2020).

Dominansi tidak hanya ditentukan oleh kemampuan bertahan selama genangan, tetapi juga oleh kecepatan tumbuh setelah air surut. Spesies yang memiliki pertumbuhan awal cepat dapat segera menguasai cahaya dan ruang ketika tajuk kedelai belum menutup. Kelompok teki sering memperoleh keuntungan karena mempunyai sistem perakaran kompleks, kemampuan regenerasi vegetatif, dan toleransi tinggi terhadap tanah lembap. Beberapa rumput rawa juga membentuk jaringan pengangkut oksigen yang efisien. Akumulasi keunggulan tersebut membuat komunitas gulma dapat tetap padat meskipun jumlah spesies menurun akibat tekanan jenuh air (Yani et al., 2022).

Spesies seperti *Echinochloa crus-galli*, *Leptochloa chinensis*, *Cyperus iria*, *Fimbristylis miliacea*, dan *Panicum repens* sering dikaitkan dengan lingkungan basah karena mampu mempertahankan pertumbuhan pada tanah rendah oksigen. Sebagian spesies menggunakan aerenkim dan akar adventif, sedangkan yang lain mengandalkan produksi biji tinggi atau regenerasi vegetatif. Kehadiran spesies tersebut menunjukkan bahwa genangan tidak menghapus masalah gulma, melainkan mengubah identitas kompetitor utama. Pengelolaan harus diarahkan pada spesies dominan yang benar-benar muncul di

lapangan, bukan hanya berdasarkan kelompok gulma yang lazim ditemukan pada lahan kering (Paiman, Ansar, et al., 2022).

Bank biji tanah berperan besar dalam menentukan perubahan komunitas dari satu musim ke musim berikutnya. Biji yang berada di permukaan dapat berkecambah ketika kelembapan dan cahaya sesuai, sedangkan biji yang tertimbun lebih dalam dapat tetap dorman karena oksigen terbatas. Pengolahan tanah memindahkan biji antarlapisan dan dapat memunculkan kembali spesies yang sebelumnya tidak terlihat. Karena itu, penurunan gulma pada satu musim tidak selalu menunjukkan berkurangnya potensi infestasi. Cadangan biji yang masih hidup dapat menghasilkan gelombang kemunculan baru setelah pengeringan, pembajakan, atau perubahan pengelolaan air (Hossain & Begum, 2016).

Komunitas gulma juga berubah sepanjang fase pertumbuhan kedelai. Pada awal musim, cahaya mencapai permukaan tanah dalam jumlah besar sehingga gulma yang berkecambah cepat memperoleh keuntungan. Setelah tajuk kedelai berkembang, intensitas cahaya di bawah kanopi menurun dan hanya spesies toleran naungan atau gulma yang telah tumbuh tinggi mampu bertahan. Menjelang panen, perubahan kelembapan dan terbukanya kembali kanopi dapat merangsang kemunculan kelompok lain. Dinamika temporal ini menegaskan bahwa survei gulma perlu dilakukan lebih dari satu kali agar keputusan pengendalian tidak didasarkan pada gambaran yang terlalu sesaat (Murrinie et al., 2023).

Genangan memberikan efek ganda terhadap keanekaragaman. Tekanan lingkungan dapat menurunkan jumlah

spesies yang tidak toleran, tetapi sekaligus meningkatkan dominansi beberapa spesies yang sangat adaptif. Komunitas dengan sedikit spesies belum tentu lebih mudah dikendalikan apabila satu atau dua spesies memiliki biomassa tinggi, reproduksi cepat, dan kemampuan alelopati. Oleh sebab itu, indikator pengelolaan tidak hanya berupa jumlah jenis, tetapi juga struktur dominansi, distribusi spasial, dan potensi reproduksi. Pemantauan tersebut membantu mendeteksi pergeseran menuju komunitas yang lebih sulit dikendalikan sebelum terjadi peningkatan bank biji secara luas (Ikhsan et al., 2020).

3.2. Perubahan Pola Pertumbuhan dan Alelopati

Hipoksia memengaruhi bentuk pertumbuhan gulma sejak perkecambahan. Gulma sensitif menunjukkan akar pendek, pertumbuhan lambat, dan akumulasi biomassa rendah, sedangkan spesies toleran mempertahankan pemanjangan pucuk untuk mencapai lingkungan dengan oksigen dan cahaya lebih baik. Pada beberapa tumbuhan rawa, alokasi biomassa bergeser ke batang, daun, atau akar adventif sebagai respons terhadap genangan. Perubahan tersebut meningkatkan kemampuan kolonisasi dan membantu gulma menghindari kematian jaringan. Akibatnya, pola pertumbuhan komunitas pada lahan jenuh air berbeda dari lahan kering dan membutuhkan pendekatan pengendalian yang memperhatikan fase adaptasi morfologis (Rathika et al., 2020).

Ketersediaan cahaya menjadi faktor penting setelah seleksi awal oleh genangan. Gulma yang berhasil melewati fase hipoksia kemudian bersaing dengan kedelai dalam membentuk kanopi. Spesies yang tumbuh tegak dan cepat dapat menaungi daun kedelai, sedangkan gulma yang menyebar di

permukaan menguasai ruang dan menghambat penetrasi cahaya ke tanah. Pengaturan jarak tanam dan vigor varietas menentukan seberapa cepat kedelai menutup kanopi. Apabila penutupan terlambat, gulma memperoleh waktu lebih panjang untuk mengembangkan akar dan organ reproduksi sehingga lebih sulit dikendalikan pada fase berikutnya (Setiawan & Sarjiyah, 2021).

Sebagian gulma memperkuat dominansinya melalui alelopati, yaitu pelepasan senyawa yang memengaruhi perkecambahan, pertumbuhan, atau fungsi fisiologis tumbuhan lain. Senyawa fenolik, flavonoid, alkaloid, dan terpenoid dapat dilepaskan melalui akar, pelindian daun, residu membusuk, atau eksudat jaringan. Pada lingkungan jenuh air, mobilitas senyawa dipengaruhi oleh aliran air, pH, aktivitas mikroba, dan kondisi reduktif. Alelopati tidak menggantikan kompetisi sumber daya, tetapi bekerja bersamaan sehingga tanaman kedelai menghadapi tekanan ganda dari keterbatasan cahaya dan hara serta gangguan kimiawi (Cheng & Cheng, 2015).

Gulma dari kelompok teki dan rumput rawa dilaporkan menghasilkan senyawa fenolik yang dapat mengubah permeabilitas membran, menghambat aktivitas enzim, dan menurunkan pertumbuhan akar tanaman target. Efek tersebut memperbesar peluang gulma mempertahankan ruang tumbuh ketika sumber daya terbatas. Dominansi yang tinggi juga meningkatkan jumlah residu dan senyawa yang kembali ke tanah setelah jaringan gulma mati. Oleh karena itu, biomassa gulma tidak boleh dibiarkan menumpuk tanpa pengelolaan, terutama apabila spesies dominan diketahui mempunyai aktivitas alelopati yang kuat dan

berpotensi memengaruhi kedelai pada musim berikutnya (Utami et al., 2020).

Perubahan pola pertumbuhan gulma merupakan hasil interaksi antara genangan, cahaya, suhu, unsur hara, pengolahan tanah, dan tekanan pengendalian. Tidak ada satu faktor yang menjelaskan seluruh dinamika komunitas. Genangan mungkin menekan perkecambahan, tetapi pemupukan dapat mempercepat pertumbuhan individu yang bertahan. Penyiangan dapat menurunkan biomassa, tetapi gangguan tanah dapat mengangkat biji dorman ke permukaan. Karena itu, pengelolaan harus dipahami sebagai proses yang memengaruhi ekosistem dari waktu ke waktu, bukan tindakan tunggal yang hanya menurunkan populasi pada saat aplikasi (Ahadiyat & Sarjito, 2022).

4. MEKANISME ADAPTASI GULMA TERHADAP KONDISI JENUH AIR

4.1. Adaptasi Morfologi

Aerenkim merupakan adaptasi morfologi utama yang memungkinkan tumbuhan bertahan pada tanah dengan oksigen rendah. Ruang udara yang terbentuk di dalam korteks menghubungkan bagian tanaman di atas permukaan dengan jaringan akar, sehingga oksigen dapat bergerak secara internal. Struktur ini mengurangi ketergantungan akar pada difusi oksigen dari tanah yang sangat lambat ketika pori terisi air. Spesies dengan aerenkim yang luas mampu mempertahankan respirasi akar, penyerapan hara, dan pertumbuhan lebih lama daripada spesies tanpa jaringan tersebut. Keunggulan ini menjelaskan dominansi beberapa gulma rawa pada sistem budidaya jenuh air (Colmer & Voisenek, 2009).

Pembentukan akar adventif melengkapi fungsi aerenkim dengan

menyediakan akar baru pada bagian batang yang lebih dekat dengan permukaan air atau atmosfer. Akar tersebut sering memiliki porositas tinggi dan jarak transportasi oksigen yang lebih pendek daripada akar primer yang berada lebih dalam. Pada kondisi genangan berkepanjangan, akar primer dapat mengalami kerusakan, sedangkan akar adventif mengambil alih fungsi penyerapan air dan unsur hara. Gulma yang cepat membentuk akar adventif mampu pulih dan kembali tumbuh setelah tekanan genangan, sehingga pengendalian mekanis yang hanya memotong bagian atas tanaman sering tidak cukup (Pan et al., 2021).

Sebagian gulma mengurangi kehilangan oksigen dari akar melalui pembentukan penghalang pada lapisan luar akar. Deposisi suberin menekan keluarnya oksigen secara radial ke tanah dan mengarahkan lebih banyak oksigen menuju ujung akar yang aktif tumbuh. Mekanisme ini sangat menguntungkan pada tanah anaerob karena oksigen internal dapat digunakan secara lebih efisien. Pada beberapa spesies *Echinochloa*, kombinasi akar adventif, aerenkim, dan penghalang kehilangan oksigen membantu mempertahankan pertumbuhan di lingkungan tergenang. Adaptasi kompleks tersebut membuat spesies ini menjadi kompetitor kuat pada lahan basah (Ejiri & Shiono, 2019).

Pemanjangan batang atau pelepah daun merupakan strategi untuk menempatkan organ fotosintetik di atas permukaan air. Respons ini meningkatkan akses terhadap cahaya dan pertukaran gas, tetapi memerlukan energi dan cadangan karbohidrat yang cukup. Spesies yang mampu mengatur pemanjangan secara

efisien dapat menghindari terendam penuh, sedangkan pemanjangan berlebihan dapat menguras cadangan energi sebelum tanaman mencapai permukaan. Gulma rawa yang berhasil menyeimbangkan pertumbuhan vertikal dan konservasi energi memperoleh keuntungan dalam kondisi muka air yang berubah-ubah (Voeselek & Bailey-Serres, 2013).

Perubahan bentuk daun, ketebalan jaringan, jumlah stomata, dan distribusi biomassa juga berkontribusi terhadap toleransi genangan. Daun baru yang terbentuk setelah stres dapat memiliki karakter lebih sesuai untuk mempertahankan fotosintesis pada kelembapan tinggi dan intensitas cahaya berubah. Sementara itu, peningkatan proporsi biomassa pada pucuk membantu tanaman memperoleh oksigen, tetapi dapat mengurangi investasi pada akar. Keberhasilan adaptasi bergantung pada kemampuan spesies menyesuaikan arsitektur tubuh secara fleksibel terhadap kedalaman dan durasi genangan (Zhou et al., 2020).

4.2. Adaptasi Fisiologis

Ketika oksigen terbatas, rantai transport elektron di mitokondria tidak dapat bekerja secara normal. Gulma toleran mengalihkan metabolisme menuju glikolisis dan fermentasi untuk menghasilkan energi minimum yang diperlukan bagi kelangsungan hidup sel. Jalur ini jauh kurang efisien dibandingkan respirasi aerob, sehingga keberhasilan adaptasi bergantung pada kemampuan menghemat energi dan mempertahankan cadangan karbohidrat. Spesies yang menggunakan gula terlalu cepat akan kehabisan substrat sebelum kondisi membaik, sedangkan spesies yang mampu mengatur laju metabolisme dapat bertahan lebih lama (Ma et al., 2020).

Fermentasi etanol melibatkan piruvat dekarboksilase dan alkohol dehidrogenase. Kedua enzim tersebut memungkinkan regenerasi koenzim yang dibutuhkan agar glikolisis tetap berlangsung ketika oksigen tidak tersedia sebagai akseptor elektron. Aktivitas enzim fermentatif biasanya meningkat pada awal hipoksia dan dikendalikan oleh regulasi gen yang peka terhadap status oksigen. Gulma yang memiliki respons enzimatik cepat mampu mempertahankan pembentukan energi, pertumbuhan embrio, dan vigor bibit pada kondisi yang menghambat spesies lain. Mekanisme ini menjadi salah satu dasar toleransi perkecambahan anaerob (Adak et al., 2023).

Fermentasi laktat dapat terjadi pada tahap awal kekurangan oksigen, tetapi akumulasi laktat menurunkan pH sitoplasma. Tanaman toleran kemudian mengarahkan metabolisme menuju fermentasi etanol yang lebih sesuai untuk mempertahankan kestabilan internal. Pengaturan jalur tersebut mencegah pengasaman berlebihan dan membantu sel bertahan selama hipoksia. Namun, etanol dan metabolit lain tetap dapat menjadi toksik apabila menumpuk dalam jaringan. Karena itu, kemampuan mengeluarkan atau menoleransi produk fermentasi turut menentukan perbedaan daya tahan antarspesies (Colmer & Voesenek, 2009).

Konservasi energi merupakan strategi yang sama pentingnya dengan peningkatan fermentasi. Pada kondisi jenuh air, gulma toleran menekan proses yang membutuhkan banyak energi, seperti sintesis biomassa cepat, transport aktif tertentu, dan pembentukan organ yang tidak mendukung kelangsungan hidup langsung. Energi dialokasikan untuk menjaga integritas

membran, fungsi meristem, dan kemampuan pulih setelah air surut. Strategi bertahan ini menyebabkan pertumbuhan tampak lambat selama genangan, tetapi individu tetap hidup dan dapat segera melanjutkan perkembangan ketika oksigen kembali tersedia (Voesenek & Bailey-Serres, 2013).

Hipoksia dan reoksigenasi meningkatkan pembentukan spesies oksigen reaktif yang dapat merusak lipid, protein, dan asam nukleat. Gulma toleran mempunyai sistem antioksidan enzimatik dan nonenzimatik yang lebih mampu menjaga keseimbangan redoks. Aktivitas superoksida dismutase, katalase, peroksidase, serta senyawa antioksidan membantu mengurangi kerusakan ketika kondisi berubah dari anaerob menuju aerob. Kemampuan mengendalikan stres oksidatif sangat penting karena banyak jaringan justru mengalami kerusakan berat pada saat air surut dan oksigen kembali masuk secara cepat (Zhou et al., 2020).

Pemulihan fotosintesis menentukan apakah gulma hanya bertahan atau kembali menjadi kompetitor aktif setelah genangan. Kerusakan stomata, klorofil, dan membran tilakoid dapat menurunkan kemampuan menangkap cahaya. Spesies toleran mampu memperbaiki sistem fotosintetik, membuka kembali stomata secara bertahap, dan memulihkan transport asimilat ke akar. Proses pemulihan yang cepat memungkinkan gulma menambah biomassa sebelum kedelai menutup kanopi. Oleh karena itu, pengamatan setelah pengeringan sama pentingnya dengan pengamatan selama genangan karena fase pemulihan dapat menentukan dominansi selanjutnya (Pan et al., 2021).

Adaptasi fisiologis tidak bekerja secara terpisah dari morfologi. Aerenkim

meningkatkan pasokan oksigen, sedangkan metabolisme fermentatif menopang jaringan yang masih mengalami kekurangan oksigen. Sistem antioksidan melindungi sel selama perubahan muka air, sementara konservasi energi memperpanjang daya tahan. Kombinasi tersebut membentuk paket sifat yang membuat spesies tertentu lebih kompetitif pada lingkungan rawa. Karena paket sifat berbeda antarspesies, respons terhadap kedalaman dan durasi genangan juga berbeda, sehingga rekomendasi pengendalian perlu mempertimbangkan identitas gulma dominan (Paiman, Ansar, et al., 2022).

4.3. Adaptasi Reproduksi

Produksi biji dalam jumlah besar meningkatkan peluang keberlanjutan populasi meskipun sebagian biji mati akibat anoksia, dimakan organisme, atau gagal berkecambah. Gulma yang menyelesaikan siklus hidup sebelum penutupan tajuk kedelai dapat menambah bank biji secara cepat. Sebagian biji langsung berkecambah, sedangkan sisanya memasuki dormansi dan menjadi cadangan untuk musim berikutnya. Strategi ini membuat pengendalian yang hanya menurunkan biomassa tanpa mencegah pembentukan biji kurang efektif dalam jangka panjang, karena populasi dapat pulih dari cadangan yang tertinggal di tanah (Hossain & Begum, 2016).

Dormansi memungkinkan embrio mempertahankan viabilitas ketika oksigen, suhu, cahaya, atau kelembapan tidak mendukung perkecambahan. Kekurangan oksigen dapat memicu dormansi sekunder sehingga biji tetap hidup selama periode tergenang. Ketika tanah kembali mendapat aerasi, sebagian biji menerima sinyal untuk berkecambah dan menghasilkan gelombang kemunculan baru. Mekanisme ini

menjelaskan mengapa lahan yang tampak bersih selama genangan dapat kembali dipenuhi gulma setelah pengeringan. Pengelolaan perlu menargetkan fase ketika dormansi pecah dan kemunculan berlangsung serempak (Adak et al., 2023).

Beberapa gulma memiliki kemampuan perkecambahan anaerob yang memungkinkan koleoptil atau pucuk tumbuh sebelum akar memperoleh oksigen memadai. Pertumbuhan awal diarahkan untuk mencapai permukaan air, kemudian jaringan fotosintetik dan akar adventif berkembang setelah akses terhadap udara meningkat. Strategi ini memberi keuntungan pada lahan yang tergenang segera setelah tanam. Kedalaman genangan tetap menjadi faktor pembatas karena bibit harus memiliki cadangan energi cukup untuk mencapai permukaan. Oleh sebab itu, pengaturan kedalaman air dapat menekan sebagian spesies, tetapi mungkin tidak efektif terhadap gulma dengan toleransi perkecambahan anaerob tinggi (Chamara et al., 2018).

Penyebaran melalui air memperluas kolonisasi gulma rawa. Biji atau propagul yang mampu mengapung dapat berpindah mengikuti aliran saluran, limpasan hujan, dan perubahan muka air. Ketika aliran melambat, propagul mengendap pada lokasi baru dan berkecambah setelah kondisi sesuai. Saluran irigasi yang tidak bersih dapat menjadi sumber masuknya biji dari petak lain, sehingga pengendalian pada satu petak tidak selalu cukup. Pengelolaan kawasan perlu mencakup pembersihan saluran, pencegahan penyebaran propagul, dan koordinasi waktu pengendalian antarpetani (Soomers et al., 2012).

Reproduksi vegetatif memberi keuntungan tambahan bagi gulma

berimpang, stolon, umbi, atau ruas batang yang mampu tumbuh kembali. Pemotongan yang tidak tuntas dapat memperbanyak fragmen dan memperluas infestasi, terutama ketika air memindahkan potongan tanaman ke lokasi lain. Organ vegetatif sering menyimpan cadangan makanan yang mendukung pembentukan akar baru setelah tekanan lingkungan. Karena itu, penyiangan mekanis harus mengangkat atau merusak organ perennasi secara menyeluruh dan dilakukan sebelum fragmen tersebar melalui aliran air (Oksari, 2017).

5. BANK BIJI GULMA DAN DINAMIKA POPULASI

Bank biji merupakan kumpulan biji hidup yang tersimpan di dalam atau di atas tanah dan berfungsi sebagai sumber regenerasi komunitas gulma. Ukuran bank biji dipengaruhi oleh produksi biji sebelumnya, mortalitas, dormansi, predasi, kedalaman penguburan, dan kondisi lingkungan. Pada lahan rawa, kejenuhan air dapat menghambat perkecambahan tetapi tidak selalu mematikan biji. Sebagian biji tetap dorman dan mempertahankan viabilitas sampai tanah memperoleh oksigen. Keberadaan cadangan tersebut membuat masalah gulma bersifat lintas musim dan membutuhkan strategi yang mengurangi masukan biji baru sekaligus menguras cadangan lama (Hossain & Begum, 2016).

Distribusi vertikal bank biji menentukan peluang kemunculan. Lapisan permukaan umumnya mengandung lebih banyak biji yang siap berkecambah karena mendapat cahaya, suhu berfluktuasi, dan oksigen lebih tinggi. Lapisan lebih dalam menyimpan biji dalam kondisi dorman dan melindunginya dari predasi atau gangguan tertentu. Pada sistem tanpa olah tanah, biji cenderung terkonsentrasi dekat permukaan,

sedangkan pengolahan intensif menyebarkan biji ke berbagai kedalaman. Pola tersebut memengaruhi efektivitas herbisida pratanam, penyiangan, dan pengaturan air (Hossain et al., 2021).

Pengolahan tanah dapat mengubur biji yang baru jatuh, tetapi juga mengangkat biji lama ke zona perkecambahan. Dampaknya bergantung pada jenis alat, kedalaman olah, waktu pelaksanaan, dan biologi spesies gulma. Pembajakan dalam mungkin menurunkan kemunculan segera, tetapi menciptakan cadangan yang dapat muncul kembali pada musim berikutnya ketika lapisan tanah terganggu. Sebaliknya, olah tanah minimal mempertahankan banyak biji di permukaan sehingga memungkinkan pengendalian serempak sebelum tanam. Keputusan pengolahan perlu dikaitkan dengan strategi pengelolaan bank biji jangka panjang (Abusteit et al., 2024).

Kondisi anaerob memengaruhi viabilitas melalui laju respirasi dan penggunaan cadangan makanan. Biji sensitif kehilangan kemampuan tumbuh apabila metabolisme tidak dapat dipertahankan, sedangkan biji toleran mengurangi aktivitas dan menunggu kondisi membaik. Durasi genangan, suhu, kualitas air, dan karakter kulit biji menentukan tingkat kematian. Oleh karena itu, genangan dapat digunakan untuk menekan sebagian bank biji, tetapi hasilnya harus dievaluasi berdasarkan spesies. Penggunaan kedalaman dan lama genangan yang sama pada semua lokasi berisiko menghasilkan respons berbeda karena komposisi bank biji tidak seragam (Paiman, Ardiyanta, et al., 2022).

Gelombang kemunculan gulma terjadi ketika kombinasi suhu, kelembapan, cahaya, dan oksigen sesuai dengan kebutuhan spesies. Pemodelan waktu

kemunculan dapat membantu menentukan kapan penyiangan atau aplikasi herbisida paling efektif. Pada budidaya jenuh air, perubahan muka air menjadi sinyal tambahan yang memicu atau menunda perkecambahan. Pengendalian yang terlalu dini mungkin tidak mengenai sebagian besar populasi, sedangkan tindakan terlambat memungkinkan gulma membentuk akar kuat dan menguasai sumber daya. Pemantauan lapangan perlu dilakukan secara berkala agar waktu pengendalian mengikuti pola kemunculan aktual (Marschner et al., 2024).

Dalam jangka panjang, tekanan genangan yang berulang menyeleksi biji dan individu yang lebih toleran terhadap hipoksia. Populasi dapat berubah bukan hanya dalam jumlah, tetapi juga dalam komposisi sifat. Spesies sensitif berkurang, sedangkan spesies dengan dormansi kuat, perkecambahan anaerob, atau kemampuan pemulihan cepat meningkat. Penggunaan herbisida berulang menambah tekanan seleksi lain dan dapat memperkuat dominansi biotipe yang sulit dikendalikan. Karena itu, rotasi metode pengendalian dan variasi pengelolaan air diperlukan untuk mencegah komunitas berkembang menuju struktur yang semakin seragam dan resisten (Rao et al., 2017).

Pengelolaan bank biji harus menekankan prinsip tidak membiarkan gulma menghasilkan biji baru. Penyiangan sebelum fase generatif, pemusnahan gulma di pematang dan saluran, penggunaan benih tanaman yang bersih, serta pencegahan perpindahan tanah terkontaminasi dapat mengurangi masukan. Pada saat yang sama, kemunculan gulma dari cadangan lama perlu ditekan melalui pengaturan air, mulsa, penutupan tajuk, dan pengendalian tepat waktu. Pendekatan ini memang tidak

menghilangkan bank biji dalam satu musim, tetapi secara bertahap menurunkan sumber infestasi dan meningkatkan efektivitas pengendalian pada tahun berikutnya (Hossain & Begum, 2016).

6. INTERAKSI GULMA DAN TANAMAN KEDELAI PADA KONDISI JENUH AIR

6.1. Kompetisi Sumber Daya

Kedelai dan gulma menggunakan sumber daya yang sama, tetapi kemampuan memperoleh sumber daya berbeda menurut kecepatan tumbuh, arsitektur akar, tinggi tanaman, dan toleransi lingkungan. Pada fase awal, gulma yang berkecambah lebih cepat dapat membentuk akar dan daun sebelum kedelai berkembang penuh. Kondisi jenuh air memperbesar ketimpangan apabila akar kedelai mengalami hipoksia sementara gulma dominan telah beradaptasi. Persaingan tersebut mengurangi pertumbuhan vegetatif, jumlah cabang, luas daun, dan pembentukan polong, sehingga pengendalian pada awal musim menjadi sangat menentukan (Efendy et al., 2020).

Kompetisi cahaya terjadi ketika tajuk gulma menutupi daun kedelai atau mengubah kualitas cahaya yang diterima tanaman. Penurunan radiasi fotosintetik mengurangi pembentukan asimilat yang dibutuhkan untuk pertumbuhan akar dan pengisian biji. Gulma tinggi juga memicu respons pemanjangan pada kedelai, sehingga tanaman mengalokasikan energi untuk batang daripada pembentukan cabang dan polong. Kedelai yang memiliki vigor awal tinggi dan cepat menutup kanopi lebih mampu menekan gulma, sehingga pemilihan varietas dan kepadatan tanam dapat memperkuat pengendalian ekologis (Silva et al., 2018).

Kompetisi di bawah tanah mencakup perebutan nitrogen, fosfor, kalium, air, dan ruang perakaran. Pada kondisi hipoksia, fungsi akar kedelai menurun karena respirasi dan transport aktif terganggu. Gulma dengan akar adventif atau aerenkim tetap mampu mengeksplorasi tanah dan memperoleh hara, sehingga perbedaan toleransi memperbesar keunggulan gulma. Pemupukan yang tidak tepat dapat memperburuk keadaan karena unsur hara yang diberikan justru dimanfaatkan gulma lebih cepat. Penempatan pupuk, waktu aplikasi, dan pengendalian gulma harus disinkronkan agar investasi hara lebih banyak mendukung tanaman utama (Aanchal & Menon, 2025).

Periode kritis kompetisi merupakan rentang waktu ketika keberadaan gulma menyebabkan kehilangan hasil yang tidak dapat dipulihkan. Pada kedelai, periode tersebut umumnya berada pada beberapa minggu awal setelah tanam ketika tajuk dan sistem akar belum berkembang sempurna. Pengendalian sebelum dan selama periode kritis memberikan manfaat terbesar, sedangkan penyiangan setelah kerusakan terjadi hanya memperbaiki kondisi secara terbatas. Dalam sistem jenuh air, waktu ini harus disesuaikan dengan fase pemberian genangan agar kedelai tidak mengalami tekanan ganda dari hipoksia dan kompetisi gulma (Puspita et al., 2017).

Keberadaan gulma setelah periode kritis tetap perlu dikendalikan apabila berpotensi menghasilkan biji, mengganggu panen, atau menjadi inang organisme pengganggu. Gulma yang dibiarkan sampai matang menambah bank biji dan memperbesar biaya pengendalian pada musim berikutnya. Selain itu, biomassa tinggi dapat menghambat sirkulasi udara, meningkatkan kelembapan tajuk, dan

mempersulit operasi panen. Dengan demikian, tujuan pengelolaan bukan hanya melindungi hasil musim berjalan, tetapi juga menjaga kebersihan lahan dan menekan sumber infestasi jangka panjang (Imaniasita et al., 2020).

Kehilangan hasil merupakan hasil kumulatif dari penurunan cahaya, hara, air, dan kapasitas fisiologis tanaman. Pada infestasi berat, kedelai menghasilkan tajuk lebih kecil, nodulasi terganggu, jumlah bunga berkurang, dan pengisian biji tidak optimal. Kondisi jenuh air dapat memperbesar dampak tersebut karena akar tanaman telah menghadapi keterbatasan oksigen. Apabila gulma toleran tumbuh tanpa pengendalian, penurunan produktivitas dapat mencapai tingkat yang sangat tinggi. Fakta ini memperkuat pentingnya pencegahan dan pengendalian awal sebelum komunitas gulma membentuk dominansi yang sulit dibalikkan (Aanchal & Menon, 2025).

6.2. Alelopati Gulma Rawa

Alelopati terjadi ketika senyawa yang dilepaskan satu tumbuhan memengaruhi proses biologis tumbuhan lain. Senyawa dapat keluar melalui eksudat akar, pelindian tajuk, volatil, atau dekomposisi residu. Pada lahan rawa, air dapat melarutkan dan memindahkan alelokimia ke zona perakaran kedelai. Konsentrasi dan persistensinya dipengaruhi oleh pH, suhu, mikroorganisme, tekstur tanah, serta lama genangan. Karena itu, efek alelopati di lapangan bersifat dinamis dan dapat berbeda dari hasil uji laboratorium dengan ekstrak pekat (Cheng & Cheng, 2015).

Senyawa fenolik dan metabolit sekunder lainnya dapat menghambat perkecambahan, pemanjangan akar, pembelahan sel, sintesis protein, dan

aktivitas fotosintesis. Akar muda merupakan bagian yang sangat peka karena kontak langsung dengan larutan tanah. Kerusakan akar mengurangi penyerapan air dan hara, kemudian memengaruhi pertumbuhan tajuk. Pada kedelai yang sedang mengalami hipoksia, gangguan tambahan dari alelokimia dapat memperburuk ketidakseimbangan energi dan menurunkan kemampuan pemulihan. Interaksi tersebut menjelaskan mengapa spesies gulma tertentu memberi dampak lebih besar daripada yang diperkirakan hanya berdasarkan biomassa (Anwar et al., 2021).

Salah satu mekanisme fitotoksik adalah peningkatan spesies oksigen reaktif dan peroksidasi lipid. Ketika sistem antioksidan tanaman tidak mampu menetralkan radikal bebas, membran kehilangan integritas, kebocoran elektrolit meningkat, dan fungsi organel terganggu. Gejala tersebut dapat terlihat sebagai penurunan klorofil, penghambatan akar, dan rendahnya biomassa. Kondisi jenuh air sendiri sudah meningkatkan risiko stres oksidatif, sehingga alelokimia dapat bertindak secara sinergis dengan hipoksia. Penilaian bioherbisida perlu mempertimbangkan mekanisme ini sekaligus memastikan bahwa senyawa tidak merusak tanaman kedelai (Kostina-Bednarz et al., 2023).

Meskipun alelopati menjadi ancaman bagi kedelai, mekanisme yang sama dapat dimanfaatkan untuk mengembangkan bioherbisida. Ekstrak atau senyawa alami dari tumbuhan alelopatik berpotensi menekan perkecambahan dan pertumbuhan gulma sasaran. Keunggulannya adalah peluang menggunakan bahan lokal dan mengurangi ketergantungan pada herbisida sintesis. Namun, efektivitas sangat

dipengaruhi konsentrasi, formulasi, waktu aplikasi, stabilitas bahan aktif, serta selektivitas terhadap tanaman. Pengembangan bioherbisida harus melalui pengujian lapangan agar aktivitas yang terlihat di laboratorium dapat diterjemahkan menjadi pengendalian yang konsisten dan aman (Indarwati et al., 2023).

7. Implikasi Pengelolaan Gulma

7.1. Pengelolaan Tata Air sebagai Alat Pengendalian

Tata air dapat digunakan untuk menciptakan kondisi yang menguntungkan kedelai tetapi merugikan gulma sensitif. Muka air dipertahankan pada kedalaman yang menyediakan kelembapan stabil tanpa menyebabkan anoksia berat pada akar kedelai. Penggenangan dangkal pada waktu tertentu dapat menghambat respirasi benih gulma, mengurangi kemunculan, dan menekan pertumbuhan awal. Namun, efektivitasnya harus dinilai bersama toleransi varietas kedelai, tekstur tanah, curah hujan, dan kapasitas drainase. Pengaturan yang tidak tepat dapat menekan tanaman lebih kuat daripada gulma toleran (Sagala et al., 2011).

Waktu penerapan air menentukan keberhasilan. Genangan yang diberikan sebelum gulma membentuk sistem akar adaptif lebih efektif daripada genangan setelah gulma berkembang. Fase awal setelah tanam merupakan sasaran penting, tetapi kedelai juga sensitif terhadap hipoksia pada tahap perkecambahan dan pembentukan daun pertama. Oleh sebab itu, pemberian air perlu mempertimbangkan umur tanaman, vigor bibit, dan prakiraan hujan. Penundaan singkat sampai akar kedelai cukup berkembang dapat mengurangi risiko kerusakan, kemudian kondisi jenuh dipertahankan untuk menekan

gelombang kemunculan gulma berikutnya (Abdullah et al., 2021).

Kedalaman dan durasi genangan harus disesuaikan dengan spesies sasaran. Sebagian gulma kehilangan viabilitas pada genangan dangkal, sedangkan gulma semiakuatik mampu berkecambah atau memanjangkan pucuk pada air lebih dalam. Pengamatan komunitas sebelum menentukan rezim air menjadi penting agar pengelolaan tidak justru memilih spesies yang lebih sulit dikendalikan. Variasi kedalaman atau siklus basah-kering dapat digunakan untuk menghindari tekanan seleksi yang terlalu seragam, tetapi perubahan tersebut harus tetap berada dalam batas toleransi kedelai (Rao et al., 2017).

Saluran air perlu dipelihara agar distribusi air merata dan drainase dapat dilakukan ketika curah hujan tinggi. Saluran yang tersumbat menyebabkan genangan tidak terkendali, sedangkan kebocoran membuat sebagian petak terlalu kering. Selain fungsi hidrologi, saluran dapat menjadi tempat tumbuh dan sumber propagul gulma. Pembersihan sebelum gulma menghasilkan biji mengurangi penyebaran melalui air. Pengelolaan tata air dengan demikian mencakup pengaturan muka air di petak, pemeliharaan saluran, dan pencegahan perpindahan biji dari luar areal (Soomers et al., 2012).

7.2. Strategi Pengendalian Gulma

Terpadu

Pengendalian terpadu mengombinasikan tindakan pencegahan, kultur teknis, mekanis, biologis, dan kimia sesuai kondisi lapangan. Tujuannya bukan menghilangkan seluruh gulma, melainkan menjaga populasi di bawah tingkat yang merugikan, mencegah produksi biji, dan menghambat dominansi spesies adaptif.

Pendekatan ini mengurangi ketergantungan pada satu metode dan memperlambat evolusi resistensi. Keputusan harus berdasarkan identifikasi spesies, fase pertumbuhan, kerapatan, pola sebaran, kondisi air, serta periode kritis kedelai (Rao et al., 2017).

Teknik kultur dapat meningkatkan daya saing kedelai melalui penggunaan benih bermutu, varietas bervigor awal tinggi, jarak tanam tepat, dan populasi tanaman seragam. Tajuk yang cepat menutup mengurangi cahaya di permukaan tanah dan menekan gulma yang membutuhkan intensitas tinggi. Mulsa organik menghambat kemunculan secara fisik, menjaga kelembapan, dan dapat menambah bahan organik. Namun, bahan mulsa harus bebas biji gulma dan tidak membawa propagul ke lahan. Integrasi pengelolaan tajuk dan mulsa membantu mengurangi tekanan gulma sebelum diperlukan tindakan kimia (Khamare et al., 2022).

Penyiangan mekanis efektif ketika dilakukan pada fase awal dan sebelum gulma membentuk biji. Penyiangan manual memungkinkan pemilihan gulma sasaran, tetapi membutuhkan tenaga kerja. Alat mekanis meningkatkan kapasitas kerja, namun penggunaannya harus hati-hati pada tanah jenuh agar tidak merusak akar kedelai atau memecah organ vegetatif gulma menjadi propagul baru. Gulma yang dicabut perlu dikeluarkan atau ditempatkan pada kondisi yang mencegah tumbuh kembali. Pengendalian pada tiga minggu awal umumnya memberikan manfaat besar karena bertepatan dengan periode kritis kompetisi (Efendy et al., 2020).

Herbisida selektif dapat digunakan ketika kerapatan gulma tinggi atau luas areal

tidak memungkinkan penyiangan manual. Pemilihan bahan aktif harus sesuai dengan kelompok gulma, fase tanaman, kondisi air, dan rekomendasi dosis. Tanah jenuh dapat mengubah pergerakan dan persistensi herbisida, sehingga risiko pencucian, fitotoksisitas, atau efektivitas yang tidak konsisten perlu diperhatikan. Penggunaan bahan aktif yang sama secara berulang harus dihindari karena meningkatkan tekanan seleksi terhadap biotipe resisten. Rotasi mekanisme kerja dan kombinasi dengan metode nonkimia menjadi prinsip penting (Indarwati et al., 2022).

Bioherbisida berbasis alelokimia menawarkan alternatif untuk menekan gulma dengan bahan yang relatif mudah terdegradasi. Senyawa fenolik, flavonoid, terpenoid, dan metabolit lain dapat mengganggu pembelahan sel, fotosintesis, respirasi, atau keseimbangan redoks gulma. Tantangan penerapannya meliputi variasi kandungan bahan aktif, stabilitas formulasi, kebutuhan dosis, pengaruh lingkungan, dan selektivitas terhadap kedelai. Produk yang efektif harus memiliki standar bahan baku, metode ekstraksi, formulasi, dan waktu aplikasi yang jelas. Karena itu, pengembangan bioherbisida membutuhkan kolaborasi antara penelitian fisiologi, kimia, agronomi, dan teknologi formulasi (Anwar et al., 2021).

Pemanfaatan biomassa gulma lokal sebagai bahan bioherbisida dapat mengubah limbah pengendalian menjadi sumber daya. Gulma yang diketahui memiliki aktivitas alelopati dikumpulkan sebelum menghasilkan biji, kemudian diolah menjadi ekstrak atau bahan formulasi. Pendekatan ini berpotensi mengurangi biaya dan volume biomassa di lahan. Namun, pemanfaatan harus memastikan tidak terjadi penyebaran

biji, kontaminasi, atau efek negatif terhadap organisme bukan sasaran. Uji selektivitas pada kedelai dan evaluasi residu lingkungan menjadi tahap wajib sebelum aplikasi luas (Indarwati et al., 2023).

Pengelolaan terpadu perlu disusun dalam urutan waktu. Sebelum tanam dilakukan sanitasi lahan, pengelolaan saluran, dan pengurangan bank biji permukaan. Pada awal pertumbuhan diterapkan pengaturan air dan penyiangan sesuai pola kemunculan. Setelah tajuk berkembang, fokus beralih pada pencegahan pembentukan biji serta pengendalian gulma yang lolos. Menjelang panen, gulma di pematang dan saluran harus dibersihkan agar tidak menjadi sumber infestasi. Catatan spesies dan respons pengendalian tiap musim digunakan untuk memperbaiki keputusan berikutnya (Marschner et al., 2024).

Keberhasilan strategi harus diukur melalui beberapa indikator, yaitu penurunan kerapatan dan biomassa gulma, perubahan dominansi, berkurangnya produksi biji, peningkatan pertumbuhan kedelai, hasil panen, biaya pengendalian, dan dampak lingkungan. Evaluasi hanya berdasarkan tampilan lahan yang bersih dapat menyesatkan apabila bank biji tetap tinggi atau spesies toleran mulai meningkat. Pengamatan jangka panjang membantu memastikan bahwa metode yang digunakan tidak sekadar memindahkan masalah dari satu spesies ke spesies lain. Pendekatan berbasis data lapangan merupakan dasar pengelolaan yang adaptif (Ahadiyat & Sarjito, 2022).

8. ARAH PENELITIAN DAN PENGEMBANGAN

Informasi mengenai gulma pada budidaya kedelai jenuh air masih lebih terbatas dibandingkan penelitian pada padi atau sistem lahan kering. Penelitian perlu mengidentifikasi spesies dominan pada berbagai tipe rawa, kedalaman muka air, musim, dan varietas kedelai. Data tersebut penting untuk membedakan respons umum terhadap genangan dari respons yang spesifik lokasi. Survei berulang juga diperlukan untuk memantau perubahan komunitas setelah teknologi jenuh air diterapkan selama beberapa musim (Paiman, Ansar, et al., 2022).

Kajian bank biji perlu menghubungkan distribusi vertikal, viabilitas, dormansi, dan waktu kemunculan dengan praktik pengolahan tanah serta tata air. Pengambilan contoh hanya pada permukaan tidak cukup untuk menggambarkan cadangan propagul jangka panjang. Penelitian jangka panjang dapat menjelaskan laju penurunan bank biji setelah pencegahan produksi biji dan menunjukkan apakah genangan berulang benar-benar mengurangi cadangan atau hanya menunda perkecambahan. Informasi ini mendukung perencanaan pengendalian lintas musim (Hossain & Begum, 2016).

Ambang kedalaman dan durasi genangan yang menekan gulma tanpa merusak kedelai perlu ditentukan untuk spesies dan varietas yang berbeda. Eksperimen sebaiknya mengukur bukan hanya kelangsungan hidup, tetapi juga pemulihan setelah pengeringan, produksi biji, perubahan aerenkim, aktivitas enzim fermentasi, dan stres oksidatif. Pendekatan tersebut akan menghasilkan rekomendasi tata air yang lebih presisi daripada

penggunaan satu kedalaman untuk seluruh kondisi lahan (Chamara et al., 2018).

Pengembangan bioherbisida memerlukan verifikasi dari laboratorium sampai lapangan. Senyawa aktif harus diidentifikasi, distandarkan, dan diuji pada gulma sasaran serta kedelai. Formulasi perlu mempertahankan stabilitas bahan aktif dalam kondisi air, cahaya, dan suhu yang berubah. Penelitian juga harus mengevaluasi pengaruh terhadap mikroorganisme tanah, organisme perairan, dan residu. Tanpa tahapan tersebut, potensi alelopati belum dapat langsung diterjemahkan menjadi teknologi yang aman dan konsisten (Kostina-Bednarz et al., 2023).

KESIMPULAN

Budidaya kedelai jenuh air mengubah lingkungan tanah melalui penurunan oksigen dan perubahan redoks, sehingga bertindak sebagai tekanan selektif terhadap komunitas gulma. Spesies terestrial yang sensitif cenderung menurun, sedangkan gulma semiakuatik dan toleran genangan memperoleh keuntungan. Pergeseran tersebut terlihat pada perubahan komposisi, dominansi, pola pertumbuhan, dan bank biji. Karena itu, penurunan jumlah gulma tidak selalu berarti masalah selesai apabila komunitas bergeser menuju spesies yang lebih adaptif (Ikhsan et al., 2020).

Keberhasilan gulma bertahan didukung oleh kombinasi aerenkim, akar adventif, penghalang kehilangan oksigen, pemanjangan pucuk, fermentasi, konservasi energi, sistem antioksidan, dormansi, produksi biji tinggi, dan penyebaran melalui air. Sifat-sifat tersebut juga meningkatkan kemampuan bersaing dengan kedelai dan memperkuat dampak alelopati. Interaksi antara hipoksia, kompetisi, dan senyawa alelokimia dapat menurunkan pertumbuhan

serta hasil apabila tidak dikendalikan pada periode kritis (Colmer & Voesenek, 2009). Pengelolaan gulma yang berkelanjutan harus memadukan tata air yang presisi, varietas dan jarak tanam kompetitif, mulsa, penyiangan mekanis, penggunaan herbisida selektif secara bijaksana, pencegahan produksi biji, pengelolaan saluran, dan pengembangan bioherbisida. Strategi tersebut perlu disesuaikan dengan spesies dominan dan dievaluasi lintas musim menggunakan indikator populasi gulma, bank biji, hasil kedelai, biaya, dan dampak lingkungan. Pendekatan terpadu merupakan pilihan paling rasional untuk meningkatkan produktivitas kedelai sekaligus menjaga keberlanjutan ekosistem rawa (Rao et al., 2017).

DAFTAR PUSTAKA

- Aanchal, & Menon, S. (2025). Effect of weed management practices on soybean growth and yield improvement. *International Journal of Research in Agronomy*, 8(4), 691.
<https://doi.org/10.33545/2618060x.2025.v8.i4i.2847>
- Abdullah, M., Zakaria, N., Ahmad-Hamdani, M. S., & Juraimi, A. S. (2021). Water scarcity in the rice fields: A review on water and weed interaction in the lowland rice production areas. *Plant Archives*, 21(Suppl. 1), 1707–1714.
<https://doi.org/10.51470/plantarchives.2021.v21.s1.270>
- Abusteit, E. O., Absy, R., Ismail, A. M., & Hassan, A. (2024). Preliminary study on the effect of certain weeds control strategies on the seed bank of the soil. *Research Square*.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-4220016/v1>
- Adak, M. K., Das, A., Kundu, A., Chatterjee, M., & Hasanuzzaman, M. (2023). Molecular mechanisms in understanding anoxia tolerance in rice seeds under submergence and their implication in rice biotechnology. *Seeds*, 2(3), 246.
<https://doi.org/10.3390/seeds2030019>
- Ahadiyat, Y. R., & Sarjito, A. (2022). Pengaruh kondisi lahan kering tanpa olah tanah terhadap kelimpahan gulma. *AL-Kauniyah: Jurnal Biologi*, 15(1), 16–25.
<https://doi.org/10.15408/kauniyah.v15i1.15137>
- Anwar, S., Naseem, S., Karimi, S., Asi, M. R., Akrem, A., & Ali, Z. (2021). Bioherbicidal activity and metabolic profiling of potent allelopathic plant fractions against major weeds of wheat—Way forward to lower the risk of synthetic herbicides. *Frontiers in Plant Science*, 12.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2021.632390>
- Chamara, B. S., Marambe, B., Kumar, V., Ismail, A. M., Septiningsih, E. M., & Chauhan, B. S. (2018). Optimizing sowing and flooding depth for anaerobic germination-tolerant genotypes to enhance crop establishment, early growth, and weed management in dry-seeded rice (*Oryza sativa* L.). *Frontiers in Plant Science*, 9, 1654.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2018.01654>
- Cheng, F., & Cheng, Z. (2015). Research progress on the use of plant allelopathy in agriculture and the physiological and ecological mechanisms of allelopathy. *Frontiers in Plant Science*, 6.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.01020>
- Colmer, T. D., & Voesenek, L. A. C. J. (2009). Flooding tolerance: Suites of plant traits in variable environments. *Functional Plant Biology*, 36(8), 665.
<https://doi.org/10.1071/FP09144>
- Efendy, D. Y., Yudono, P., & Respatie, D. W. (2020). Pengaruh metode pengendalian gulma terhadap dominansi gulma serta pertumbuhan dan hasil tanaman kedelai (*Glycine max* (L.) Merr.). *Vegetalika*, 9(3), 449–460.
<https://doi.org/10.22146/veg.44998>
- Ejiri, M., & Shiono, K. (2019). Prevention of radial oxygen loss is associated with exodermal suberin along adventitious roots of annual wild species of *Echinochloa*. *Frontiers in Plant Science*,

- 10, 254.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00254>
- Firmansyah, E. (2018). Perubahan morfologis dan anatomis kelapa sawit pada rezim air dan salinitas berbeda. *Jurnal Agro*, 5(1), 13. <https://doi.org/10.15575/1963>
- Hossain, M. M., Begum, M., Hashem, A., Rahman, M. M., Ahmed, S., Hassan, M. M., Javed, T., Shabbir, R., Hadifa, A., Sabagh, A. E., & Bell, R. W. (2021). Strip tillage and crop residue retention decrease the size but increase the diversity of the weed seed bank under intensive rice-based crop rotations in Bangladesh. *Agronomy*, 11(6), Article 1164. <https://doi.org/10.3390/agronomy11061164>
- Hossain, M., & Begum, M. (2016). Soil weed seed bank: Importance and management for sustainable crop production—A review. *Journal of the Bangladesh Agricultural University*, 13(2), 221. <https://doi.org/10.3329/jbau.v13i2.28783>
- Ikhsan, Z., Hidrayani, H., Yaherwandi, Y., & Hamid, H. (2020). Keanekaragaman dan dominansi gulma pada ekosistem padi di lahan pasang surut Kabupaten Indragiri Hilir. *Agrovigor: Jurnal Agroekoteknologi*, 13(2), 117–124. <https://doi.org/10.21107/agrovigor.v13i2.7463>
- Imaniasita, V., Liana, T., Krisyetno, K., & Pamungkas, D. S. (2020). Identifikasi keragaman dan dominansi gulma pada lahan pertanian kedelai. *Agrotechnology Research Journal*, 4(1), 1–8. <https://doi.org/10.20961/agrotechresj.v4i1.36449>
- Indarwati, I., Jili, A. Q. A., Susilo, A., & Suryaningsih, D. R. (2023). Potensi alelopati ekstrak gulma alang-alang sebagai bioherbisida. *Journal of Applied Plant Technology*, 2(1), 30. <https://doi.org/10.30742/japt.v2i1.77>
- Indarwati, I., Thohiron, M., & Triyono, M. F. (2022). Uji efektivitas herbisida pasca tumbuh pada tanaman kedelai (*Glycine max* L.). *Journal of Applied Plant Technology*, 1(1), 71–79. <https://doi.org/10.30742/japt.v1i1.32>
- Khamare, Y., Chen, J., & Marble, C. (2022). Allelopathy and its application as a weed management tool: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, Article 1034649. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1034649>
- Kostina-Bednarz, M., Płonka, J., & Barchańska, H. (2023). Allelopathy as a source of bioherbicides: Challenges and prospects for sustainable agriculture. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 22(2), 471. <https://doi.org/10.1007/s11157-023-09656-1>
- Ma, M., Cen, W., Li, R., Wang, S., & Luo, J. (2020). The molecular regulatory pathways and metabolic adaptation in the seed germination and early seedling growth of rice in response to low O₂ stress [Review of The Molecular Regulatory Pathways and Metabolic Adaptation in the Seed Germination and Early Seedling Growth of Rice in Response to Low O₂ Stress]. *Plants*, 9(10), 1363. <https://doi.org/10.3390/plants9101363>
- Marschner, C., Colucci, I., Stup, R. S., Westbrook, A. S., Brunharo, C. A. C. G., DiTommaso, A., & Mesgaran, M. B. (2024). Modeling weed seedling emergence for time-specific weed management: A systematic review. *Weed Science*, 72(4), 313–330. <https://doi.org/10.1017/wsc.2024.25>
- Murrinie, E. D., Fauzi, M., & Krestiani, V. (2023). Perubahan komposisi gulma pada pertanian okra dengan jarak tanam dan frekuensi penyiangan berbeda. *Proceedings Series on Physical & Formal Sciences*, 5, 203–210. <https://doi.org/10.30595/pspfs.v5i.724>
- Ningsih, A., Mansyurdin, M., & Maideliza, T. (2016). Perkembangan aerenkim akar kangkung darat (*Ipomoea reptans* Poir) dan kangkung air (*Ipomoea aquatic* Forsk). *AL-Kauniah Jurnal Biologi*, 9(1). <https://doi.org/10.15408/kauniah.v9i1.3356>
- Oksari, A. A. (2017). Analisis vegetasi gulma pada pertanian jagung dan hubungannya dengan pengendalian gulma

- di Lambung Bukit, Padang, Sumatera Barat. *Jurnal Sains Natural*, 4(2), 135–143. <https://doi.org/10.31938/jsn.v4i2.85>
- Paiman, P., Ansar, M., Ardiani, F., & Yusoff, S. F. (2022). Minimizing weed competition through waterlogging in rice (*Oryza sativa*) under various soil types. *Research on Crops*, 23(2), 1–9. <https://doi.org/10.31830/2348-7542.2022.roc-903>
- Paiman, P., Ardiyanta, Subeni, Kharisun, & Yusoff, S. F. (2022). Effect of waterlogging on weed seed germination and growth in lowland rice. *Applied Ecology and Environmental Research*, 20(6), 5397–5408. https://doi.org/10.15666/aeer/2006_53975408
- Pan, J., Sharif, R., Xu, X., & Chen, X. (2021). Mechanisms of waterlogging tolerance in plants: Research progress and prospects [Review of Mechanisms of Waterlogging Tolerance in Plants: Research Progress and Prospects]. *Frontiers in Plant Science*, 11, 627331. <https://doi.org/10.3389/fpls.2020.627331>
- Puspita, K. D., Respatie, D. W., & Yudono, P. (2017). Pengaruh waktu penyiangan terhadap pertumbuhan dan hasil dua kultivar kedelai (*Glycine max* (L.) Merr.). *Vegetalika*, 6(3), 24–34. <https://doi.org/10.22146/veg.28015>
- Rao, A. N., Brainard, D. C., Kumar, V., Ladha, J. K., & Johnson, D. E. (2017). Preventive weed management in direct-seeded rice. In *Advances in Agronomy* (Vol. 144, pp. 45–142). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2017.02.002>
- Rathika, S., Ramesh, T., & Shanmugapriya, P. (2020). Weed management in direct seeded rice: A review. *International Journal of Chemical Studies*, 8(4), 925. <https://doi.org/10.22271/chemi.2020.v8.i4.f.9723>
- Sagala, D., Ghulamahdi, M., & Melati, M. (2011). Pola serapan hara dan pertumbuhan beberapa varietas kedelai dengan budidaya jenuh air di lahan rawa pasang surut. *Jurnal Agroqua*, 9(1), 1–10. <https://doi.org/10.32663/ja.v9i1.40>
- Setiawan, A. N., & Sarjiyah, S. (2021). Keanekaragaman dan kelimpahan gulma pada tumpangsari jagung manis dengan kacang. *Bioeksperimen: Jurnal Penelitian Biologi*, 7(2), 143–150. <https://doi.org/10.23917/bioeksperimen.v7i2.10814>
- Silva, D. R. O. da D., Agostinetto, D., & Vargas, L. (2018). Partition resources soil and light in competition between soybean and stages of horseweed. *Brazilian Journal of Agriculture – Revista de Agricultura*, 93(2), 112–121. <https://doi.org/10.37856/bja.v93i2.219>
- Soomers, H., Karssenberg, D., Soons, M. B., Verweij, P. A., Verhoeven, J. T. A., & Wassen, M. J. (2012). Wind and water dispersal of wetland plants across fragmented landscapes. *Ecosystems*, 16(3), 434. <https://doi.org/10.1007/s10021-012-9619-y>
- Susilawati, A., Wahyudi, E., & Mailina, B. (2017). Pertanian ramah lingkungan di lahan rawa pasang surut mendukung ketahanan pangan nasional. In *Balai Besar Pengkajian dan Pengembangan Teknologi Pertanian*. <http://repository.pertanian.go.id/handle/123456789/7235>
- Utami, S. R., Murningsih, M., & Muhammad, F. (2020). Keanekaragaman dan dominansi jenis tumbuhan gulma pada perkebunan kopi di Hutan Wisata Nglimut Kendal Jawa Tengah. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 18(2), 411. <https://doi.org/10.14710/jil.18.2.411-416>
- Voosenek, L. A. C. J., & Bailey-Serres, J. (2013). Flooding tolerance: O₂ sensing and survival strategies. *Current Opinion in Plant Biology*, 16(5), 647. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2013.06.008>
- Yani, I. U. K., Killa, Y. M., & Kapoe, S. K. K. L. (2022). Identifikasi jenis dan nilai penting gulma tanaman padi sawah di lahan food estate Desa Umbu Pabal Selatan, Kabupaten Sumba Tengah. *Perbal Jurnal Pertanian Berkelanjutan*, 10(2), 291. <https://doi.org/10.30605/perbal.v10i2.1761>

Zhou, W., Feng, C., Meng, Y., Chandrasekaran, U., Luo, X., Yang, W., & Shu, K. (2020). Plant waterlogging/flooding stress responses: From seed germination to maturation [Review of Plant waterlogging/flooding stress responses: From seed

germination/flooding stress responses: From seed germination to maturation]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 148, 228.

<https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.01.020>