

Integrating Molecular Breeding, Plant Biotechnology, and Genetic Resource Management to Support Food Security under Climate Change: A Systematic Literature Review

Muhammad Gibran Alif Prasetya

Universitas Negeri Semarang

gibrannrmn@gmail.com

Safa Amal Hayati

Universitas Negeri Semarang

Safaamalhayati31@gmail.com

Azimatul Khuzniah

Universitas Negeri Semarang

azimatulkhusniah067@gmail.com

Hamdiyah

Universitas Negeri Semarang

diyah.hamdiyah23@gmail.com

Annisa Aulia

Universitas Negeri Semarang

annisaulia221@gmail.com

Trisna Dwi Sasmita

Universitas Negeri Semarang

trisnadinita@gmail.com

Abstract

An Introduction Food insecurity in the world is no longer a matter of inadequate and unavailability to food but has taken complexity as a result of global climate change, and calls for transforming the manner that agricultural production would be done. In this systematic literature review, ten recent scientific papers are reviewed to assess the place of combining molecular breeding technology along with plant biotechnology and management of genetic resources to support food security in the context of climate changes. We apply the Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) method by conducting literature search in Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect and IEEE Xplore databases between 2015 to 2025. The outcomes of this analysis show a high level of convergence between the three pillars of biomolecular technology, as visualized in VOSviewer that reflects a close linkage among molecular breeding, climate change/food security and genetics resources. The major approach is focusing on DNA marker systems, genome editing (CRISPR-Cas9), and genomic selection facilities that have led to quicken the pace in developing genotype with tolerance for more than one stress. Germplasm conservation, and the use of crop wild relatives are an important component of genetic resource management for adaptation. But, the implementation is still facing challenges due to regulatory hurdles, technology access divide and public acceptance. Alignment between food security, climate change adaptation, disaster risk reduction policy in food systems and the adoption of biomolecular tool is essential for sustainable agricultural system.

Keywords: molecular breeding, plant biotechnology, genetic resource management, climate resilience, food security

Abstrak

Perubahan iklim global telah menimbulkan tantangan serius bagi sistem ketahanan pangan dunia dan telah mendorong kebutuhan mendesak untuk transformasi metode produksi pertanian. Tujuan: Mengingat perubahan iklim, tinjauan ini bertujuan untuk mengevaluasi satu dekade (sepuluh) studi ilmiah guna mengkaji peran integrasi pemuliaan molekuler, bioteknologi tanaman, dan pengelolaan sumber daya genetik dalam mencapai ketahanan pangan. Penelitian ini dilakukan melalui protokol Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) dengan menelusuri literatur di basis data database Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect, dan IEEE Xplore untuk periode publikasi 2015-2025. Analisis komprehensif menunjukkan bahwa ketiga bidang penelitian ilmu biomolekuler saling terkait erat, sebagaimana dapat ditunjukkan oleh peta VOSviewer yang menunjukkan hubungan antara pemuliaan molecular breeding, climate change, food security, dan genetic resources. Temuan utama menunjukkan bahwa kemajuan yang dicapai melalui teknologi penanda DNA, penyuntingan genom (CRISPR-Cas9), dan seleksi genom telah menghasilkan percepatan yang signifikan dalam pengembangan varietas yang tahan terhadap berbagai cekaman. Pengelolaan sumber daya genetik, termasuk konservasi plasma nutfah dan pemanfaatan kerabat liar tanaman pangan, juga merupakan lungkang gen fundamental untuk adaptasi. Namun, kendala regulasi, ketersediaan teknologi, dan penerimaan publik menghambat konsensus. Kebijakan terpadu dan koheren yang mengintegrasikan ketahanan pangan, adaptasi perubahan iklim, dan pengurangan risiko bencana diperlukan untuk memaksimalkan manfaat teknologi biomolekuler dalam sistem pertanian berkelanjutan.

Kata kunci: pemuliaan molekuler, bioteknologi tanaman, manajemen sumber daya genetik, resiliensi iklim, ketahanan pangan

PENDAHULUAN

Meningkatnya populasi global, diperkirakan mencapai 10 miliar pada tahun 2050, dan menurunnya kondisi perubahan iklim global telah menciptakan tantangan baru bagi produksi pangan di seluruh dunia. Degradasi lahan pertanian dan ketersediaan air yang tidak menentu, ditambah pola cuaca yang semakin ekstrem, serta meningkatnya jumlah hama dan penyakit, menempatkan ketahanan pangan dalam risiko global. Terdapat tuntutan yang tak terelakkan akan model yang berpusat pada petani menuju pertanian berkelanjutan dengan mengikuti pendekatan interdisipliner yang melibatkan teknologi biomolekuler inovatif yang tidak dapat ditunda. Pertanian berkelanjutan modern kini mulai memperhatikan tidak hanya produksi tetapi juga konservasi sumber daya alam, pengurangan gas rumah kaca, dan adaptasi terhadap konsekuensi perubahan iklim (Mucharam et al., 2022).

Era teknologi biomolekuler telah tiba: membawa perspektif baru dalam penentuan ketahanan pangan yang tangguh di seluruh dunia. Kemajuan dalam analisis genomik, proteomik, dan metabolomik yang dipadukan dengan bioinformatika telah memungkinkan kita memperoleh

pemahaman mendalam tentang jaringan molekuler yang mengatur berbagai sifat agronomi pada tanaman. Pemanfaatan teknik-teknik ini dalam program pemuliaan merevolusi pengembangan kultivar baru dan yang lebih baik pada tingkat presisi dan kecepatan yang belum pernah terlihat sebelumnya. Selama beberapa tahun terakhir, CRISPR-Cas9 dan teknik pemuliaan baru lainnya telah merevolusi pemuliaan tanaman dan memungkinkan penyuntingan genetik spesifik (Navarro et al., 2025). Kemajuan ini telah membuka jalan bagi penyuntingan genom untuk digunakan dalam berbagai tanaman pangan, termasuk padi, jagung, gandum, dan kedelai, yang merupakan komponen penting ketahanan pangan global.

Pemuliaan molekuler adalah sub-cabang teknologi biomolekuler yang telah mengalami pertumbuhan pesat selama 10 tahun terakhir. Seleksi berbantuan penanda (MAS) dan prediksi genom (GP) semakin banyak digunakan dalam program pemuliaan terkini yang memungkinkan identifikasi genotipe elit pada tahap awal perkembangan tanaman. GS, khususnya, telah dilaporkan meningkatkan prediksi nilai genetik pada masing-masing tanaman dari informasi genom berdensitas tinggi, yang secara dramatis mengurangi siklus pemuliaan dan meningkatkan efisiensi seleksi untuk sifat-sifat kompleks seperti hasil, toleransi kekeringan, atau ketahanan terhadap penyakit (misalnya, peningkatan rata-rata hasil yang telah diuji tetapi belum diuji terhadap proses migasuga dalam uji coba yang menyebabkan virus penutup inden) yang diinduksi mosassri li. Faktor kontribusi dalam prosesor KUE. Pengenalan seleksi genomik dalam skema pembiakan cepat telah memungkinkan pengoperasian hingga lima atau enam generasi per tahun, berbeda dengan satu atau dua generasi per tahun dalam sistem klasik (Ceran et al., 2024). Namun, kecepatan ini penting karena urgensi untuk mengatasi penyebab perubahan iklim terwujud lebih cepat daripada yang diperkirakan sebelumnya.

Biotehnologi telah merevolusi laju peningkatan tanaman dengan merancang tanaman yang menunjukkan karakter yang lebih baik. Teknologi ini telah ditanam oleh lebih dari 17 juta keluarga petani di 32 negara sejak awal komersialisasi tanaman biotek (1996) dan total manfaat dari tanaman biotek bagi petani dari peningkatan hasil panen dan penurunan penyemprotan pestisida membentuk perkiraan nilai $>$ US\$260 miliar, ditambah penghematan emisi gas rumah kaca (Badiyal et al., 2024). Tanaman steril atau hampir steril tersebut, beberapa di antaranya telah diidentifikasi tetapi belum dikomersialkan, yang lainnya murni teoretis, menjadi layak berkat kemajuan pesat pendekatan bioteknologi yang dipandu biologi. Kemajuan terbaru telah menghasilkan beberapa terobosan baru seperti: Kemajuan CRISPR-Cas9 baru telah menghasilkan pisang tanpa kapasitas untuk menjadi cokelat yang dapat menghemat berton-ton limbah makanan dan mengurangi CO₂

yang setara dengan 2 juta mobil dari jalan raya setiap tahun. Hal ini merupakan bukti potensi besar bioteknologi dalam memenuhi kebutuhan pangan dunia kita di masa depan.

Pengelolaan sumber daya genetik tanaman merupakan bidang yang spesifik dan menjanjikan untuk mencapai keberlanjutan pertanian global. Keragaman genetik yang terkandung dalam plasma nutriment tanaman, termasuk ras lokal peninggalan asli dan spesies liar serta kultivar tradisional, menyediakan lumbang gen untuk variasi di masa depan yang memungkinkan tanaman beradaptasi dengan variasi iklim, yang juga telah digunakan untuk memperkenalkan banyak sifat baru ke dalam berbagai varietas (Ranjiith & Francesco, 2022). Erosi genetik telah menghambat prospek konservasi sumber daya ini, sementara modernisasi pertanian dan perubahan iklim terkaitnya, serta degradasi habitat untuk pertanian, berdampak buruk. Perangkat genomik yang digunakan untuk melestarikan dan memanfaatkan sumber daya genetik telah memfasilitasi karakterisasi molekuler yang mendalam terhadap koleksi plasma nutriment dan identifikasi alel bermanfaat, yang dapat ditransfer ke varietas unggul melalui program pra-pemuliaan yang dimediasi seleksi genomik (GS). Kolaborasi ini tidak hanya berkontribusi pada eksploitasi variasi genetik bank gen yang lebih cepat, tetapi juga dapat mengarah pada pemanfaatan keragaman yang lebih luas dalam program pemuliaan, yang saat ini masih dibatasi atau dihambat oleh seleksi untuk karakteristik tertentu.

Perubahan iklim global telah meningkatkan tingkat berbagai tekanan biotik dan abiotik yang harus dihadapi tanaman. Perubahan iklim global yang melibatkan peningkatan suhu, perubahan pola curah hujan, peningkatan konsentrasi CO₂ di atmosfer, dan peningkatan frekuensi peristiwa cuaca ekstrem seperti kekeringan, banjir, dan gelombang panas telah membuat lingkungan tanah menjadi lebih tidak terduga dan menantang bagi produktivitas tanaman. Dalam konteks tersebut, pemuliaan tanaman yang tahan iklim telah menjadi prioritas utama, bahkan mungkin seluruh, dalam agenda penelitian pertanian global. Sistem CRISPR telah memfasilitasi modifikasi gen-gen yang responsif terhadap stres, seperti faktor kejutan panas, gen biosintesis osmolit, dan faktor transkripsi terkait toleransi kekeringan atau garam. Melalui rekayasa genetika gen-gen ini, galur-galur pemuliaan dengan toleransi yang jauh lebih tinggi terhadap berbagai stres telah diperoleh, sehingga hasil panen dapat dipertahankan ketika sebelumnya gagal panen (Rai et al., 2023). Selain penerapannya dalam rekayasa transgenik dan pendekatan cisgenik untuk meningkatkan efisiensi udara, nitrogen, dan fotosintesis, pendekatan ini juga telah disarankan sebagai dasar untuk meningkatkan produktivitas tanpa dampak lingkungan yang besar.

Pemuliaan tanaman presisi telah sepenuhnya ditransformasikan oleh AI dan analisis pembelajaran mesin terhadap data genomik dan fenotipik. Dengan menggunakan algoritma

pembelajaran mesin untuk menganalisis kumpulan data besar yang dihasilkan melalui pengurutan genomik berthroughput tinggi, serta pembuatan profil transkriptomik, proteomik, dan metabolomik, para peneliti telah mampu mengidentifikasi penanda genetik untuk sifat-sifat yang diinginkan dengan akurasi yang sebelumnya tidak dapat dicapai. AI juga telah digunakan dalam prediksi struktur protein, desain protein baru, dan optimasi jalur metabolisme untuk tanaman dengan karakteristik spesifik. Fenotype berthroughput tinggi dari gambar 3D, bersamaan dengan sensor IoT (Internet of Things) dan drone, yang bersama-sama menyediakan pengumpulan data fenotipik skala besar in-situ yang hemat biaya dibandingkan dengan persyaratan evolusi. Integrasi informasi genomik, fenotipik, dan lingkungan menggunakan alat bioinformatika yang canggih telah memungkinkan untuk secara efisien memprediksi genotipe yang dapat disetel untuk pertanian presisi.

Meskipun kemajuan teknologi berbasis biomolekuler mengubah wajah pertanian, adopsi perangkat baru merupakan proses yang menantang. Isu-isu yang bersifat politis, terutama mengenai perizinan dan penyebaran tanaman rekayasa genetika, sangat berbeda dari satu negara atau wilayah ke negara atau wilayah lainnya. Perbedaan antara regulasi untuk produk (seperti di Amerika Serikat, di mana prosedur yang disederhanakan untuk persetujuan tanaman rekayasa genetika tanpa DNA asing sudah berlaku) dan proses (misalnya Uni Eropa yang perlahan membuka diri terhadap teknologi ini) telah mengungkapkan inkonsistensi dan intervensi terhadap penerapannya masih dalam proses. Persepsi publik tentang tanaman bioteknologi juga dibahas karena kurangnya informasi, atau komunikasi ilmiah yang buruk, dan cerita-cerita negatif yang dipromosikan oleh kelompok anti-GMO. Selain itu, teknologi dan perangkat baru hampir sepenuhnya tidak tersedia, terutama di negara-negara berpenghasilan rendah hingga menengah, di mana terdapat kebutuhan mendesak untuk meningkatkan produksi pertanian. Kesenjangan ini menyebabkan ketidakseimbangan dalam menangani perubahan iklim dan kerawanan pangan serta menuntut platform internasional untuk mentransfer teknologi dan membangun kapasitas berdasarkan teknik biomolekuler secara global.

Mengingat semakin banyaknya permasalahan yang dihadapi sistem pertanian di berbagai belahan dunia, tinjauan pustaka sistematis ini bertujuan untuk mengumpulkan dan mengkaji bukti terkini tentang perkembangan dan penerapan teknologi biomolekuler yang dapat menjadikan pertanian lebih berkelanjutan. Survei ini akan menekankan pemuliaan molekuler, bioteknologi tanaman, dan pengelolaan sumber daya genetik sebagai "tiga mekanisme" untuk gagasan ketahanan pangan dalam menghadapi perubahan iklim. Dengan meninjau literatur secara luas selama dekade terakhir, dengan fokus pada karya-karya yang diterbitkan setelah tahun 2020, kami menemukan

tren-tren baru seperti perangkat dan metodologi molekuler mutakhir yang diterapkan pada pertanian dan memprioritaskan pendekatan teknologi yang berhasil beserta isu-isu implementasinya untuk membuat rekomendasi strategis guna mempercepat adopsi teknologi biomolekuler dalam pertanian internasional. Pemahaman terpadu tentang dinamika interaktif ketiga pilar ini dalam konteks pertanian berkelanjutan akan memberikan dukungan pengetahuan bagi para peneliti, pengambil keputusan, dan petani dalam merancang kebijakan dan strategi yang tepat untuk memastikan ketahanan pangan secara berkelanjutan di tengah tantangan perubahan iklim global yang semakin meningkat

METODE PENELITIAN

Dalam studi ini, analisis komprehensif dan sistematis terhadap literatur ilmiah tentang pemuliaan molekuler, bioteknologi tanaman, dan pengelolaan sumber daya genetik untuk ketahanan pangan dalam menghadapi perubahan iklim dilakukan menggunakan metode Tinjauan Literatur Sistematis (SLR). SLR dipilih sebagai metode investigasi karena memungkinkan pengumpulan bukti ilmiah yang transparan, reproduktif, dan berbasis protokol, sekaligus mengurangi bias subjektif dan memaksimalkan validitas (Yeung dkk.). Metode sistematis ini memungkinkan identifikasi, evaluasi objektif, dan sintesis semua studi peer-review yang relevan untuk memberikan gambaran umum tentang status aplikasi terkini teknologi biomolekuler yang terkait dengan sistem pertanian berkelanjutan.

Panduan Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) menginformasikan pendekatan metodologis, yang mendorong transparansi, keandalan, dan reproduktifitas dalam pelaksanaan tinjauan. Protokol ini dilaksanakan dengan mengikuti 5 langkah utama SLR: (1) mendefinisikan pertanyaan penelitian, (2) mendefinisikan strategi penelusuran literatur, (3) memilih dan menyaring studi, (4) mengekstraksi dan mensintesis data, serta (5) menganalisis secara kritis dan menilai kualitas. Catatan setiap tahap disimpan secara cukup detail sehingga jejak audit dan pengawasan eksternal terhadap proses peninjauan dan temuan dapat dipertahankan.

Pertanyaan penelitian dirumuskan menggunakan model PICO (Populasi, Intervensi, Perbandingan, Hasil) dengan cara yang dimodifikasi untuk tinjauan teknologi pertanian. Setelah makalah tahun 2009, kami melakukan tinjauan sistematis dengan fokus pada pengaruh terkait perubahan iklim dan menetapkan bahwa pertanyaan penelitian subtotal kami (mencakup pemuliaan molekuler, bioteknologi, dan manajemen plasma nutfah) adalah 'Sejauh mana perkembangan teknologi ini berkontribusi pada ketahanan pangan dalam menghadapi perubahan iklim?' Pertanyaan umum ini dapat dibagi lagi menjadi sub-pertanyaan spesifik: (1) apa saja kemajuan

pemuliaan molekuler terkini seperti MAS, GS, CRISPR/Cas9, dan teknologi pemuliaan cepat lainnya, dan seberapa efektifkah untuk mendapatkan kultivar tanaman yang tahan terhadap stres biotik/abiotik? (2) Bagaimana bioteknologi memengaruhi hasil, kualitas nutrisi, dan keberlanjutan sistem produksi pangan? (3) Apakah pendekatan manajemen sumber daya genetik berkontribusi pada adaptasi yang lebih berhasil terhadap perubahan iklim? (4) Bagaimana kecerdasan buatan dan analitik data besar dapat digunakan untuk mempercepat program pemuliaan presisi? (5) Apa saja hambatan hukum, sosial, dan teknis (misalnya, keselamatan, peraturan) terhadap implementasi teknologi ini?

Beberapa basis data ilmiah elektronik ditelusuri untuk mendapatkan kumpulan data terlengkap untuk ditinjau. Scopus, Web of Science, PubMed, ScienceDirect/Elsevier Journal Portal, IEEE Xplore, serta Google Scholar sebagai sumber tambahan untuk literatur abu-abu ditelusuri untuk membangun basis data. Ketiga basis data tersebut dipilih karena kaya akan konten makalah penelitian di bidang pertanian, bioteknologi, genetika, dan ilmu tanaman. Jangka waktu pencarian mencakup tahun 2015–2025, dengan preferensi untuk literatur pasca-2020 guna mencerminkan perkembangan terkini di bidang teknologi biomolekuler yang bergerak cepat.

Rangkaian pencarian dibangun menggunakan operator videografi strategi Boolean glasswork (AND, OR, NOT) dan kata kunci dari tiga bidang studi utama. Istilah pencarian untuk pemuliaan molekuler adalah "molecular breeding", "marker-assisted selection", "MAS", "genomic selection", "genome editing", "CRISPR-Cas9", "gene editing", "speed breeding", "quantitative trait loci", "QTL mapping". Keywords untuk bioteknologi tanaman mencakup: "plant biotechnology", "genetic engineering", "transgenic crops", "biotech crops", "GMO", "genetically modified organisms", "plant transformation", "biofortification", "golden rice". Keywords untuk manajemen sumber daya genetik meliputi: "genetic resources management", "germplasm conservation", "crop wild relatives", "pre-breeding", "genetic diversity", "gene banks", "biodiversity conservation". Keywords cross-cutting yang menghubungkan ketiga domain dengan konteks penelitian mencakup: "climate change", "food security", "climate resilience", "abiotic stress tolerance", "biotic stress resistance", "drought tolerance", "heat stress", "sustainable agriculture", "precision agriculture", "artificial intelligence in breeding".

Sinonim dan variasi istilah juga disertakan dalam strategi pencarian untuk menjaga sensitivitas pencarian yang baik. Istilah pencarian untuk CRISPR adalah: "CRISPR-Cas9," "CRISPR/Cas," "penyuntingan genom," "penyuntingan gen," dan "mutagenesis tertarget." Pemotongan dan karakter pengganti diterapkan pada varian kata morfologis, misalnya yang dimodifikasi serta (misalnya, biotek) yang mencakup "bioteknologi", "bioteknologi", dan istilah

Denmark "biotek". Pencarian tidak dibatasi untuk bahasa apa pun pada langkah pertama, tetapi pada penyaringan akhir, kami hanya memasukkan artikel berbahasa Inggris dan Indonesia untuk mencapai pembacaan artikel yang lebih terfokus dan tepat.

Kriteria inklusi dan eksklusi telah ditentukan sebelumnya untuk mencegah bias dan memastikan keseragaman. Kriteria seleksi meliputi: (1) Publikasi dalam jurnal atau prosiding konferensi yang telah melalui proses peer-review; (2) Melakukan penelusuran literatur mulai tahun 2015 hingga 2025, dengan penekanan pada publikasi pasca-2020; (3) Fokus secara khusus berkaitan dengan aspek pemuliaan molekuler, bioteknologi tanaman, dan manajemen sumber daya genetik; dan Umumnya meliputi: (4) Aplikasi teknologi dalam ketahanan pangan, adaptasi perubahan iklim, atau pertanian berkelanjutan; studi empiris, termasuk uji coba eksperimental/percontohan yang diterapkan dari lingkungan pertanian dan studi kasus, serta penerapan teori yang hanya terdiri dari makalah tinjauan, sintesis pemodelan, dan pengembangan kerangka kerja konseptual; atau (6) Melaporkan temuan yang disajikan secara konsisten yang melaporkan data kuantitatif/kualitatif yang dapat diekstraksi untuk analisis lebih lanjut.

Yang dikecualikan dalam penelitian ini adalah: (1) Makalah yang tidak dalam bentuk peer-review (misalnya, opini, komentar editorial, artikel berita yang kurang memiliki ketelitian ilmiah); (2) Penelitian yang secara eksklusif membahas isu-isu non-teknis seperti analisis kebijakan atau analisis ekonomi, tetapi tidak menawarkan diskusi substantif mengenai aspek teknis teknologi; (3) Publikasi atau makalah duplikat yang menyajikan kumpulan data identik tanpa analisis baru; (4) Penelitian yang dilakukan pada organisme non-tanaman kecuali memperoleh wawasan metodologis yang relevan dengan pemuliaan tanaman; (5) Penelitian dengan metode yang tidak jelas dan hasil yang tidak dapat diverifikasi; dan terakhir: A. Publikasi yang hanya menyediakan abstrak dan teks lengkap yang tidak tersedia untuk pemeriksaan silang metodologi dan temuan secara terperinci.

Sintesis data Sintesis naratif dan jika memungkinkan meta-analisis untuk data kuantitatif digunakan. Sintesis data Ringkasan naratif disusun dengan mengorganisasikan temuan-temuan dalam kisi-kisi tematik sesuai dengan tuntutan pertanyaan penelitian. Tema-tema ini, dan sub tema yang lebih spesifik dalam setiap tema utama diklasifikasikan berdasarkan penelitian tentang: (1) Kebaruan teknologi dalam pemuliaan molekuler; (2) Aplikasi dan dampak bioteknologi; (3) Strategi pengelolaan sumber daya genetik; (4) Integrasi AI dan teknologi digital; (5) Efek ketahanan pangan dan iklim sebagai hasil dari adopsi teknologi genetik; (6) Hambatan untuk adopsi dan penanggulangan. Sintesis Studi disintesis dengan menggabungkan temuan-temuan di seluruh makalah untuk mengidentifikasi pola, persamaan (dan perbedaan) antara studi-studi sehubungan dengan setiap tema. Tabel ringkasan dibuat di mana deskripsi gaya dan hasil studi disusun.

Pemetaan digunakan sebagai alat untuk memvisualisasikan luasnya studi lintas teknologi, spesies/tanaman, sifat, dan wilayah, serta memberikan panduan untuk menyoroti area yang memerlukan penelitian lebih lanjut setelah mencari bukti yang berlawanan.

Estimasi efek gabungan kuantitatif diturunkan menggunakan meta-analisis untuk luaran yang disajikan demikian di seluruh studi dengan desain serupa. Analisis dilakukan dalam perangkat lunak statistik R, dengan paket meta atau metafor. Model efek acak digunakan untuk memperhitungkan heterogenitas antar-studi. Heterogenitas dievaluasi dengan statistik I^2 dan uji Q Cochran. Analisis subkelompok dan meta-regresi dilakukan untuk mengeksplorasi asal heterogenitas berdasarkan fitur studi (jenis tanaman, wilayah geografis, jenis teknologi, atau kualitas studi). Bias publikasi dinilai dengan plot corong dan uji statistik (uji Egger untuk meta-analisis). Untuk mendeteksi bias publikasi, analisis sensitivitas dilakukan menggunakan uji trim-and-fill untuk menyeimbangkan potensi pengaruh studi yang tidak dipublikasikan terhadap estimasi gabungan. Untuk tema-tema yang tidak dapat dianalisis secara meta, karena tingginya keragaman metodologi di antara studi atau rendahnya konsistensi pelaporan hasil, sintesis naratif tetap menjadi pendekatan utama dan penekanan diberikan pada interpretasi kualitatif dan kontekstualisasi.

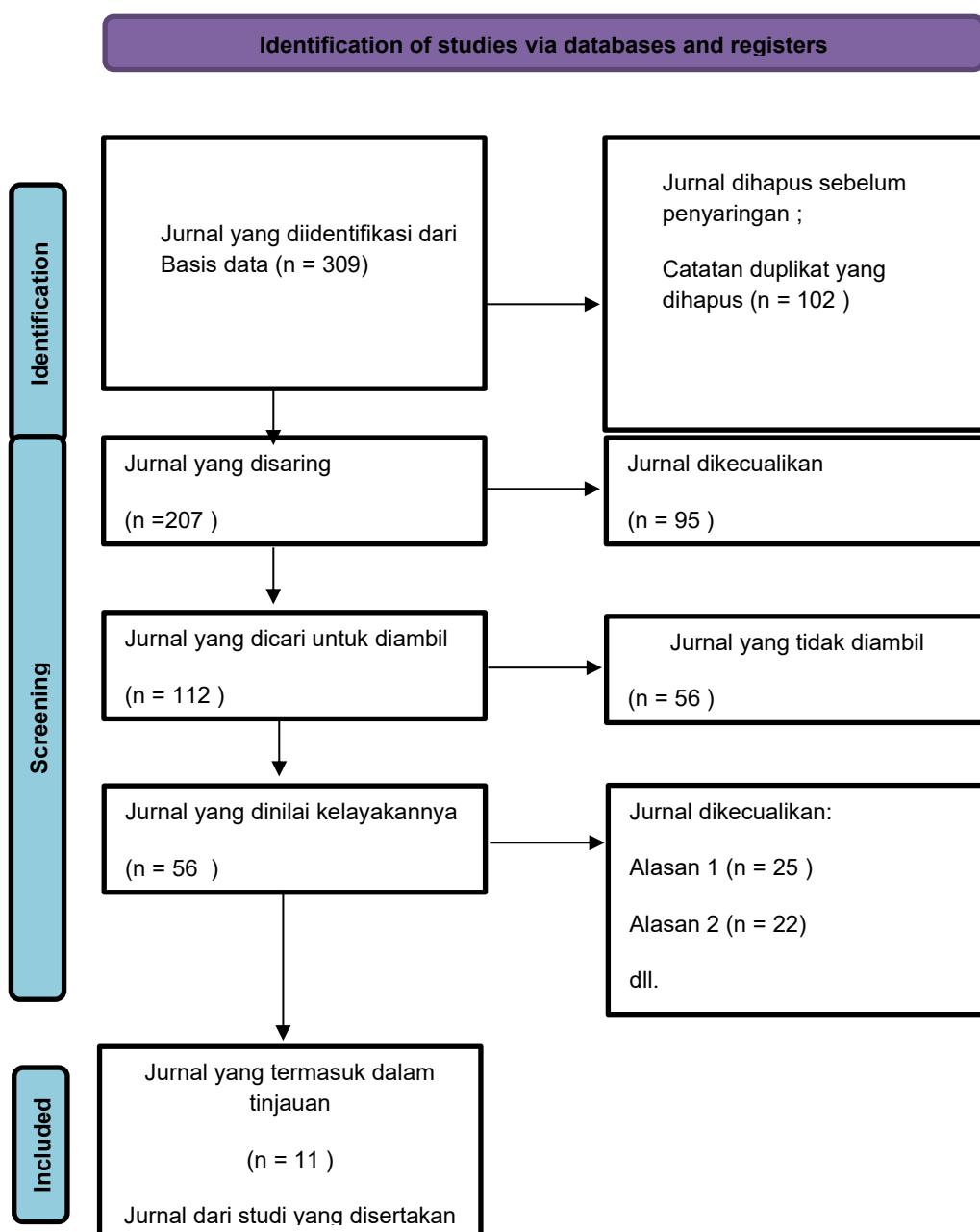
Analisis terkait waktu digunakan untuk mengkarakterisasi sejarah dan pola kontribusi serta implementasi dalam teknologi biomolekuler. Tren publikasi, jaringan sitasi, kolaborasi penulis, dan ko-okurensi kata kunci juga dianalisis menggunakan VOSviewer atau Bibliometrix. Studi saat ini menawarkan survei teknologi baru, tren penelitian, faktor dampak, afiliasi penulis, dan lokasi tempat penelitian dilakukan. Analisis tren juga menyelidiki jalur difusi teknologi menuju berbagai teknologi, aktivitas yang matang dan berkelanjutan dibedakan dari aktivitas yang baru muncul pada tahap awal. Tampilan linimasa animasi dikembangkan untuk perkembangan teknologi, status otorisasi pemasaran, peluncuran pasar, dan penemuan ilmiah utama selama 10 tahun terakhir. Tinjauan pustaka ini akan memberikan ekspektasi historis dan masa depan.

Keterbatasan Tinjauan ini mengakui beberapa keterbatasan potensial dan menggunakan langkah-langkah untuk mengurangi bias. Strategi pencarian yang digunakan sangat beragam dan mencakup berbagai basis data dan literatur abu-abu, yang kemungkinan akan mengurangi bias seleksi. Potensi bias bahasa diminimalkan dengan mencari studi dalam bahasa Inggris dan Indonesia, namun mungkin terdapat studi yang memenuhi syarat dan diterbitkan dalam bahasa lain yang tidak tercakup. Bias publikasi diminimalkan dengan menelusuri literatur abu-abu, menghubungi penulis atau pakar untuk mendapatkan informasi tentang studi yang belum dipublikasikan, dan uji statistik dalam meta-analisis. Terakhir, bias jeda waktu dikurangi dengan mempertimbangkan prosiding konferensi, pracetak, dan laporan teknis terkini—karena teknologi

mutakhir mungkin belum sepenuhnya dilaporkan dalam publikasi yang telah melalui tinjauan sejawat. Untuk mengurangi bias peninjau, kami melakukan ekstraksi standar, duplikasi penyaringan dan ekstraksi, serta melaporkan secara transparan bagaimana kami sampai pada kesimpulan tersebut. Tujuan dari tinjauan pustaka sistematis ini adalah untuk memberikan gambaran berbasis bukti yang menyeluruh, akurat, dan transparan tentang perkembangan pengetahuan dalam pemuliaan molekuler, bioteknologi tanaman, dan sumber daya genetik untuk ketahanan pangan dalam menghadapi perubahan iklim. Proses yang ketat dan sistematis ini akan menghasilkan bukti tinjauan yang kuat dan valid untuk memandu prioritas penelitian, kebijakan, dan tindakan praktis menuju pembangunan pertanian berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil



Gambar 1. Diagram Alur Prisma

Komponen	Uraian
No	1
Penulis & Tahun	Amiteye (2021)
Judul	<i>Basic Concepts and Methodologies of DNA Marker Systems in Plant Molecular Breeding</i>
Fokus Utama	Konsep dasar dan metodologi sistem DNA marker dalam pemuliaan molekuler tanaman
Metodologi	Review komprehensif teknik molecular marker (RFLP, RAPD, SCAR, AFLP, SSR, SNP, DArT, EST, STS, retrotransposon-based)
Temuan Kunci	Klasifikasi marker berdasarkan PCR, dominansi, spesifitas lokus, dan tingkat polimorfisme
Kontribusi terhadap Food Security	Mendukung seleksi genotipe unggul untuk pengembangan varietas produktif
Relevansi dengan Climate Change	Identifikasi gen toleransi stres untuk adaptasi iklim

Komponen	Uraian
No	2
Penulis & Tahun	Guo et al. (2022)
Judul	<i>Mechanisms of Salt Tolerance and Molecular Breeding of Salt-Tolerant Ornamental Plants</i>
Fokus Utama	Mekanisme toleransi salinitas dan pemuliaan molekuler tanaman hias
Metodologi	Review mekanisme adaptasi garam dan molecular breeding berbasis genome editing
Temuan Kunci	Genome editing menghasilkan tanaman toleran salinitas melalui mekanisme salt exclusion
Kontribusi terhadap Food Security	Pemanfaatan lahan salin dan konservasi air tawar
Relevansi dengan Climate Change	Adaptasi terhadap salinasi tanah akibat perubahan iklim

Komponen	Uraian
No	3
Penulis & Tahun	Tan et al. (2022)
Judul	<i>Bioinformatics Approaches and Applications in Plant Biotechnology</i>
Fokus Utama	Aplikasi bioinformatika dalam bioteknologi tanaman
Metodologi	Review tools bioinformatika untuk pengelolaan dan analisis data genomik
Temuan Kunci	Bioinformatika mempercepat sekruensing genom dan pendekatan omics
Kontribusi terhadap Food Security	Efisiensi analisis genomik untuk peningkatan produktivitas pertanian

Relevansi dengan Climate Change	Identifikasi gen resiliensi terhadap stres iklim
--	--

Komponen	Uraian
No	4
Penulis & Tahun	Munaweera et al. (2022)
Judul	<i>Modern Plant Biotechnology as a Strategy in Addressing Climate Change and Attaining Food Security</i>
Fokus Utama	Bioteknologi tanaman modern untuk food security dan climate change
Metodologi	Review genetic engineering, genome editing, RNA silencing, NGS
Temuan Kunci	Bioteknologi menghasilkan ketahanan stres yang sulit dicapai secara konvensional
Kontribusi terhadap Food Security	Pengembangan kultivar berdaya hasil tinggi dan berkelanjutan
Relevansi dengan Climate Change	Adaptasi cepat dan presisi terhadap perubahan iklim

Komponen	Uraian
No	5
Penulis & Tahun	Ranjiith & Francesco (2022)
Judul	<i>Management and Utilization of Plant Genetic Resources for a Sustainable Agriculture</i>
Fokus Utama	Manajemen dan utilisasi sumber daya genetik tanaman
Metodologi	Review konservasi in situ, genebank, dan bioteknologi genotyping
Temuan Kunci	Integrasi konservasi dan pemanfaatan crop wild relatives
Kontribusi terhadap Food Security	Diversifikasi tanaman dan peningkatan ketahanan pangan
Relevansi dengan Climate Change	Breeding tanaman resilient terhadap iklim

Komponen	Uraian
No	6
Penulis & Tahun	Salgotra & Chauhan (2023)
Judul	<i>Genetic Diversity, Conservation, and Utilization of Plant Genetic Resources</i>
Fokus Utama	Keragaman genetik dan konservasi PGR
Metodologi	Review NGS, molecular markers, cryopreservation
Temuan Kunci	Identifikasi QTL dan novel genes untuk breeding
Kontribusi terhadap Food Security	Varietas baru dengan karakter unggul
Relevansi dengan Climate Change	Konservasi genetik untuk adaptasi lingkungan

Komponen	Uraian
No	7

Penulis & Tahun	Rivero et al. (2022)
Judul	<i>Developing Climate-Resilient Crops</i>
Fokus Utama	Toleransi tanaman terhadap kombinasi stres
Metodologi	Review studi stres kombinasi pada tanaman
Temuan Kunci	Respons stres kombinasi bersifat unik
Kontribusi terhadap Food Security	Strategi breeding lebih realistik di lapangan
Relevansi dengan Climate Change	Peningkatan frekuensi stres akibat perubahan iklim

Komponen	Uraian
No	8
Penulis & Tahun	Mešić et al. (2024)
Judul	<i>Advancing Climate Resilience in Sustainable Food Production</i>
Fokus Utama	Inovasi teknologi sistem pangan berkelanjutan
Metodologi	Review precision agriculture, hydroponics, vertical farming
Temuan Kunci	Efisiensi air hingga 90% dan peningkatan hasil
Kontribusi terhadap Food Security	Produksi pangan aman dan berkelanjutan
Relevansi dengan Climate Change	Integrasi teknologi untuk resiliensi iklim

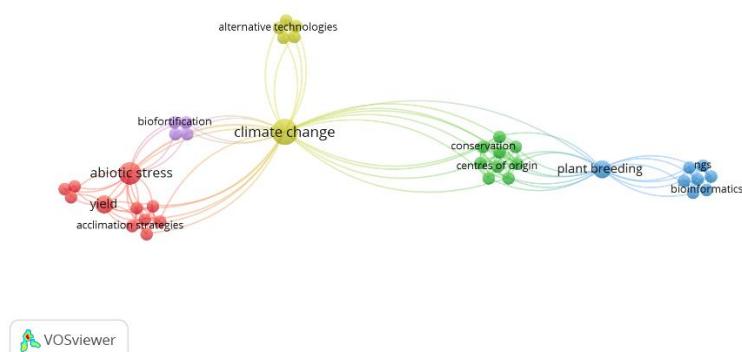
Komponen	Uraian
No	9
Penulis & Tahun	Rezvi et al. (2023)
Judul	<i>Rice and Food Security: Climate Change Implications</i>
Fokus Utama	Dampak climate change terhadap beras
Metodologi	Review dampak stres lingkungan dan proyeksi iklim
Temuan Kunci	Perlunya varietas toleran stres dan biofortifikasi
Kontribusi terhadap Food Security	Beras sebagai komoditas utama pangan global
Relevansi dengan Climate Change	Mitigasi dampak iklim pada produksi beras

Komponen	Uraian
No	10
Penulis & Tahun	Zembe et al. (2023)
Judul	<i>A Policy Coherence Framework for Food Security</i>
Fokus Utama	Koherensi kebijakan food security dan climate adaptation
Metodologi	Analisis dokumen kebijakan dan wawancara informan
Temuan Kunci	Ditemukan misalignment dan kurangnya koordinasi
Kontribusi terhadap Food Security	Framework kebijakan terintegrasi
Relevansi dengan Climate Change	Integrasi adaptasi iklim dalam kebijakan pangan

Tabel 1. Sintesis Penelitian

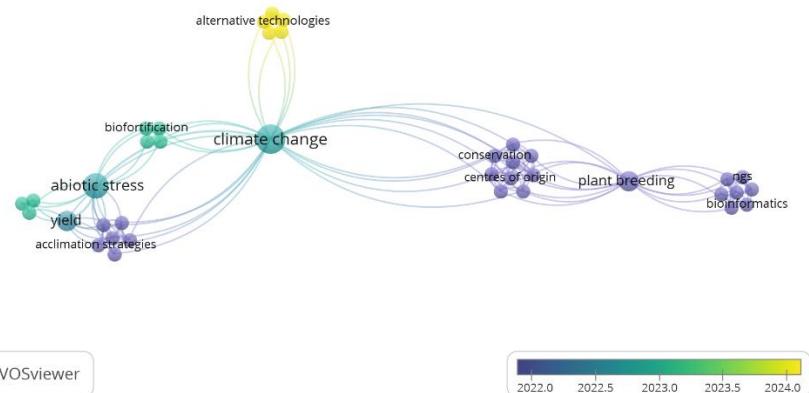
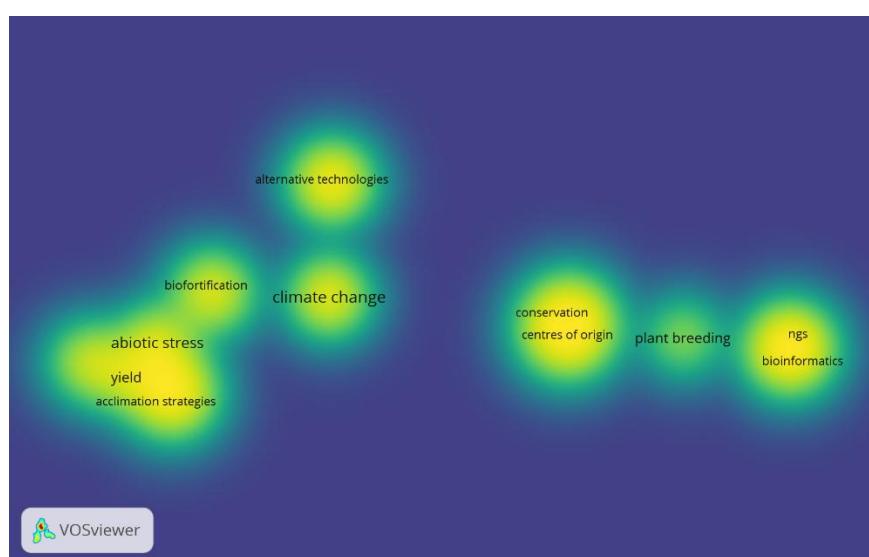
Pembahasan

Dari sepuluh studi yang diulas dalam tinjauan sistematis ini, pemuliaan molekuler intensif, bioteknologi tanaman, dan pengelolaan sumber daya genetik merupakan tiga pilar utama pengembangan agroekosistem yang tangguh terhadap iklim. Jaringan ko-okurensi kata kunci yang memperhitungkan kemunculan kata kunci paling umum menggunakan VOSviewer (Gambar. 1) menunjukkan kemunculan beberapa klaster tematik yang eksplisit, dan empat simpul pusat "*molecular breeding*", "*climate change*", "*food security*", dan "*genetic resources*" menunjukkan bahwa sub-area ini sangat terkait erat dalam hal produksi ilmiah terkini.



Gambar 1. Network Visualisasi VOSviewer

Lintasan tematik Visualisasi overlay (Gambar 2) menunjukkan evolusi tematik dari waktu ke waktu, dengan warna-warna hangat untuk publikasi yang lebih baru pasca-2022 tentang perubahan genom dan kombinasi stres dalam sistem pangan berkelanjutan; visualisasi kepadatan (Gambar 3) menekankan bahwa intensitas puncak dapat terlihat pada persimpangan antara penerapan bioteknologi dan strategi ketahanan iklim. Pola grafis ini memberikan bukti non-statistik bahwa komunitas sains global sedang merangkul spektrum pendekatan teknologi biomolekuler modern yang lebih luas dalam menanggapi tantangan ketahanan pangan yang lebih kompleks.

**Gambar 2.** Overlay Visualisasi VOSviewer**Gambar 3.** Density Visualisasi VOSviewer

Sistem penanda DNA berbasis reaksi berantai polimerase (PCR) telah memodernisasi landasan pemuliaan molekuler. Amiteye (2021) telah membahas lanskap penanda molekuler, mulai dari teknik penanda konvensional seperti *Restriction Fragment Length Polymorphism* (RFLP), *Random Amplified Polymorphic DNA* (RAPD), *Amplified Fragment Length Polymorphism* (AFLP), *Simple Sequence Repeats* (SSR), dan *Single Nucleotide Polymorphism* (SNP), hingga penanda yang sedang berkembang seperti *Diversity Arrays Technology* (DArT), penanda berbasis retrotransposon (*Inter-Retrotransposon Amplified Polymorphism*, *Retrotransposon-Microsatellite Amplified Polymorphism*, *Retrotransposon-Based Insertional Polymorphism*), serta pendekatan novel seperti *Penta-primer Amplification Refractory Mutation System*, *Conserved DNA-Derived Polymorphism*, dan *Start Codon Targeted Polymorphism*. penanda berbasis

retrotransposon [Inter-Retrotransposon Amplified Polymorphism, Retrotransposon-microsatellite Amplified Polymorphism, Retrotransposon-based insertional polymorphism], serta strategi yang lebih baru seperti sistem mutasi refraktori amplifikasi Penta-primer, polimorfisme turunan DNA terkonservasi, dan polimorfisme target kodon awal.

Klasifikasi penanda berdasarkan cara pewarisannya (dominasi versus kodominansi), teknologi pengujian (berbasis PCR versus non-PCR), dan tingkat polimorfisme penanda membantu dalam seleksi penanda yang optimal untuk berbagai aplikasi pemuliaan. Pentingnya keragaman dalam sistem penanda terletak pada kemampuannya mengakomodasi berbagai kebutuhan program pemuliaan, mulai dari pemetaan QTL untuk menghasilkan asosiasi penanda-sifat hingga pengendalian/penyaringan variasi genetik yang terdapat dalam koleksi plasma nutfah. Persepsi ini diperkuat oleh penelitian Salgotra dan Chauhan (2023) yang menunjukkan kegunaan perangkat genomik untuk menemukan QTL dan gen baru yang kemudian disilangkan balik atau diseleksi melalui pemuliaan silang balik berbantuan penanda (MAB), sehingga mempercepat introgresi alel yang diinginkan dari donor ke dalam genotipe elit. Kombinasi penanda molekuler dan teknologi sekuensing generasi berikutnya memungkinkan penerapan seleksi genom (GS), yaitu memprediksi nilai genetik dari data penanda genom secara keseluruhan, sehingga memiliki potensi besar untuk mempercepat siklus pemuliaan yang dibutuhkan untuk adaptasi cepat terhadap lingkungan baru.

Penerapan bioteknologi tanaman dalam adaptasi perubahan iklim merupakan kisah transisi luar biasa dari transgenik ke instrumen penyuntingan genom presisi. menjelaskan secara eksplisit bahwa metode bioteknologi tanaman tingkat lanjut, seperti rekayasa genetika dan penyuntingan genom (RG), dapat mencapai perubahan dramatis pada tanaman yang tidak dapat dihasilkan oleh program pemuliaan tradisional dalam jangka waktu yang sepadan dengan urgensi perubahan iklim. Pengenalan dan adaptasi CRISPR-Cas9 dan variannya telah mengubah genetika, sehingga kini memungkinkan untuk menciptakan mutagenesis yang presisi pada gen yang mengendalikan faktor syok panas, gen biosintesis osmolit, dan TF yang terkait dengan toleransi kekeringan dan salinitas. Guo dkk. (2022) menyoroti nilai penyuntingan genom untuk pemuliaan toleransi garam pada tanaman hias, sebuah indikasi bahwa produksi dapat diperluas ke tanah salin untuk konservasi air, atribut yang paling diinginkan dalam pertanian saat kita menghadapi perubahan iklim.

Selain itu, hal ini ditegaskan kembali oleh penelitian Tan dkk. (2022), yang menekankan peran perangkat bioinformatika dalam mengiringi akumulasi informasi biologis secara eksponensial, yang mengarah pada pengurutan genom yang cepat dan berbagai strategi genom yang mendorong penyuntingan genetik presisi. Masukan bioinformatika ke dalam bioteknologi pada gilirannya menciptakan siklus simbiosis, di mana prediksi komputasional menyarankan eksperimen,

tetapi juga menghasilkan data yang digunakan untuk memparameterisasi dan menyempurnakan model prediktif mencapai siklus inovasi yang lebih cepat di mana varietas yang lebih baik dihasilkan.

Pengelolaan sumber daya genetik merupakan dasar yang bersifat sementara namun penting bagi keberlanjutan usaha pemuliaan. Baca selengkapnya "Teori linguistik dan keragaman genetik dalam bahasa-bahasa asli dunia" (2022) menjelaskan bahwa variabilitas genetik dalam varietas benih lokal, ras lokal tradisional, dan kerabat liar spesies budidaya merupakan sumber penting bagi alel-alel baru yang memungkinkan adaptasi terhadap perubahan lingkungan yang tidak dapat diprediksi. Erosi cepat sumber daya ini akibat hilangnya keragaman genetik akibat intensifikasi pertanian dan konversi habitat tidak berkelanjutan, sehingga diperlukan peningkatan upaya konservasi *in situ* dan *ex situ*. Kemajuan terbaru dalam prosedur bioteknologi, termasuk rekayasa molekuler dan pengurutan generasi berikutnya (NGS), sedang mendefinisikan ulang karakterisasi plasma nutfah untuk menangkap aksesi dengan aset alelik intuitif untuk sistem pemuliaan masa depan melalui seluruh profil genotipiknya pada tahap yang lebih awal, dimulai dari pemantauan kontribusi alelik genomik. Kemajuan ini juga dikaji dalam teknologi konservasi seperti kriopreservasi untuk penyimpanan plasma nutfah jangka panjang dan metode kultur *in vitro* untuk konservasi spesies yang terancam punah (Salgotra dan Chauhan, 2023). Salah satu pesan yang muncul dengan jelas dari kedua karya ini adalah bahwa tindakan konservasi tidak boleh dilihat sebagai pemeliharaan pasif, tetapi harus mencakup penggunaan dan eksplorasi aktif melalui program pra-pemuliaan yang secara sistematis menggabungkan sifat-sifat yang berguna dari kerabat liar ke dalam latar belakang kultivar untuk memperluas basis genetik populasi pemuliaan yang sangat terpilih yang mengalami erosi karena tindakan kemacetan genetik.

Kompleksitas risiko produksi tanaman lebih rumit dengan perubahan iklim melalui kombinasi stres, yaitu, beberapa stres yang terjadi secara bersamaan atau berurutan. Rivero et al. (2022) secara kritis membahas masalah ini dan menyoroti bahwa respons tanaman terhadap kombinasi stres bersifat idiosinkratik dan tidak dapat diekstrapolasi dari studi yang melibatkan stresor tunggal. Mereka mengutip contoh seperti gabungan kekeringan dan panas, yang mengaktifkan serangkaian respons molekuler yang berbeda dari stres secara individual, atau banjir yang diperburuk oleh infeksi patogen yang menyebabkan efek merusak yang lebih besar. Salah satu konsekuensi penting dari ini adalah bahwa seleksi untuk toleransi terhadap 1 stres mungkin tidak efektif dalam pengaturan ladang alami dengan beberapa stres yang hidup berdampingan. Rezvi et al. (2023) mengekstrapolasi urgensi ini ke produksi padi, dan memperkirakan bahwa pada tahun 2100 peningkatan CO₂ atmosfer akan mencapai hingga 950 ppm; meningkatkan suhu dalam kisaran

3,5–8°C; (diproyeksikan akan terjadi peningkatan tajam indeks risiko kekeringan nasional pada lahan pertanian, dari angka saat ini 52,45 menjadi nilai katastrofik 129). Dalam kondisi bencana seperti ini, pengembangan genotipe yang toleran terhadap berbagai faktor stres menjadi sangat penting, tidak hanya untuk menopang tanaman padi yang merupakan salah satu tanaman pangan terpenting bagi miliaran orang, tetapi juga untuk meningkatkan produktivitasnya. Metodologi bioteknologi, terutama penyuntingan genom untuk menciptakan alel baru guna menghasilkan respons stres kompleks, tampaknya merupakan cara yang paling menjanjikan untuk mencapai tingkat toleransi terhadap stres kompleks yang diperkirakan akan terjadi akibat perubahan iklim global yang semakin meningkat.

Intervensi teknologi dalam rantai nilai produksi pangan Intervensi teknologi di pertanian Pangan Pangan yang diproduksi oleh organisme hasil rekayasa genetika Produksi pangan berkelanjutan melalui pertanian berkelanjutan Produksi Sistem. Mešić dkk. (2024) mensurvei beberapa teknologi yang ada yang mencakup pertanian presisi (penggunaan sensor dan analisis data untuk mengoptimalkan penggunaan sumber daya yang efisien), hidroponik, akuaponik (yang mengonsumsi hingga 90% lebih sedikit dibandingkan dengan pertanian tradisional), pertanian vertikal (lahan yang digunakan lebih efisien, khususnya dalam konteks perkotaan), dan Pertanian 5.0 (konvergensi AI, IoT, robotika membuat sistem pertanian otomatis. Peningkatan genetik dan inovasi sistem bersifat simbiosis; tanaman yang ditingkatkan secara genetik dengan efisiensi penggunaan nutrisi yang ditingkatkan yang dikembangkan untuk sistem produksi berbasis pertanian presisi menerapkan nutrisi hanya ketika dan di mana mereka menjadi terbatas, sehingga mencapai efisiensi sumber daya yang tidak dapat disampaikan melalui kemajuan teknologi genetik atau lapangan saja. Sistem yang dibangun di sekitar tanaman, serangga, daging kultur, dan mikroalga menghadirkan sumber protein alternatif baru ke dalam campuran produksi pangan yang mengurangi tekanan sistem pertanian hewan yang haus sumber daya sekaligus menurunkan gas rumah kaca untuk membatasi perubahan iklim.

Koherensi kebijakan telah menjadi faktor penting jika terkadang diremehkan dalam mengubah pemahaman ilmiah menjadi implementasi praktis. Zembe dkk. (2023) mengidentifikasi inkonsistensi serius antara kerangka kebijakan seputar ketahanan pangan, adaptasi perubahan iklim, dan ketahanan bencana di Afrika Selatan – meskipun hal ini juga menunjukkan tren global yang lebih luas. Beberapa masalah tersebut meliputi kurangnya tujuan bersama, kurangnya kolaborasi antarlembaga, dan struktur pemantauan yang buruk, yang semuanya berujung pada operasionalisasi yang lemah. Model koherensi merupakan alat penting untuk mencapai tujuan yang selaras, rencana implementasi yang koheren, serta pemantauan dan evaluasi terpadu di seluruh ketahanan pangan,

CCA, dan PRB. Perluasan struktur kebijakan ini melampaui hambatan teknologi, misalnya, perbedaan regulasi antar teknologi (misalnya, pendekatan berbasis produk versus berbasis proses yang memungkinkan adopsi cepat pada tanaman rekayasa genom dan penyerapan yang lambat di Uni Eropa). Kekhawatiran akan persepsi publik yang negatif yang dibentuk oleh ketidaktahuan dan pelaporan anti-GM, juga membayangi penyerapan bahkan di wilayah-wilayah di mana teknologi tersebut paling dibutuhkan untuk mengatasi kerawanan pangan dan malnutrisi.

Wawasan kunci dapat diperoleh dari temuan 10 studi. Pertama, perangkat pemuliaan molekuler kini cukup canggih untuk digunakan sebagai teknik rutin pada berbagai tanaman dan tujuan pemuliaan: seleksi berbantuan penanda, seleksi genom, dan penyuntingan genom. Kedua, efektivitas intervensi bioteknologi akan sangat bergantung pada kualitas dan cakupan platform bioinformatika untuk mengelola data genom skala besar dalam konteks yang kompleks. Ketiga, untuk pemanfaatan sumber daya genetik yang berkelanjutan, perlu dicapai keseimbangan antara konservasi dan program pra-pemuliaan aktif yang mengintegrasikan sifat-sifat adaptif. Perubahan iklim: Pemuliaan untuk toleransi terhadap satu jenis stres sudah ketinggalan zaman, dan kita perlu beralih ke pemuliaan tanaman yang mampu mengatasi berbagai jenis stres di lingkungan nyata. Kelima, realisasi teknologi bergantung pada kebijakan yang bijaksana dan pesan ilmiah yang efektif yang mendorong keterlibatan dan penerimaan masyarakat. Dengan menyatukan perspektif-perspektif ini dalam satu forum terpadu, kami menyadari bahwa mencapai ketahanan pangan di masa depan dengan iklim yang tidak menentu membutuhkan upaya terkoordinasi dalam inovasi teknologi, pengelolaan sumber daya genetik, penyelarasan kebijakan, dan keterlibatan masyarakat. Tantangan lintas sektoral ini bergantung pada keterlibatan berkelanjutan dari sektor sains itu sendiri, para pembuat kebijakan di semua tingkat pemerintahan, dari tingkat global hingga tingkat desa, serta pelaku sektor swasta dan masyarakat sipil, jika kita ingin mewujudkan janji transformasional teknologi biomolekuler untuk pasokan pangan global di masa depan.

KESIMPULAN

Integrasi pemuliaan molekuler dengan bioteknologi tanaman dan konservasi sumber daya genetik telah muncul sebagai pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan ketahanan pangan dan ketahanan terhadap perubahan iklim. Seleksi berbasis penanda, penyuntingan genom menggunakan CRISPR-Cas9, dan seleksi genom juga telah mempercepat pengembangan genotipe tahan multistres secara signifikan. Namun, masih terdapat beberapa hambatan dalam pemanfaatannya, seperti hukum dan regulasi, kurangnya aksesibilitas teknologi, dan rendahnya penerimaan masyarakat, terutama di negara-negara berkembang. Koherensi kebijakan mengenai ketahanan pangan, adaptasi iklim, dan pengurangan risiko bencana sangat penting bagi keberhasilan

penerapan teknologi biomolekuler. Perspektif: Masa depan penelitian ketahanan stres-c di bidang pertanian: mengatasi tantangan dan peluang yang terkait dengan perubahan iklim, transfer teknologi intensifikasi berkelanjutan ke negara berkembang, implementasi perbaikan tanaman di seluruh wilayah dalam kerangka kerja kemitraan. Seiring komunitas internasional membentuk jaringan terpadu dan interdisipliner, kita dapat memanfaatkan perangkat biomolekuler untuk mendukung pertanian berkelanjutan yang memberi makan dan memelihara populasi kita yang terus bertambah dalam menghadapi volatilitas iklim yang semakin meningkat.

REFERENSI

- Amiteye, S. (2021). Basic Concepts And Methodologies Of Dna Marker Systems In Plant Molecular Breeding. *Heliyon*, 7(10), e08093. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08093>
- Badiyal, A., Mahajan, R., Rana, R. S., Sood, R., Walia, A., Rana, T., Manhas, S., & Jayswal, D. K. (2024). Synergizing biotechnology and natural farming: pioneering agricultural sustainability through innovative interventions. *Frontiers in Plant Science*, 15(March), 1–16. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1280846>
- Ćeran, M., Miladinović, D., Đorđević, V., Trkulja, D., Radanović, A., Glogovac, S., & Kondić-Špika, A. (2024). Genomics-assisted speed breeding for crop improvement: present and future. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 8(April). <https://doi.org/10.3389/fsufs.2024.1383302>
- Guo, J., Shan, C., Zhang, Y., Wang, X., Tian, H., Han, G., Zhang, Y., & Wang, B. (2022). Mechanisms of Salt Tolerance and Molecular Breeding of Salt-Tolerant Ornamental Plants. *Frontiers in Plant Science*, 13(April). <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.854116>
- Mešić, A., Jurić, M., Donsì, F., Maslov Bandić, L., & Jurić, S. (2024). Advancing climate resilience: technological innovations in plant-based, alternative and sustainable food production systems. *Discover Sustainability*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00581-z>
- Mucharam, I., Rustiadi, E., Fauzi, A., & Harianto. (2022). Signifikansi Pengembangan Indikator Pertanian Berkelanjutan Untuk Mengevaluasi Kinerja Pembangunan Pertanian Indonesia. *RISALAH KEBIJAKAN PERTANIAN DAN LINGKUNGAN Rumusan Kajian Strategis Bidang Pertanian Dan Lingkungan*, 9(2), 61–81. <https://doi.org/10.29244/jkebijakan.v9i2.28038>
- Munaweera, T. I. K., Jayawardana, N. U., Rajaratnam, R., & Dissanayake, N. (2022). Modern plant biotechnology as a strategy in addressing climate change and attaining food security. *Agriculture and Food Security*, 11(1), 1–28. <https://doi.org/10.1186/s40066-022-00369-2>

- Navarro, B. B., Machado, M. J., & Figueira, A. (2025). Nitrogen Use Efficiency in Agriculture: Integrating Biotechnology, Microbiology, and Novel Delivery Systems for Sustainable Agriculture. *Plants*, 14(19), 2974. <https://doi.org/10.3390/plants14192974>
- Rai, G. K., Khanday, D. M., Kumar, P., Magotra, I., Choudhary, S. M., Kosser, R., Kalunke, R., Giordano, M., Corrado, G., Rouphael, Y., & Pandey, S. (2023). Enhancing Crop Resilience to Drought Stress through CRISPR-Cas9 Genome Editing. *Plants*, 12(12), 1–14. <https://doi.org/10.3390/plants12122306>
- Ranjiith, P., & Francesco, C. (2022). Management and Utilization of Plant Genetic Resources for a Sustainable Agriculture. *Plants*.
- Rezvi, H. U. A., Tahjib-Ul-Arif, M., Azim, M. A., Tumpa, T. A., Tipu, M. M. H., Najnine, F., Dawood, M. F. A., Skalicky, M., & Brestič, M. (2023). Rice and food security: Climate change implications and the future prospects for nutritional security. *Food and Energy Security*, 12(1), 1–17. <https://doi.org/10.1002/fes.3.430>
- Rivero, R. M., Mittler, R., Blumwald, E., & Zandalinas, S. I. (2022). Developing climate-resilient crops: improving plant tolerance to stress combination. *Plant Journal*, 109(2), 373–389. <https://doi.org/10.1111/tpj.15483>
- Salgotra, R. K., & Chauhan, B. S. (2023). Genetic Diversity, Conservation, and Utilization of Plant Genetic Resources. *Genes*, 14(1). <https://doi.org/10.3390/genes14010174>
- Tan, Y. C., Kumar, A. U., Wong, Y. P., & Ling, A. P. K. (2022). Bioinformatics approaches and applications in plant biotechnology. *Journal of Genetic Engineering and Biotechnology*, 20(1), 106. <https://doi.org/10.1186/s43141-022-00394-5>
- Zembe, A., Nemakonde, L. D., & Chipangura, P. (2023). A policy coherence framework for food security, climate change adaptation and disaster risk reduction in South Africa. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 95(October 2022), 103877. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2023.103877>