



Strategi Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim pada Perkebunan Tebu Rakyat di Indonesia: Tinjauan Literatur

Climate Change Mitigation and Adaptation Strategy of Sugarcane Plantations in Indonesia: A Literature Review

Rivandi Pranandita Putra ^{*,1}, Vita Ayu Kusuma Dewi ², Melati Julia Rahma ¹

¹ Departemen Geografi, Fakultas Ilmu Sosial, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia

² Departemen Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Negeri Malang, Malang, Indonesia

*Penulis Korespondensi

Email: rivandi.pranandita.p@fis.um.ac.id

Abstrak. Perubahan iklim menimbulkan berbagai dampak negatif terhadap berbagai aspek kehidupan manusia, salah satunya adalah sektor pertanian. Salah satu jenis tanaman yang terdampak adalah tebu. Tebu merupakan salah satu komoditas strategis di Indonesia. Dalam menghadapi perubahan iklim, petani tebu perlu menerapkan berbagai strategi adaptasi dan mitigasi agar produksi dan produktivitas tebu tidak mengalami penurunan. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi upaya adaptasi dan mitigasi yang dapat diterapkan petani tebu dalam menghadapi perubahan iklim. Penelitian ini berjenis deskriptif kualitatif yang dilakukan melalui metode studi literatur pada bulan November 2024 hingga Januari 2025. Hasil penelitian menunjukkan bahwa ada berbagai strategi adaptasi dan mitigasi yang dapat dilakukan petani tebu dalam menghadapi perubahan iklim. Strategi adaptasi meliputi penyesuaian jadwal tanam, pengembangan varietas tebu toleran, manajemen irigasi, penggunaan mulsa, pengelolaan organisme pengganggu tanaman berkelanjutan, pemanfaatan teknologi modern, dan pemanfaatan artificial intelligence (AI). Beberapa strategi mitigasi meliputi praktik konservasi tanah, pelatihan dan edukasi, serta pemanfaatan AI. Implementasi berbagai strategi adaptasi dan mitigasi tersebut diharapkan dapat membantu petani tebu untuk meminimalkan dampak negatif perubahan iklim terhadap tebu serta menjaga keberlanjutan produksi tebu. Hal ini juga penting untuk memastikan budidaya tebu tetap memberikan keuntungan bagi para petani tebu walaupun pada kondisi iklim yang berubah.

Kata kunci: perubahan iklim, adaptasi, mitigasi, tebu.

Abstract. Climate change has significant adverse effects on multiple aspects of human life, particularly the agricultural sector. Sugarcane, a strategic commodity in Indonesia, is among the crops vulnerable to these impacts. To sustain production and productivity, sugarcane farmers must adopt adaptation and mitigation strategies. This study aims to identify feasible adaptation and mitigation measures for sugarcane farmers confronting climate change. Employing a qualitative descriptive approach, the research was conducted through a literature review from November 2024 to January 2025. The findings reveal several adaptation strategies, including adjusted planting schedules, cultivation of climate-tolerant sugarcane varieties, optimised irrigation management, mulching, sustainable pest and disease control, adoption of modern technologies, and artificial intelligence (AI) applications. Key mitigation strategies involve soil conservation practices, farmer training and education, and AI utilisation. Implementing these strategies is

expected to help sugarcane farmers mitigate the negative impacts of climate change, safeguard productivity, and ensure the long-term sustainability of sugarcane cultivation. Such efforts are critical to maintaining the economic viability of sugar cane farming under shifting climatic conditions.

Keywords: *climate change, adaptation, mitigation, sugarcane.*

1. Pendahuluan

Tebu (*Saccharum officinarum* L.) merupakan salah satu jenis tanaman industri penting di dunia, yaitu sebagai penghasil gula, bioenergi, dan berbagai produk lainnya. Kebutuhan gula berbasis tebu di Indonesia terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun, baik untuk gula konsumsi langsung maupun untuk kebutuhan bahan baku industri makanan dan minuman (Putra *et al.*, 2020; Putra *et al.*, 2024c). Pemerintah Indonesia menargetkan produksi gula domestik sedikitnya sebanyak 2,9 juta ton untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga (Sulaiman *et al.*, 2019). Tebu juga berperan penting bagi perekonomian nasional, yaitu melalui penyediaan lapangan kerja yang luas bagi masyarakat Indonesia (Putra *et al.*, 2021c).

Perubahan iklim memengaruhi berbagai aspek kehidupan manusia, salah satunya adalah bidang pertanian dan perkebunan (Febriandika & Rahayu, 2021). Perubahan iklim berpengaruh terhadap produksi pangan global dan produktivitas pertanian, baik pengaruh langsung maupun tidak langsung (Zhu *et al.*, 2022). Perubahan iklim menimbulkan berbagai cekaman abiotik dan biotik yang pada akhirnya dapat mengancam produksi pertanian dan keamanan pangan global (Arifien *et al.*, 2022). Hal ini penting untuk diperhatikan karena ketahanan pangan merupakan salah satu isu strategis dalam mewujudkan pembangunan berkelanjutan (Faizah *et al.*, 2024).

Tebu merupakan salah satu komoditas yang rentan mengalami penurunan produktivitas akibat perubahan iklim (Putra *et al.*, 2021a; Kumar *et al.*, 2023). Emisi gas rumah kaca secara masif berakibat pada peningkatan suhu udara global dari waktu ke waktu, perubahan pola hujan, dan hingga cuaca ekstrem (Hussain *et al.*, 2018). Peristiwa yang berhubungan dengan cuaca dan iklim merupakan faktor kunci bagi produksi tebu di seluruh dunia, terutama di banyak negara berkembang. Pengaruh perubahan iklim terhadap produktivitas tebu lebih besar terutama di negara berkembang yang memiliki tingkat adaptasi dan mitigasi yang masih rendah (Putra *et al.*, 2020).

Produksi dan produktivitas tebu tidak hanya bergantung pada faktor genotipe (varietas) dan praktik manajemen budidaya tanaman, namun juga berkaitan dengan lingkungan biotik dan abiotiknya yang dapat terpengaruh oleh perubahan iklim (Zhao & Li, 2015; Putra *et al.*, 2024d). Oleh karena itu, faktor iklim juga perlu untuk diperhatikan untuk meminimalkan dampak negatif terhadap pertumbuhan dan produksi tebu. Dalam konteks ini, dinamika iklim global seperti peningkatan suhu rata-rata, perubahan pola curah hujan, dan frekuensi kejadian iklim ekstrem seperti kekeringan dan banjir dapat berdampak langsung maupun tidak langsung terhadap sistem

pertanian. Dampak tersebut mencakup perubahan pada fisiologi tanaman tebu, ketersediaan air tanah, serta keberlangsungan organisme pendukung dan pengganggu dalam ekosistem pertanian.

Untuk mengurangi dampak negatif dan meningkatkan ketahanan produksi gula di Indonesia, dibutuhkan strategi adaptasi dan mitigasi perubahan iklim untuk diterapkan oleh para pembudidaya tebu, terutama tebu rakyat. Produsen terbesar tebu di Indonesia adalah tebu rakyat, dan 80% di antaranya ditanam di lahan tadah hujan (Widyasari *et al.*, 2022). Adaptasi merujuk pada usaha penyesuaian diri dengan dampak perubahan iklim yang terjadi atau diprediksi supaya dapat terus berproduksi secara efisien, sedangkan mitigasi merupakan usaha untuk mengurangi emisi gas rumah kaca untuk mengurangi dampak perubahan iklim (Abbass *et al.*, 2022). Dengan demikian, baik produksi, produktivitas, maupun rendemen tebu akan tetap dipertahankan dalam kondisi yang baik dan bahkan ditingkatkan meskipun dibudidayakan pada kondisi iklim yang tidak menentu.

Penelitian ini merupakan studi literatur yang bertujuan mengidentifikasi berbagai strategi adaptasi dan mitigasi perubahan iklim yang relevan dan dapat diterapkan oleh petani tebu di Indonesia. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan landasan ilmiah sekaligus panduan praktis bagi para petani untuk memilih langkah-langkah yang paling sesuai dengan kondisi agroekologis dan sosial-ekonomi setempat. Strategi-strategi yang teridentifikasi tidak hanya membantu petani dalam mempertahankan produktivitas dan keberlanjutan usahatani tebu di tengah ketidakpastian iklim, tetapi juga berkontribusi dalam upaya mengurangi emisi gas rumah kaca dari sektor pertanian. Selain itu, temuan dari kajian ini berpotensi mendukung penyusunan kebijakan yang lebih responsif terhadap perubahan iklim, serta mendorong penguatan kapasitas adaptif petani melalui edukasi, inovasi teknologi, dan kolaborasi multi-pihak. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya penting secara akademik, tetapi juga memiliki nilai aplikatif yang tinggi dalam memperkuat ketahanan sistem pertanian tebu rakyat secara berkelanjutan.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kualitatif yang menggunakan metode kepustakaan atau *literature review*. Tinjauan pustaka merupakan pendekatan yang dilakukan secara sistematis atau semi-sistematis untuk menghimpun dan merangkum temuan-temuan dari penelitian terdahulu (Snyder, 2019). Pelaksanaan penelitian yaitu pada bulan November 2024 hingga Januari 2025. Literatur yang digunakan berupa artikel jurnal ilmiah, buku, dan *website* yang relevan dengan topik yang diulas dalam artikel ini, yakni strategi mitigasi dan adaptasi perubahan iklim pada perkebunan tebu di Indonesia. *Database* yang digunakan dalam pencarian literatur, antara lain Web of Science, Scopus, SINTA, Garuda, serta Google Scholar. Literatur

yang digunakan adalah terbitan maksimal 10 tahun terakhir. Total literatur yang digunakan adalah 103, di antaranya 89 artikel jurnal, 3 artikel prosiding ilmiah, dan 11 buku.

Melalui metode yang digunakan, diharapkan dapat diperoleh gambaran mengenai berbagai kemungkinan solusi yang relevan untuk memecahkan masalah, melalui proses pengumpulan dan klasifikasi data, analisis, serta interpretasi. Setelah data terkumpul, dilakukan klasifikasi berdasarkan fokus strategi (adaptasi, mitigasi, atau keduanya), dimensi pembahasan (agronomi, sosial-ekonomi, kelembagaan, teknologi), serta relevansi geografis dan jenis dokumen. Data yang telah diklasifikasikan kemudian dianalisis secara tematik untuk mengidentifikasi pola, tren, dan praktik-praktik yang relevan. Hasil analisis selanjutnya diinterpretasikan guna merumuskan pemahaman yang utuh dan solusi yang aplikatif terhadap permasalahan yang dikaji. Selanjutnya, dilakukan penyusunan narasi yang kemudian dikembangkan menjadi artikel.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Dampak perubahan iklim terhadap tebu

3.1.1. Pengaruh umum perubahan iklim terhadap pertumbuhan tebu

Perubahan iklim merupakan kondisi beberapa unsur iklim yang mengalami penyimpangan atau perubahan intensitas dari kondisi rata-rata ([Rejekiningrum, 2014](#)). Beberapa penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa perubahan iklim sebenarnya membawa dampak positif melalui peningkatan kadar karbon dioksida (CO₂) dan suhu udara global yang dapat memacu pertumbuhan dan akumulasi biomassa pada tebu ([Marin et al., 2013](#)). Namun, perubahan iklim lebih banyak membawa dampak negatif terhadap pertumbuhan dan produktivitas tebu karena peningkatan frekuensi dan intensitas cuaca ekstrem, seperti kekeringan, banjir, dan suhu udara yang terlalu tinggi ([Chandiposha, 2013](#)).

Perubahan iklim secara langsung memengaruhi pergeseran pola musim, yang menyulitkan petani dalam menentukan waktu tanam dan panen secara tepat. Kondisi cuaca yang tidak menentu, seperti hujan yang datang di luar musim, kekeringan berkepanjangan, serta fluktuasi suhu ekstrem, memperbesar risiko kegagalan panen dan menurunkan stabilitas hasil produksi. Ketidakpastian iklim ini menjadi tantangan besar bagi industri gula di Indonesia karena dapat mengganggu jadwal budidaya, merusak tanaman, serta membatasi ketersediaan sumber daya penting seperti air irigasi ([Toharisman & Triantarti 2016](#)).

3.1.2. Tantangan budidaya tebu di lahan kering dan perubahan ketersediaan lahan produktif

Tebu di Indonesia umumnya dibudidayakan di lahan kering tadah hujan sehingga pertumbuhan dan perkembangannya bergantung pada hujan ([Riajaya, 2020](#)). Dalam beberapa dasawarsa terakhir, penanaman tebu bergeser dari lahan sawah ke lahan tegalan (kering) karena

lahan subur dengan pengairan diutamakan untuk tanaman pangan lainnya yang dianggap petani lebih menguntungkan secara ekonomi, misalnya padi. Lahan sawah juga banyak berubah peruntukannya menjadi bangunan (Ramadhan *et al.*, 2014). Curah hujan yang mencukupi sangat penting untuk mendapatkan produktivitas tebu yang tinggi (Ranomahera *et al.*, 2020a). Perubahan iklim mengancam keberlanjutan sebagian besar sistem pertanian tebu tadah hujan (Knox *et al.*, 2010). Perubahan iklim memengaruhi panjang periode kering dan basah tahunan (Loo *et al.*, 2015). Perubahan iklim juga dapat memengaruhi sebaran curah hujan menjadi tidak merata di berbagai wilayah (Soleh *et al.*, 2017), di mana ada sebagian wilayah yang dilanda kekeringan namun ada pula yang justru mengalami banjir pada waktu yang bersamaan.

Kekeringan merupakan cekaman abiotik terbesar yang memengaruhi produktivitas tanaman. Tebu sensitif terhadap kekurangan air, di mana kekeringan dapat berakibat pada penurunan tanaman lebih dari 60% (Gentile *et al.*, 2015). Perubahan iklim dapat meningkatkan kejadian kekeringan, defisit air, desertifikasi, dan evapotranspirasi, dan pada akhirnya dapat menurunkan potensi hasil tanaman dan area tanam untuk pertanian (Onyeneke *et al.*, 2019). Dalam konteks ini, peningkatan evapotranspirasi menjadi salah satu konsekuensi penting dari naiknya suhu akibat perubahan iklim. Evapotranspirasi, meskipun merupakan proses alami dalam pertumbuhan tanaman, dapat berdampak negatif jika terjadi secara berlebihan. Ketika suhu lingkungan meningkat, laju penguapan dari permukaan tanah dan transpirasi dari daun menjadi lebih tinggi, sehingga mempercepat hilangnya cadangan air yang esensial bagi tanaman (Dai *et al.*, 2022). Ketidakseimbangan antara kehilangan dan penyerapan air ini menimbulkan stres fisiologis yang menghambat proses fotosintesis, pertumbuhan, dan hasil panen (Terán *et al.*, 2024). Dengan demikian, peningkatan evapotranspirasi dalam iklim yang semakin panas berperan besar dalam memperparah dampak kekeringan dan mempersempit ruang produksi pertanian yang layak.

3.1.3. Respon fisiologis tebu terhadap kekeringan

Pada tanaman tebu, dampak kekeringan akibat perubahan iklim bergantung pada tahap pertumbuhan tanaman, derajat cekaman defisit air, dan durasi kekeringan tersebut. Secara umum, kekeringan pada tahap awal dan pertengahan pertumbuhan terutama menurunkan hasil tebu sehingga menyebabkan rendahnya hasil sukrosa, meskipun sebetulnya kekeringan sedang pada tahap pertumbuhan akhir justru dapat meningkatkan kandungan sukrosa dalam batang tebu (Zhao & Li, 2015). Masa perkecambahan hingga pertunasan (usia tiga bulan setelah tanam) merupakan fase kritis pada budidaya tanaman tebu karena kondisi tanaman masih lemah dan memerlukan air yang cukup (Putra, 2020).

Selain kekeringan, salinitas juga termasuk cekaman abiotik terbesar bagi tebu. Baik kekeringan maupun salinitas akan memengaruhi sifat morfologi dan fisiologis serta aktivitas

enzim yang pada akhirnya dapat menurunkan produktivitas tanaman. Gejala pertama yang dapat diamati dari tebu yang mengalami kekeringan dan salinitas adalah perubahan morfologis, seperti daun yang menggulung, ukuran dan jumlah daun yang berkurang, perubahan pertumbuhan akar, serta pertumbuhan yang terhambat. Tebu memiliki mekanisme alami untuk menghadapi kondisi cekaman tersebut, seperti mekanisme *escape*, *avoidance*, toleransi, dan kombinasi antara ketiganya (Kumar *et al.*, 2023).

3.1.4. Hubungan perubahan iklim dengan serangan OPT

Perubahan iklim juga dapat berdampak signifikan terhadap cekaman biotik berupa serangan organisme pengganggu tanaman (OPT) pada tebu, termasuk hama, patogen, dan gulma. Peningkatan fluktuasi suhu dan kelembapan udara akibat perubahan iklim berakibat pada pertumbuhan dan perkembangan organisme pengganggu tanaman. Industri gula dunia menghadapi ancaman perubahan suhu dan pola cuaca akibat perubahan iklim yang memperkuat dampak serangan OPT (Bordonal *et al.*, 2018; Sorvali *et al.*, 2021). Tidak hanya tebu, perubahan iklim juga sebetulnya membuat berbagai jenis tanaman menjadi rentan terhadap serangan OPT dan menjadi kurang bisa bersaing dengan gulma (Patterson, 1995). Perubahan iklim meningkatkan suhu dan kelembapan udara global yang dapat mempercepat siklus hidup OPT sehingga memengaruhi perkembangan OPT dan meningkatkan frekuensi serangan pada tebu. Perubahan iklim juga berakibat pada perubahan pola curah hujan yang dapat menciptakan kondisi lingkungan yang lebih kondusif bagi perkembangan populasi OPT tebu (Msomba *et al.*, 2024).

Berbagai upaya tentunya perlu untuk dilakukan dalam rangka meningkatkan hasil dan keuntungan dari usahatani tebu meskipun terjadi perubahan iklim (Zhao & Li, 2015). Strategi adaptasi yang dapat dilakukan mencakup penyesuaian jadwal tanam, pengembangan varietas tahan cekaman, manajemen irigasi yang efisien, penggunaan mulsa, pengendalian organisme pengganggu tanaman secara berkelanjutan, serta pemanfaatan teknologi modern dan kecerdasan artifisial (AI). Sementara itu, upaya mitigasi difokuskan pada pengurangan emisi gas rumah kaca melalui praktik konservasi tanah, pemanfaatan limbah pertanian, edukasi kepada petani tentang pertanian berkelanjutan, dan penerapan AI untuk pengelolaan input secara presisi. Gabungan dari kedua pendekatan tersebut menunjukkan pentingnya dukungan lintas sektor agar budidaya tebu rakyat tetap produktif, efisien, dan berkelanjutan di tengah ancaman perubahan iklim yang semakin kompleks.

3.2. Strategi adaptasi

Dalam menghadapi kondisi iklim yang berubah, manusia tentunya harus dapat beradaptasi dengan hal tersebut. Adaptasi merupakan upaya yang dilakukan untuk meningkatkan kemampuan manusia dan komunitas dalam menghadapi perubahan iklim (Abbass *et al.*, 2022; Goonesekera *et*

al., 2022; Orlove, 2022; Schoenefeld *et al.*, 2022; Singh *et al.*, 2022). Adaptasi bertujuan untuk mengurangi kerentanan dan/atau memanfaatkan peluang dari perubahan iklim yang terjadi saat ini atau di masa depan (Orlove, 2022). Dalam konteks budidaya tebu, beberapa strategi adaptasi yang dapat dilakukan oleh petani tebu, antara lain penyesuaian jadwal tanam, pengembangan varietas tebu toleran, manajemen irigasi, penggunaan mulsa, penggunaan organisme pengganggu tanaman berkelanjutan, pemanfaatan teknologi modern, serta pemanfaatan *artificial intelligence* (AI).

3.2.1. Penyesuaian jadwal tanam

Perubahan iklim yang terjadi menyebabkan pola curah hujan menjadi tidak menentu dan hal ini berpengaruh terhadap musim tanam (Hartatie *et al.*, 2020). Petani tebu di Indonesia umumnya menerapkan pola tanam II atau B, yaitu pola tanam yang dimulai ketika awal musim hujan tiba, yaitu pada sekitar bulan Oktober-November. Banyak petani tebu menerapkan pola tanam ini karena masih banyak lahan tebu di Indonesia yang merupakan tadah hujan dan tanpa irigasi. Namun dengan adanya perubahan iklim, jadwal musim penghujan bisa jadi akan berubah sehingga petani tebu mungkin tidak dapat bergantung sepenuhnya pada pola tanam tersebut dan perlu menyesuaikan rencana penanaman mereka.

Jadwal tanam tebu perlu disesuaikan dengan pola curah hujan dan suhu udara yang berubah supaya tebu dapat tumbuh dengan optimal dan lebih tahan terhadap cekaman lingkungan. Melalui penerapan strategi penyesuaian jadwal tanam yang tepat, petani tebu dapat mengurangi risiko dan kerugian akibat perubahan iklim serta meningkatkan produktivitas dan ketahanan tanaman tebu (Acevedo *et al.*, 2020).

3.2.2. Pengembangan varietas tebu toleran

Pengembangan varietas tebu toleran dapat menjadi strategi adaptasi perubahan iklim dan juga sekaligus sebagai upaya pencegahan kerugian oleh petani tebu. Uji coba varietas tebu baru yang toleran atau tahan terhadap perubahan iklim dan memiliki potensi hasil yang baik perlu untuk terus dilakukan. Pengembangan varietas unggul baru yang toleran atau tahan terhadap cekaman lingkungan terutama kekeringan menjadi salah satu langkah penting dalam budidaya tebu (Sari *et al.*, 2021).

Para ilmuwan dan ahli bioteknologi tanaman memiliki peran penting dalam menghadapi dampak perubahan iklim melalui penerapan teknologi bioteknologi untuk merakit varietas tebu unggul. Bioteknologi memungkinkan pemuliaan tanaman secara lebih terarah dan efisien, khususnya dalam menghasilkan varietas yang toleran atau tahan terhadap cekaman abiotik maupun biotik (Hussain *et al.*, 2018). Cekaman abiotik, seperti kekeringan yang berkepanjangan, banjir yang merendam lahan, dan peningkatan kadar salinitas tanah di daerah pesisir, dapat menyebabkan penurunan produktivitas tebu secara signifikan. Sementara itu, cekaman biotik seperti misalnya

serangan hama seperti penggerek batang (*Scirpophaga excerptalis*) dan patogen seperti jamur penyebab karat daun (*Puccinia melanocephala*) pada tebu cenderung meningkat seiring dengan perubahan suhu dan kelembapan akibat perubahan iklim.

Melalui teknik seperti seleksi berbasis penanda genetik dan rekayasa gen, varietas tebu yang memiliki ketahanan terhadap kondisi ekstrem ini dapat dikembangkan dan diujicobakan di berbagai agroekosistem. Sebagai contoh, beberapa varietas tebu hasil pengembangan di Brasil telah menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap kekeringan dan infeksi jamur dibandingkan varietas lokal. Upaya semacam ini juga relevan untuk diterapkan di Indonesia, terutama pada perkebunan tebu rakyat yang rentan terhadap dampak perubahan iklim namun memiliki keterbatasan dalam penggunaan teknologi konvensional.

Bioteknologi dan pemuliaan tanaman molekuler menjadi sangat berguna untuk meningkatkan produktivitas tebu pada kondisi kekurangan air (Hu & Xiong, 2014). Pengembangan varietas tebu yang toleran atau tahan terhadap perubahan iklim melalui bioteknologi dapat membantu petani dalam menghadapi tantangan perubahan iklim yang semakin kompleks. Perkembangan keilmuan yang pesat dalam bidang genetika molekuler dan genomika saat ini dapat digunakan untuk mengidentifikasi varian genetik baru yang terkait dengan ketahanan terhadap perubahan iklim pada tebu sehingga pengembangan varietas tebu baru dengan sifat-sifat yang diinginkan dapat dilakukan (Meena *et al.*, 2022).

Beberapa metode bioteknologi yang dapat digunakan dalam mengembangkan varietas tebu yang toleran terhadap perubahan iklim, antara lain: 1) pemuliaan konvensional yang bertumpu pada ketersediaan gen toleransi; 2) penggunaan teknik molekuler; dan 3) pemanfaatan teknik transformasi genetik. Metode pemuliaan konvensional melibatkan pemilihan varietas tebu yang memiliki gen-gen tertentu yang menyebabkan ketahanan terhadap cekaman lingkungan tertentu, misalnya kekeringan, suhu tinggi, atau serangan OPT, yang pada umumnya terjadi akibat perubahan iklim. Penggunaan teknik molekuler seperti *marker-assisted selection* (MAS) dapat digunakan untuk mengidentifikasi dan mempercepat seleksi gen-gen yang terlibat dalam ketahanan terhadap cekaman lingkungan pada tebu. Hal ini memungkinkan para pemulia tanaman dan ahli bioteknologi tanaman untuk merakit varietas tebu dengan karakteristik yang diinginkan secara lebih efisien (Sandhu *et al.*, 2022). Sementara itu, pemanfaatan teknik transformasi genetik dapat dilakukan untuk memasukkan gen-gen yang bertanggungjawab atas ketahanan terhadap cekaman lingkungan ke dalam genom tanaman (Hamdan & Tan, 2024). Melalui cara ini, varietas tebu baru yang toleran atau tahan terhadap perubahan iklim dapat dikembangkan dengan cepat. Melalui pendekatan bioteknologi, berbagai varietas tebu baru yang lebih adaptif terhadap berbagai cekaman akibat perubahan iklim dapat terus dikembangkan (Grandis *et al.*, 2024). Meskipun

demikian, pengembangan tersebut harus tetap memperhatikan aspek regulasi dan keamanan pangan.

3.2.3. Manajemen irigasi

Seperti yang telah disebutkan sebelumnya, mayoritas lahan budidaya tebu di Indonesia berupa lahan tadah hujan. Pola tanam II atau pola tanam B yang memulai penanaman tebu ketika awal musim hujan seringkali menjadi solusi praktis di kalangan petani tebu. Namun perubahan iklim dapat menyebabkan curah hujan menjadi tidak menentu. Dengan demikian, irigasi perlu diberikan ketika curah hujan tidak dapat memenuhi kebutuhan air tanaman tebu ([Ranomahera et al., 2020b](#)). Irigasi bertujuan untuk mengisi kembali profil tanah antara kapasitas lapang dan titik layu permanen. Irigasi menjadi hal yang sangat penting untuk dilakukan terutama pada lahan kering mengingat defisit air merupakan faktor pembatas utama produktivitas tebu. Di Brasil, defisit air menyebabkan penurunan potensi hasil tebu hingga 48-86% ([Monteiro & Sentelhas 2017; Dias & Sentelhas 2018](#)).

Strategi manajemen irigasi sebagai upaya adaptasi budidaya tebu terhadap perubahan iklim merupakan hal krusial, mengingat perubahan iklim dapat menyebabkan variasi dalam pola curah hujan, suhu, dan ketersediaan air. Perubahan iklim menyebabkan pola curah hujan menjadi tidak teratur dan suhu udara cenderung meningkat yang pada akhirnya dapat mengakibatkan kekeringan dan kekurangan air pada tanah. Perubahan iklim dapat merugikan pertumbuhan dan hasil tebu tanpa adanya manajemen irigasi yang memadai. Manajemen irigasi yang baik harus dikembangkan untuk memaksimalkan efisiensi penggunaan air sekaligus mengurangi biaya operasional dalam usahatani tebu. Efisiensi penggunaan air irigasi juga merupakan salah satu pilar dalam konsep pertanian cerdas iklim ([Azmi et al., 2022](#)).

Manajemen irigasi memiliki makna yang luas, di antaranya penentuan jumlah air untuk diaplikasikan sesuai kebutuhan tanaman, pemilihan sistem irigasi yang tepat, dan penentuan waktu irigasi yang optimal ([Olamide et al., 2022](#)). Hal ini dilakukan dalam rangka mengoptimalkan penggunaan air agar tebu tetap mendapatkan pasokan air yang cukup, terutama ketika musim kering atau saat curah hujan tidak stabil. Idealnya, pengelolaan air yang baik dan jaminan ketersediaan air pada setiap fase pertumbuhan tebu akan berkontribusi signifikan terhadap produktivitas dan rendemen tebu. Namun pada kondisi ketika air tidak selalu tersedia sepanjang waktu, manajemen irigasi pada tebu dapat dilakukan berdasarkan kebutuhan air tanaman ([Yusara et al., 2019](#)).

Selama ini, banyak petani tebu yang mengaplikasikan air irigasi ke kebun dalam jumlah berlebihan melebihi kebutuhan tanaman. Padahal, kebutuhan air irigasi merupakan volume air yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan air untuk tanaman dan mengganti kehilangan air

akibat evapotranspirasi (Sosrodarsono & Takeda, 2003). Penerapan sistem irigasi yang efisien seperti *sprinkler*, tetes, atau mikro dapat membantu meminimalkan penggunaan air, evaporasi, dan energi yang diperlukan dalam penyiraman tanaman, serta memastikan air dapat mencapai akar tanaman secara langsung. Pemilihan waktu irigasi yang optimal berarti menentukan waktu yang tepat untuk melakukan irigasi berdasarkan analisis cuaca dan kebutuhan tanaman supaya tidak terjadi pemborosan air (Dong, 2022).

Sistem irigasi saat ini telah mengalami kemajuan pesat seiring perkembangan teknologi, termasuk penerapan irigasi otomatis yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi penggunaan air dalam sektor pertanian. Teknologi ini memberikan manfaat bagi petani tebu, terutama di wilayah yang rawan mengalami kekeringan atau banjir, karena dapat menyesuaikan volume dan waktu pemberian air secara presisi (Ali *et al.*, 2025). Sensor tanah dan alat pendeteksi kelembapan berbasis *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pemantauan kondisi tanah secara *real-time*, sehingga kebutuhan air tanaman dapat dipenuhi secara optimal (Azam *et al.*, 2023). Melalui data yang diperoleh dari sensor, sistem irigasi dapat dikendalikan secara otomatis untuk menghindari kelebihan atau kekurangan air yang dapat mengganggu pertumbuhan tebu. Selain meningkatkan efisiensi sumber daya, penerapan teknologi ini juga berkontribusi pada pengurangan risiko gagal panen akibat stres air. Oleh karena itu, integrasi teknologi pintar dalam sistem irigasi menjadi strategi adaptasi penting dalam menghadapi perubahan iklim dan mendukung keberlanjutan produksi tebu.

Selain penggunaan sistem irigasi yang efisien, pemantauan dan pengelolaan sumber air juga perlu dilakukan. Sumber air pada lahan tebu umumnya berupa embung, waduk, sungai, dan air tanah. Pemantauan sumber air dapat dibantu dengan teknologi untuk memantau kondisi cuaca, ketersediaan air, dan kebutuhan air tanaman. Jika diperlukan, pemerintah atau pabrik gula baik swasta maupun PT Perkebunan Nusantara (PTPN) dapat pula mempertimbangkan untuk berinvestasi membangun embung atau waduk baru yang dapat membantu mengurangi risiko kekeringan saat musim kemarau sekaligus mengurangi risiko banjir saat musim hujan. Pembangunan embung atau waduk baru juga dapat mendukung keberlanjutan sistem irigasi ke depannya.

Irigasi pada lahan tebu tidak harus selalu mengandalkan air bersih. Penggunaan sumber air alternatif, misalnya pemanfaatan vinase yang telah diolah (Dewi *et al.*, 2022a; Putra *et al.*, 2024b) atau jenis limbah lainnya untuk irigasi ke perkebunan tebu, juga dapat dilakukan untuk mengurangi ketergantungan pada sumber air utama. Beberapa jenis limbah yang telah terolah umumnya mengandung berbagai macam mineral dan unsur hara yang dibutuhkan oleh tanaman.

3.2.4. Penggunaan mulsa

Mulsa merupakan penutup tanah yang digunakan di berbagai lahan pertanian dan dapat berasal dari bahan organik atau anorganik. Pengaplikasian mulsa organik atau anorganik untuk mempertahankan kelembapan tanah, mengurangi penguapan, dan meningkatkan kesuburan tanah. Mulsa dapat mengurangi kehilangan air akibat evaporasi dari permukaan tanah. Dengan mengurangi kadar air yang hilang, tanaman tebu dapat mendapatkan kelembapan yang lebih baik, terutama di musim kering. Mulsa juga membantu menjaga suhu tanah tetap stabil. Di daerah panas, mulsa dapat menurunkan suhu tanah, sementara di daerah dingin, mulsa dapat menjaga suhu agar tetap hangat. Beberapa jenis mulsa, seperti sisa tanaman, dapat terurai dan memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kesuburan tanah seiring dengan berjalannya waktu. Mulsa juga berperan mengurangi pertumbuhan gulma. Dengan menutup permukaan tanah, mulsa dapat menghambat pertumbuhan gulma yang bersaing dengan tanaman tebu untuk mendapatkan air dan nutrisi (Iqbal *et al.*, 2020).

Dengan menerapkan mulsa dalam budidaya tanaman, para petani dapat meningkatkan ketahanan tanaman terhadap perubahan iklim dengan mencegah kehilangan air tanah dan menjaga suhu dan kelembapan tanah agar tetap stabil (Cahyo, 2013). Demikian pula pada lahan tebu, di mana mulsa memainkan peran penting untuk menekan kehilangan air yang cepat dari tanaman maupun dari permukaan tanah. Hal ini menjadi langkah penting dalam menghadapi tantangan yang ditimbulkan oleh perubahan iklim dan untuk memastikan keberlanjutan produksi tebu.

Serasah tebu dapat dimanfaatkan sebagai mulsa alami di perkebunan tebu. Hal ini disebut sebagai *trash blanket*. *Trash blanket* dapat dilakukan baik pada tanaman tebu baru maupun keprasan. Serasah tebu dapat dikumpulkan dan dibiarkan di juring tanaman atau dicacah kecil dengan alat mekanis atau secara manual. Secara mekanis, proses pencacahan dapat dibantu dengan alat mesin pemotong, seperti bajak rotari atau penghancur residu. Secara manual, proses pencacahan dapat dilakukan dengan menggunakan alat sederhana seperti parang dan alat pencacah lainnya. Berbagai studi sebelumnya telah mengemukakan berbagai manfaat dari implementasi *trash blanket* di perkebunan tebu, antara lain meningkatkan populasi makrofauna dan mikrofauna tanah, menekan pertumbuhan gulma, mengurangi evapotranspirasi tanah, dan menjaga kadar air tanah yang pada akhirnya dapat meningkatkan produktivitas tebu (Putra *et al.*, 2021b).

3.2.5. Pengelolaan organisme pengganggu tanaman (OPT) berkelanjutan

Perubahan iklim dapat berakibat pada peningkatan jumlah OPT di perkebunan tebu, misalnya suhu yang lebih hangat meningkatkan perkembangbiakan OPT. Perubahan iklim juga mendorong terjadinya invasi spesies OPT dari suatu wilayah ke wilayah lainnya dengan kemampuan penyebaran yang tinggi, pertumbuhan yang cepat, dan toleran terhadap kondisi

lingkungan sehingga dibutuhkan upaya adaptasi dan mitigasi untuk mengatasi hal tersebut (Diyasti & Amalia, 2021). Menurut Nurindah and Yulianti (2018), perubahan iklim mengharuskan para petani tebu untuk menerapkan strategi adaptasi maupun mitigasi baru dalam pengelolaan OPT agar produksinya dapat optimal dan berkelanjutan.

Dalam menghadapi perubahan iklim, diperlukan pengelolaan OPT pada budidaya tebu dengan strategi yang kuat (Msomba *et al.*, 2024). Pengelolaan OPT secara berkelanjutan berperan penting untuk menjaga produktivitas tebu di tengah perubahan iklim. Beberapa strategi yang dapat dilakukan untuk mengelola OPT secara berkelanjutan, antara lain: 1) penggunaan pestisida alami, 2) pengendalian biologis, 3) rotasi tanaman, dan 4) penggunaan varietas tahan. Penggunaan pestisida alami dapat menjadi alternatif untuk mengurangi penggunaan pestisida kimia dan memanfaatkan material alami yang ada di sekitar (Afrianto *et al.*, 2022a). Pengendalian biologis dilakukan melalui pemanfaatan predator alami atau parasitoid untuk mengendalikan populasi hama pada tebu. Contoh musuh alami yang dapat digunakan yaitu predator serangga, parasitoid, atau jamur entomopatogen (Subiyakto, 2016). Rotasi tanaman merupakan pergiliran tebu dengan jenis tanaman lain yang tidak rentan terhadap OPT tertentu. Hal ini bertujuan untuk memutus siklus hidup OPT pada tebu (Jaworski *et al.*, 2023). Sementara itu, penggunaan varietas tahan juga dapat dilakukan, yaitu varietas tebu yang memiliki ketahanan terhadap serangan OPT tertentu. Varietas tahan juga memiliki keunggulan yang lainnya, yakni cenderung lebih adaptif terhadap kondisi lingkungan yang berubah akibat perubahan iklim.

Melalui penerapan berbagai strategi di atas, petani tebu dapat meningkatkan produktivitas tebu di perkebunan tebu mereka. Hal ini juga sekaligus bertujuan untuk menjaga kelestarian lingkungan dalam rangka menghadapi tantangan perubahan iklim dengan lebih baik.

3.2.6. Pemanfaatan teknologi modern

Strategi adaptasi lain yang dapat dilakukan adalah pemanfaatan teknologi modern. Upaya adaptasi seringkali melibatkan teknologi inovatif (Hanani *et al.*, 2024). Pemanfaatan berbagai teknologi modern dapat membantu petani tebu dalam merencanakan dan menentukan tindakan yang tepat dalam menghadapi perubahan iklim. Beberapa contoh teknologi yang dapat digunakan adalah penggunaan sensor tanah, *drone*, dan sistem informasi geografis (SIG) untuk memantau kondisi tanaman dan lingkungan. Berbagai informasi yang diperoleh dari pemantauan melalui teknologi modern dapat membantu para petani tebu untuk mengetahui kondisi tanaman secara lebih rinci dan dapat membantu mereka merespons cepat terhadap perubahan kondisi tanaman akibat perubahan iklim (Harsanto *et al.*, 2025).

Salah satu contoh teknologi modern yang dapat membantu petani tebu dalam beradaptasi terhadap perubahan iklim adalah teknologi pemantauan dan prediksi cuaca. Pemanfaatan teknologi

informasi dan komunikasi dapat membantu petani tebu dalam memperoleh informasi cuaca terkini dan prediksi cuaca dalam jangka waktu tertentu (Mallick & Anshuman, 2024). Hal ini dapat membantu petani membuat keputusan yang lebih baik terkait waktu tanam, pemupukan, dan pengendalian OPT (Mulungu *et al.*, 2025). Teknologi lain yang dapat digunakan petani tebu untuk beradaptasi terhadap perubahan iklim adalah *drone* atau sensor tanaman untuk memantau kondisi tebu di lapang secara *remote*.

Penggunaan SIG juga dapat sangat membantu para petani tebu dalam berbagai kegiatan, misalnya pemetaan lahan, perencanaan tanam, pengelolaan tanaman, dan pemantauan dampak perubahan iklim pada lahan tebu. *Database* dalam SIG menyediakan informasi mengenai jenis tanah di lahan pertanian, status hara, topografi, sistem irigasi, drainase permukaan dan bawah permukaan, jumlah penggunaan bahan kimia, serta hasil produksi tanaman, sekaligus memberikan informasi mengenai hubungan antar unsur yang memengaruhi pertumbuhan tanaman di suatu lahan tertentu (Ojo & Ilunga, 2018). Dalam budidaya tebu, teknologi mutakhir juga dapat dimanfaatkan untuk aplikasi bahan kimia, misalnya aplikasi pestisida dan zat pemacu kemasakan (ZPK) melalui pesawat udara atau *unmanned aerial vehicle* (UAV) (Puspitasari *et al.*, 2025).

Teknologi juga dapat digunakan untuk mendapatkan peringatan tentang adanya kondisi cuaca ekstrem, seperti kekeringan atau hujan lebat. Teknologi modern seperti *drone* dan sensor tanah dapat digunakan untuk memantau kondisi tanaman tebu secara *real-time* dengan memberikan data yang akurat tentang kelembapan tanah, kebutuhan unsur hara, dan status kesehatan tanaman. Pada saat ini, terdapat berbagai aplikasi *mobile* yang mudah dan praktis digunakan oleh para petani dalam mengelola lahan pertanian mereka (Halawa, 2024). Aplikasi *mobile* semacam ini dapat memberikan informasi dan saran tentang jadwal penyiraman, pemupukan, dan pengendalian OPT, serta memonitor kondisi tanaman secara *real-time*.

Melalui pemanfaatan teknologi modern, petani tebu dapat meningkatkan produktivitas dan ketahanan usahatani mereka terhadap perubahan iklim. Meskipun demikian, pemanfaatan teknologi modern di perkebunan tebu di Indonesia hanya sebatas di pabrik gula tertentu yang memiliki modal besar, seperti pabrik gula milik PTPN atau pabrik gula swasta. Misalnya, PT Sugar Group Companies di Lampung memanfaatkan pesawat udara untuk menyempotkan zat pemacu kemasakan (ZPK) yang dapat membantu tebu masak sempurna di tengah curah hujan yang tinggi (Evizal, 2018). Di Indonesia, tebu sering dipanen pada kondisi yang belum masak, salah satunya karena kondisi iklim basah sepanjang tahun, terutama di luar Pulau Jawa. Kondisi iklim basah akibat La Nina menyebabkan suhu dan kelembapan menjadi tidak kondusif untuk proses kemasakan tebu (Puspitasari *et al.*, 2024).

Sayangnya, pemanfaatan teknologi modern seperti yang telah dibahas sebelumnya belum umum diterapkan di kalangan petani tebu rakyat di Indonesia karena diperlukan peralatan yang tidak murah dan keterampilan khusus untuk menggunakannya. Selain itu, masih banyak petani di Indonesia yang belum *aware* tentang pentingnya upaya mitigasi efek perubahan iklim karena orientasi utama mereka pada umumnya adalah keuntungan daripada keberlanjutan. Oleh karena itu, pabrik gula dan pemerintah perlu hadir untuk membantu para petani tebu rakyat dalam penerapan berbagai teknologi tersebut. Beberapa hal yang dapat dilakukan oleh pabrik gula maupun pemerintah untuk mendukung petani tebu rakyat dalam pemanfaatan teknologi modern, antara lain:

1. Edukasi dan pelatihan, di mana pabrik gula dan pemerintah dapat menyelenggarakan edukasi dan pelatihan tentang dampak perubahan iklim, latar belakang mengapa teknologi perlu untuk diterapkan, serta pengenalan dan penggunaan teknologi modern kepada petani tebu. Hal ini dapat membantu meningkatkan pemahaman dan keterampilan petani tebu dalam menerapkan teknologi tersebut. Edukasi dan pelatihan oleh pemerintah dapat melibatkan penyuluh pertanian di Dinas Pertanian ataupun Kementerian Pertanian. Pemerintah juga dapat mengembangkan suatu program kemitraan dengan produsen teknologi, lembaga riset, dan organisasi nonprofit yang dapat membantu akselerasi transfer ilmu mengenai teknologi dan inovasi kepada petani tebu rakyat.
2. Fasilitasi akses teknologi, di mana pabrik gula dan pemerintah dapat membuka akses bagi para petani tebu rakyat terhadap teknologi modern melalui program subsidi, bantuan teknis, maupun kerja sama dengan pihak swasta yang menyediakan teknologi tersebut.
3. Program insentif, di mana pabrik gula dan pemerintah dapat memberikan insentif kepada petani tebu yang menerapkan teknologi modern dalam usahataniannya sehingga mendorong adopsi teknologi tersebut.

Melalui dukungan dari pabrik gula dan pemerintah, petani tebu rakyat diharapkan dapat lebih mudah menjangkau berbagai teknologi modern yang ada untuk meningkatkan produktivitas tebu mereka. Hal ini tentu saja tidak akan memberikan dampak positif bagi petani tebu itu sendiri, namun juga bagi industri gula dan ekonomi nasional secara keseluruhan.

3.2.7. Pemanfaatan *artificial intelligence* (AI)

Strategi adaptasi dalam budidaya tebu di tengah perubahan iklim semakin menuntut pendekatan berbasis teknologi, salah satunya melalui pemanfaatan kecerdasan artifisial (*artificial intelligence*/AI). AI memiliki peran penting dalam membantu budidaya tebu beradaptasi dengan perubahan iklim melalui optimasi manajemen pertanian berbasis data. Salah satu aplikasi utamanya adalah prediksi cuaca dan penjadwalan tanam, di mana model *machine*

learning menganalisis data historis iklim untuk menentukan waktu tanam dan panen optimal, mengurangi risiko gagal panen akibat cuaca ekstrem.

Teknologi AI menawarkan kemampuan untuk memprediksi dan merespons variabilitas iklim yang kian sulit diprediksi, khususnya dalam hal suhu ekstrem, curah hujan yang tidak menentu, serta peningkatan risiko kekeringan (Materia *et al.*, 2024). AI berfungsi sebagai alat bantu analitik untuk mengolah data iklim, tanah, dan pertumbuhan tanaman secara *real time*, sehingga keputusan budidaya dapat dilakukan secara presisi dan adaptif terhadap dinamika iklim lokal (Mana *et al.*, 2024).

Salah satu penerapan AI yang menonjol dalam adaptasi budidaya tebu adalah sistem irigasi cerdas yang mampu mengatur penggunaan air secara otomatis dengan mempertimbangkan kelembapan tanah, prediksi cuaca, serta kebutuhan air tanaman, sehingga efisiensi penyiraman tetap terjaga tanpa pemborosan (Mgendi, 2024). Melalui pendekatan ini, petani dapat mempertahankan produktivitas tanaman meskipun berada dalam kondisi lingkungan yang tidak stabil.

Selain itu, AI juga dimanfaatkan untuk penjadwalan tanam dan pemupukan berbasis prediksi iklim jangka pendek maupun jangka panjang. Dengan demikian, pertumbuhan tebu dapat berlangsung optimal tanpa bergantung sepenuhnya pada kalender musim tradisional. Lebih lanjut, AI mendukung adaptasi budidaya tebu melalui pengembangan sistem peringatan dini terhadap risiko gagal panen akibat cuaca ekstrem atau serangan hama dan penyakit yang cenderung meningkat akibat perubahan iklim (Singh & Sahu, 2019). Algoritma pembelajaran mesin dapat mengidentifikasi pola kerentanan dari data historis dan memberikan rekomendasi teknis sebelum dampak terjadi secara nyata di lapangan. Hal ini memungkinkan petani untuk mengambil langkah antisipatif lebih dini, sehingga risiko kerugian produksi dapat ditekan secara signifikan.

AI juga mendukung perbaikan varietas tanaman yang lebih tahan terhadap perubahan iklim (Gryshova *et al.*, 2024), termasuk pada tanaman tebu. Metode seperti *machine learning* dan *deep learning* dapat membantu pemulia tanaman tebu dalam mengelola kumpulan data multidimensi yang besar mengenai genotipe, fenotipe, dan lingkungan, sehingga dapat melakukan seleksi dan pengembangan varietas tebu unggul yang tahan terhadap berbagai kondisi secara lebih cepat dan efisien. AI mampu secara otomatis menyaring data-data penting yang berpengaruh besar terhadap sifat-sifat tebu melalui penerapan algoritma seleksi fitur (Wang *et al.*, 2024).

Dari sisi kelembagaan, penerapan AI sebagai strategi adaptasi menuntut penguatan kapasitas petani dan integrasi sistem digital ke dalam kebijakan pertanian nasional. Penggunaan AI hanya akan efektif apabila ditunjang oleh infrastruktur data, akses terhadap teknologi, serta pelatihan yang memadai. Oleh karena itu, kolaborasi antara pemerintah, lembaga penelitian, dan sektor

swasta sangat diperlukan untuk memperluas adopsi AI dalam budidaya tebu secara inklusif, terutama di daerah sentra produksi yang rentan terhadap perubahan iklim.

Dengan demikian, AI tidak hanya menjadi alat bantu teknis, melainkan bagian dari transformasi sistem pertanian menuju model yang lebih tangguh dan adaptif terhadap tantangan iklim masa kini dan mendatang. Pendekatan ini tidak menggantikan peran petani, tetapi memperkuat kapasitas mereka dalam membuat keputusan budidaya berbasis data yang lebih akurat dan relevan secara kontekstual.

3.3. Strategi mitigasi

Berbeda dengan strategi adaptasi, mitigasi merupakan upaya yang bertujuan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Hal ini didasarkan pada fakta bahwa sektor pertanian menyumbang sekitar 10-20% total emisi gas rumah kaca global (Nsabiyeze *et al.*, 2024). Mitigasi perubahan iklim pada sektor pertanian berperan penting dalam upaya untuk membatasi kenaikan suhu udara global hingga 1,5°C (van Hoof, 2023). Dalam konteks budidaya tebu, beberapa strategi mitigasi yang dapat dilakukan oleh petani tebu, antara lain praktik konservasi tanah, pelatihan dan edukasi kepada petani tebu, serta pemanfaatan *artificial intelligence* (AI).

3.3.1. Praktik konservasi tanah

Strategi mitigasi pertama yang dapat dilakukan petani tebu dalam menghadapi perubahan iklim adalah melakukan praktik konservasi tanah. Konservasi tanah termasuk penggunaan pupuk organik, misalnya kompos dan pupuk kandang. Tebu membutuhkan unsur hara dalam jumlah yang cukup supaya dapat tumbuh dan berkembang secara optimal (Puspitasari *et al.*, 2023; Kumar *et al.*, 2024). Jenis pupuk organik lain yang dapat digunakan untuk meningkatkan pertumbuhan dan produktivitas tebu adalah pupuk hayati (Puspitasari *et al.*, 2022).

Contoh lain dari upaya mitigasi perubahan iklim oleh petani tebu adalah melalui peningkatan kesuburan tanah. Dalam konsep kesuburan tanah, ketersediaan unsur hara menjadi salah satu hal indikator di mana suatu tanah dapat dikatakan subur (Permana *et al.*, 2022). Para petani dapat memanfaatkan limbah pertanian sebagai sumber bahan organik, misalnya melalui pengolahan serasah tebu menjadi kompos atau biochar. Dengan melakukan hal tersebut, petani tebu dapat mengurangi emisi gas rumah kaca dari limbah organik sekaligus meningkatkan kesuburan tanah. Sisa limbah hasil pengolahan pabrik gula juga dapat digunakan untuk memacu pertumbuhan dan produktivitas tebu, misalnya vinase (Dewi *et al.*, 2022a; Putra *et al.*, 2024b) dan blotong (Putra *et al.*, 2015). Di samping itu, limbah organik lain seperti sampah dapur juga dapat dijadikan sebagai bahan pembuatan kompos atau biochar oleh petani tebu (Dewi *et al.*, 2022b; Putra *et al.*, 2024a). Indonesia merupakan salah satu negara yang menghasilkan sampah organik dalam jumlah besar (Afrianto *et al.*, 2021; Putra *et al.*, 2021b). Pada akhirnya, jenis material organik yang digunakan

sebagai material pembuatan pupuk organik sebaiknya dilihat dari ketersediaannya di sekitar kebun tebu.

Pupuk organik dapat membantu memperbaiki sifat kimia, biologi dan fisika tanah sehingga tanah menjadi sehat (Soverda & Evita, 2022). Tanah yang sehat menjadi langkah mitigasi yang baik terhadap perubahan iklim, mengingat tanah merupakan reservoir utama penyerapan karbon (Radulov & Berbecea, 2023). Penggunaan pupuk organik dan pemanfaatan limbah juga dapat mengurangi kebutuhan pupuk kimia yang tentunya secara ekonomis akan menguntungkan petani. Hasil penelitian Puspitasari *et al.* (2022) menunjukkan bahwa aplikasi pupuk hayati dapat menurunkan penggunaan pupuk kimia secara signifikan. Pengurangan penggunaan pupuk kimia juga akan mengurangi emisi gas rumah kaca.

3.3.2. Pelatihan dan edukasi kepada petani tebu

Pelatihan dan edukasi dapat diberikan oleh pemerintah atau pabrik gula kepada petani tebu mengenai berbagai langkah praktis terkait budidaya tebu yang ramah lingkungan. Edukasi dapat dilakukan kepada kelompok tani, baik secara *offline* maupun *online* (Afrianto *et al.*, 2022b). Berdasarkan hasil penelitian Buana *et al.* (2020) di Desa Palaan, Kecamatan Ngajum, Kabupaten Malang, diketahui bahwa faktor yang paling berpengaruh terhadap rendahnya adaptasi perubahan iklim oleh petani tebu rakyat di desa tersebut adalah pemahaman petani mengenai perubahan iklim yang masih tergolong rendah. Oleh karena itu, diperlukan suatu pelatihan dan edukasi kepada para petani tebu rakyat mengenai urgensi dan cara-cara mengurangi emisi gas rumah kaca. Petani tebu juga perlu dibekali edukasi tentang praktik pertanian berkelanjutan dan strategi adaptasi terhadap perubahan iklim untuk diimplementasikan di lingkungan mereka.

Prinsip dalam pelatihan dan edukasi kepada petani tebu dalam menghadapi perubahan iklim adalah dengan memberikan pengetahuan, keterampilan, dan pemahaman mengenai faktor-faktor penyebab, dampak perubahan iklim, dan strategi mitigasi serta adaptasinya. Informasi tersebut harus disampaikan secara jelas dan dengan bahasa yang mudah dipahami oleh petani. Petani tebu juga sebaiknya membentuk jaringan atau kelompok tani dalam berbagi pengetahuan dan pengalaman serta saling mendukung satu sama lain dalam menghadapi perubahan iklim. Bila perlu, monitoring dan evaluasi juga dapat dilakukan secara berkala terhadap penerapan strategi mitigasi dan adaptasi yang telah diajarkan kepada petani tebu serta evaluasi hasilnya untuk memperbaiki dan meningkatkan program pelatihan ke depannya. Melalui program pelatihan semacam ini, petani tebu diharapkan lebih siap dan mampu menghadapi perubahan iklim.

Pada intinya, penguatan kapasitas adaptif petani terhadap perubahan iklim memerlukan pendekatan edukatif yang tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga komunikatif dan kontekstual. Pendekatan serupa telah terbukti efektif dalam bidang lingkungan lainnya. Misalnya, kegiatan

edukasi lingkungan di ruang publik seperti Alun-Alun Kota Malang berhasil meningkatkan kesadaran masyarakat terhadap isu sampah plastik melalui metode partisipatif dan penyediaan solusi praktis berupa tas kain. Inisiatif ini menunjukkan bahwa kombinasi antara pendidikan langsung dan tindakan konkret dapat mendorong perubahan perilaku lingkungan yang signifikan (Arifaturrofiqoh *et al.*, 2025). Pembelajaran dari pendekatan tersebut dapat diadaptasi dalam konteks perkebunan tebu, khususnya untuk mendorong praktik budidaya yang lebih berkelanjutan melalui edukasi yang dekat dengan keseharian para petani tebu.

3.3.3. Pemanfaatan *artificial intelligence* (AI)

Pemanfaatan *artificial intelligence* (AI) dalam budidaya tebu merupakan strategi mitigasi yang semakin relevan di tengah tantangan perubahan iklim. AI mampu mengintegrasikan data iklim, tanah, dan tanaman dalam jumlah besar untuk mengidentifikasi pola yang tidak kasat mata secara manual. Hal ini memungkinkan deteksi dini terhadap stres abiotik seperti kekeringan atau suhu ekstrem, yang merupakan dampak langsung dari perubahan iklim. Sebagai contoh, algoritma *machine learning* dapat memprediksi anomali cuaca yang berpotensi mengganggu fase pertumbuhan tebu, sehingga petani dapat menyesuaikan jadwal tanam atau pola irigasi secara adaptif. Chaiyana *et al.* (2024) menyatakan bahwa algoritma AI juga memungkinkan deteksi dini potensi serangan organisme pengganggu tanaman dengan mengenali pola sebelum gejala muncul, sehingga petani dapat melakukan tindakan pencegahan secara tepat waktu.

Selain itu, AI berperan penting dalam pengelolaan input secara presisi untuk menekan emisi dan meningkatkan efisiensi budidaya. Algoritma AI dapat membantu dalam mengoptimalkan aplikasi pupuk melalui analisis kondisi unsur hara existing, pola pertumbuhan tanaman, dan data historis produktivitas (Kumar *et al.*, 2022). Melalui sistem *decision support* berbasis AI, dosis pupuk dan air dapat diatur secara *site-specific* berdasarkan data sensor lapangan dan citra satelit (Mgendi, 2024; Pandey & Mishra, 2024). Implementasi ini tidak hanya mengurangi jejak karbon dari sektor pertanian, tetapi juga menjaga produktivitas tebu secara berkelanjutan.

Namun meskipun demikian, penerapan AI dalam mitigasi perubahan iklim di sektor tebu membutuhkan dukungan infrastruktur data dan pelatihan bagi pelaku pertanian. Sistem AI yang efektif mensyaratkan ketersediaan data berkualitas tinggi dan terkini, serta kemampuan interpretasi hasil oleh petani dan penyuluh. Oleh karena itu, kolaborasi antara lembaga penelitian, pemerintah, dan industri teknologi menjadi hal krusial. Pendekatan ini tidak hanya memperkuat adaptasi lokal terhadap perubahan iklim, tetapi juga mendorong transformasi digital pertanian yang berkelanjutan dan berbasis sains.

3.4. Studi kasus adaptasi dan mitigasi perubahan iklim petani tebu di Indonesia

Beberapa studi sebelumnya telah mempelajari pemahaman petani tebu di Indonesia mengenai dampak perubahan iklim terhadap usahatani mereka, serta strategi adaptasi dan mitigasi yang telah atau akan mereka lakukan ke depannya. Pemahaman mengenai perubahan iklim di kalangan petani tebu tentu menjadi pondasi penting agar strategi adaptasi dan mitigasi dapat diimplementasikan dengan baik. Secara teknis, pemahaman tersebut dapat dilakukan melalui program penyuluhan dan pendampingan petani dengan menggabungkan teori dan praktik lapang (Putra & Dewi, 2025).

Buana *et al.* (2020) menemukan bahwa 74% petani di Desa Palaan, Kecamatan Ngajum, Kabupaten Malang belum mengetahui tentang perubahan iklim, sedangkan 26% petani tebu pernah mendengar dan merasakan fenomena perubahan iklim namun belum sepenuhnya memahami tentang konsep perubahan iklim. Namun, beberapa petani mengaku telah melakukan perbaikan lahan tanam tebu berupa aplikasi blotong di lahan tebu mereka. Pemberian blotong ini bertujuan untuk meningkatkan bahan organik dan unsur hara di lahan tebu. Sunarti (2021) menemukan bahwa petani tebu di Desa Kedungmakan, Kecamatan Jatirogo, Kabupaten Tuban melakukan strategi adaptasi dengan mempersiapkan segala hal yang mendukung pertumbuhan dan perkembangan tebu, seperti menyiapkan pupuk, memperkirakan cuaca, menyewa buruh tani untuk membantu pada masa tanam tebu, dan segera memperbaiki tanaman tebu saat mengalami kerusakan akibat angin kencang atau hama.

Integrasi antara budidaya tebu dan pemeliharaan ternak, khususnya sapi, menjadi strategi adaptasi iklim yang terbukti efektif di kalangan petani tebu skala kecil di Kabupaten Blitar, Jawa Timur. Model ini memungkinkan pemanfaatan limbah ternak sebagai pupuk organik, yang tidak hanya meningkatkan kesuburan dan kapasitas retensi air tanah, tetapi juga mengurangi ketergantungan terhadap sistem irigasi di lahan tadah hujan. Dalam konteks perubahan iklim yang menyebabkan fluktuasi curah hujan dan suhu ekstrem, keberadaan pupuk organik membantu menjaga produktivitas tebu, sekaligus memperkuat ketahanan tanaman terhadap kekeringan. Selain aspek agronomis, integrasi ini juga berdampak ekonomi dengan menyediakan sumber pendapatan tambahan dari ternak, yang penting sebagai strategi diversifikasi untuk mengurangi risiko kehilangan hasil panen. Petani tebu yang memiliki ternak cenderung lebih adaptif dengan tingkat adopsi yang lebih tinggi terhadap varietas tebu tahan iklim serta penggunaan pupuk secara intensif. Dengan demikian, model ini dapat menjadi pendekatan holistik yang layak diperluas ke wilayah sentra tebu lainnya di Indonesia (Hasibuan *et al.*, 2023).

4. Kesimpulan

Perubahan iklim berdampak langsung pada produktivitas tebu melalui gangguan pola tanam, cekaman lingkungan, dan peningkatan organisme pengganggu. Strategi adaptasi seperti penyesuaian jadwal tanam, varietas tahan cekaman, manajemen irigasi, dan pemanfaatan teknologi modern termasuk AI diperlukan untuk menjaga keberlanjutan usahatani. Mitigasi dilakukan melalui konservasi tanah, pengolahan limbah, dan pengelolaan input presisi guna menekan emisi sektor pertanian.

Implikasi praktis dari kajian ini menunjukkan bahwa tanpa dukungan kelembagaan, penerapan strategi adaptif hanya akan menjangkau sebagian kecil petani, khususnya mereka yang memiliki sumber daya terbatas. Oleh karena itu, dibutuhkan insentif kebijakan yang mendorong adopsi teknologi rendah emisi dan pengelolaan berbasis presisi di tingkat petani rakyat. Pemerintah daerah dan pabrik gula perlu membentuk skema kolaboratif dalam penyediaan infrastruktur irigasi, pendampingan teknis, serta integrasi sistem peringatan dini berbasis cuaca dan risiko OPT.

Rekomendasi lanjutan mencakup: (1) percepatan transfer teknologi melalui pelatihan adaptif dan berbasis lokasi, (2) pengembangan varietas tebu tahan cekaman berbasis riset genetik lokal, (3) pemetaan wilayah rawan iklim untuk intervensi berbasis spasial, dan (4) integrasi data iklim, agronomi, dan sosial-ekonomi dalam sistem pendukung pengambilan keputusan petani. Strategi ini penting untuk memperkuat ketahanan tebu rakyat secara sistemik sekaligus mendukung transisi menuju sistem pertanian yang adaptif, efisien, dan berkelanjutan.

Singkatan yang Digunakan

| | |
|-----|--------------------------------|
| AI | <i>Artificial Intelligence</i> |
| IoT | <i>Internet of Things</i> |
| OPT | Organisme Pengganggu Tanaman |
| SIG | Sistem Informasi Geografis |
| UAV | <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> |
| ZPK | Zat Pemasak Kemasakan |

Pernyataan Ketersediaan Data

Data akan tersedia berdasarkan permintaan.

Kontribusi Para Penulis

Rivandi Pranandita Putra: kurasi data, investigasi, penulisan draf awal, konseptualisasi, dan metodologi. **Vita Ayu Kusuma Dewi:** kurasi data dan penulisan draf awal. **Melati Julia Rahma:** kurasi data dan penulisan draf awal.

Pernyataan Konflik Kepentingan

Para penulis naskah ini menyatakan tidak ada konflik kepentingan atau kepentingan yang

bersaing.

Ucapan Terima Kasih

Tidak ada ucapan terima kasih

Daftar Pustaka

- Abbass, K., Qasim, M. Z., Song, H., Murshed, M., Mahmood, H., & Younis, I. (2022). A review of the global climate change impacts, adaptation, and sustainable mitigation measures. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(28), 42539-42559. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-19718-6>.
- Acevedo, M., Pixley, K., Zinyengere, N., Meng, S., Tufan, H., Cichy, K., ..., & Porciello, J. (2020). A scoping review of adoption of climate-resilient crops by small-scale producers in low-and middle-income countries. *Nature Plants*, 6(10), 1231-1241. <https://doi.org/10.1038/s41477-020-00783-z>
- Afrianto, W. F., Hidayatullah, T., Hasanah, L. N., Putra, R. P., Diannita, R., & Anggraini, R. (2021). Urban community engagement to reduce and prevent food waste at household level. *International Journal of Community Service*, 1(3), 261-271. <https://doi.org/10.51601/ijcs.v1i3.45>.
- Afrianto, W. F., Putra, R. P., & Aini, Y. S. (2022a). Overview of the ethnobotany on the use of plants as potential botanical pesticides in Indonesia. *Jurnal Biologi Tropis*, 22(1), 220-243. <http://dx.doi.org/10.29303/jbt.v22i1.3266>.
- Afrianto, W. F., Wati, S. I., Putra, R. P., & Hidayatullah, T. (2022b). Empowerment of farmers through the online extension in improving agricultural information literacy. *Jurnal Pengabdian Magister Pendidikan IPA*, 5(2), 374-378. <https://doi.org/10.29303/jpmipi.v5i2.1637>.
- Ali, A., Hussain, T., & Zahid, A. (2025). Smart irrigation technologies and prospects for enhancing water use efficiency for sustainable agriculture. *AgriEngineering*, 7(4), 106. <https://doi.org/10.3390/agriengineering7040106>.
- Arifaturofiquh, A., Aini, B. N., Putra, R. P., Janwar, M., Rosalia, R. A., Putri, R. G. A., & Dewi, V. A. K. (2025). Education and action for single-use plastic reduction in public spaces: A community service program at Malang City Square. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat Patikala*, 4(4), 1398-1406. <https://doi.org/10.51574/patikala.v4i4.3241>
- Arifien, Y., Putra, R. P., Wibaningwati, D. B., Anasi, P. T., Masnang, A., Rizki, F. H., ..., & Indrawati, E. (2022). *Pengantar Ilmu Pertanian*. Padang: Get Press.
- Azam, I. A., Pujiharsono, H., & Indriyanto, S. (2023). Sistem irigasi tetes menggunakan sensor kelembapan tanah YL-69 berbasis *internet of things* (IoT). *TEODOLITA: Media Komunikasi Ilmiah di Bidang Teknik*, 24(1), 65-73. <https://doi.org/10.53810/jt.v24i1.477>.
- Azmi, Y., Yulistiyono, A., Karyasa, T. B., Putra, R. P., Salama, S. H., Thamrin, N. T., ..., & Rizki, F. H. (2022). *Pertanian Terpadu*. Padang: Get Press.
- Bordonal, R. D. O., Carvalho, J. L. N., Lal, R., De Figueiredo, E. B., De Oliveira, B. G., & La Scala, N. (2018). Sustainability of sugarcane production in Brazil. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 38, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s13593-018-0490-x>.
- Buana, A. S., Pratiwi, A. H., & Fradito, A. (2020). Dampak perubahan iklim terhadap pendapatan petani tebu dan faktor penentu adaptasi. *Gontor AGROTECH Science Journal*, 6(2), 97-114. <https://doi.org/10.21111/agrotech.v6i2.3537>.
- Cahyo, R. (2013). *Pemanfaatan Mulsa Plastik Hitam Perak (MPHP) dalam Budidaya Cabai (Capsicum annuum L.)*. Yogyakarta: Kanisius.
- Chaiyana, A., Khiripet, N., Ninsawat, S., Siriwan, W., Shanmugam, M. S., & Virdis, S. G. (2024). Mapping and predicting cassava mosaic disease outbreaks using earth observation and meteorological data-driven approaches. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 35, 101231. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101231>

- Chandiposha, M. (2013). Potential impact of climate change in sugarcane and mitigation strategies in Zimbabwe. *African Journal of Agricultural Research*, 8, 2814–2818. <https://doi.org/10.5897/AJAR2013.7083>.
- Dai, X., Yu, Z., Matheny, A. M., Zhou, W., & Xia, J. (2022). Increasing evapotranspiration decouples the positive correlation between vegetation cover and warming in the Tibetan plateau. *Frontiers in Plant Science*, 13, 974745. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.974745>
- Dewi, V. A. K., Putra, R. P., & Afrianto, W. F. (2022a). Kajian potensi vinase sebagai bahan fertigasi di perkebunan tebu (*Saccharum officinarum* L.). *Sang Pencerah: Jurnal Ilmiah Universitas Muhammadiyah Buton*, 8(1), 187-201. <https://doi.org/10.35326/pencerah.v8i1.1961>.
- Dewi, V. A. K., Putra, R. P., Haris, A., & Alam, T. (2022b). *Limbah Dapur dan Pemanfaatannya*. Yogyakarta: Bintang Semesta Media.
- Dias, H. B. & Sentelhas, P. C. (2018). Sugarcane yield gap analysis in Brazil – A multi-model approach for determining magnitudes and causes. *Science of The Total Environment*, 637, 1127-1136. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.017>
- Diyasti, F., & Amalia, A. W. (2021). Peran perubahan iklim terhadap kemunculan OPT baru. *AGROSCRIPT: Journal of Applied Agricultural Sciences*, 3(1), 57-69. <https://doi.org/10.36423/agroscript.v3i1.780>.
- Dong, Y. (2022). *Irrigation Scheduling Methods: Overview and Recent Advances*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.107386>.
- Evizal, R. (2018). *Pengelolaan Perkebunan Tebu*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Faizah, N., Haris, A., Muhajirin, A., & Putra, R. P. (2024). Analisis potensi ekonomi pertanian perkotaan oleh Kelompok Wanita Tani Puspitasari Kota Semarang. *Jurnal Pertanian Agros*, 26(2), 1396-1407. <http://dx.doi.org/10.37159/jpa.v26i2.4381>.
- Febriandika, N. R., & Rahayu, C. (2021). The impact of climate change on economic conditions: Evidence in Indonesia. *JEJAK: Jurnal Ekonomi dan Kebijakan*, 14(2), 261-271. <https://doi.org/10.15294/jejak.v14i2.29920>
- Gentile, A., Dias, L. I., Mattos, R. S., Ferreira, T. H., & Menossi, M. (2015). MicroRNAs and drought responses in sugarcane. *Frontiers in Plant Science*, 6, 58. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00058>.
- Goonesekera, S. M., & Olazabal, M. (2022). Climate adaptation indicators and metrics: State of local policy practice. *Ecological Indicators*, 145, 109657. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109657>.
- Grandis, A., Fortirer, J. S., Navarro, B. V., de Oliveira, L. P., & Buckeridge, M. S. (2024). Biotechnologies to improve sugarcane productivity in a climate change scenario. *BioEnergy Research*, 17(1), 1-26. <https://doi.org/10.1007/s12155-023-10649-9>
- Gryshova, I., Balian, A., Antonik, I., Miniailo, V., Nehodenko, V., & Nyzhnychenko, Y. (2024). Artificial intelligence in climate smart in agricultural: toward a sustainable farming future. *Access J*, 5(1), 125-40. [https://doi.org/10.46656/access.2024.5.1\(8\)](https://doi.org/10.46656/access.2024.5.1(8))
- Halawa, D. N. (2024). Peran teknologi pertanian cerdas (*smart farming*) untuk generasi pertanian Indonesia. *Jurnal Kridatama Sains dan Teknologi*, 6(02), 502-512. <https://doi.org/10.53863/kst.v6i02.1226>.
- Hamdan, M. F., & Tan, B. C. (2024). Genetic modification techniques in plant breeding: A comparative review of CRISPR/Cas and GM technologies. *Horticultural Plant Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.hpj.2024.02.012>
- Hanani, N., Rahman, M. S., Fahriyah, F., Pranowo, D., Toiba, H., Asmara, R., ..., & Retnoningsih, D. (2024). Does the climate change adaptation affect technical efficiency? Empirical evidence from potato farmers in East Java, Indonesia. *Cogent Economics & Finance*, 12(1), 2426528. <https://doi.org/10.1080/23322039.2024.2426528>.
- Harsanto, B., Kasumaningrum, Y., Arviansyah, M. R., Siregar, A. Y., Purnomo, D., Iskandar, Y., ..., & Sari, D. I. (2025). Leveraging disruptive technologies for food security: A systematic

- review on agricultural supply chain resilience to climate change. *Current Research in Food Science*, 101079. <https://doi.org/10.1016/j.crfs.2025.101079>
- Hartatie, D., & Harlianingtyas, I. (2020, August). pengaruh curah hujan dan pemupukan terhadap rendemen tebu di PG Asembagus Situbondo. In *Agropross: National Conference Proceedings of Agriculture* (pp. 47-54). <https://doi.org/10.25047/agropross.2020.35>.
- Hasibuan, A. M., Wulandari, S., Ardana, I. K., & Wahyudi, A. (2023). Understanding climate adaptation practices among small-scale sugarcane farmers in Indonesia: The role of climate risk behaviors, farmers' support systems, and crop-cattle integration. *Resources, Environment and Sustainability*, 13, 100129. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2023.100129>
- Hu, H., & Xiong, L. (2014). Genetic engineering and breeding of drought-resistant crops. *Annual Review of Plant Biology*, 65(1), 715-741. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-050213-040000>.
- Hussain, S., Khaliq, A., Mehmood, U., Qadir, T., Saqib, M., Iqbal, M. A., & Hussain, S. (2019). *Sugarcane Production under Changing Climate: Effects of Environmental Vulnerabilities on Sugarcane Diseases, Insects and Weeds*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.81131>.
- Iqbal, R., Raza, M. A. S., Valipour, M., Saleem, M. F., Zaheer, M. S., Ahmad, S., ..., & Nazar, M. A. (2020). Potential agricultural and environmental benefits of mulches—a review. *Bulletin of the National Research Centre*, 44, 1-16. <https://doi.org/10.1186/s42269-020-00290-3>.
- Jaworski, C. C., Thomine, E., Rusch, A., Lavoie, A. V., Wang, S., & Desneux, N. (2023). Crop diversification to promote arthropod pest management: A review. *Agriculture Communications*, 1(1), 100004. <https://doi.org/10.1016/j.agrcom.2023.100004>.
- Knox, J. W., Díaz, J. R., Nixon, D. J., & Mkhwanazi, M. (2010). A preliminary assessment of climate change impacts on sugarcane in Swaziland. *Agricultural Systems*, 103(2), 63-72. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2009.09.002>.
- Kumar, S. S., Goundar, K. K., Wani, O. A., Hassan, S. S., Kumar, S., & Kumar, V. V. (2024). Prospects of the sugarcane industry in Fiji for carbon sequestration and environmental sustainability amidst changing climate: a critical overview. *Discover Agriculture*, 2(1), 82. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00101-7>
- Kumar, R., Sagar, V., Verma, V. C., Kumari, M., Gujjar, R. S., Goswami, S. K..., & Prasad, P. V. (2023). Drought and salinity stresses induced physio-biochemical changes in sugarcane: an overview of tolerance mechanism and mitigating approaches. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1225234. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1225234>.
- Kumar, A., Sharma, H., & Kumar, S. (2022). AI-based soil fertility management review: Challenges and opportunities. *Journal of Survey in Fisheries Sciences*, 08(2), 283-288. <https://doi.org/10.53555/sfs.v8i2.2144>.
- Loo, Y.Y., Billa, L., & Singh, A. (2015). Effect of climate change on seasonal monsoon in Asia and its impact on the variability of monsoon rainfall in Southeast Asia. *Geoscience Frontiers*, 6, 817– 823. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2014.02.009>.
- Mallick, B., & Anshuman, J. (2024). *Navigating Agricultural Extension: A Comprehensive Guide*. New Delhi: PMW Publisher.
- Mana, A. A., Allouhi, A., Hamrani, A., Rehman, S., El Jamaoui, I., & Jayachandran, K. (2024). Sustainable AI-based production agriculture: Exploring AI applications and implications in agricultural practices. *Smart Agricultural Technology*, 7, 100416. <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100416>.
- Marin, F. R., Jones, J. W., Singels, A., Royce, F., Assad, E. D., Pellegrino, G. Q., & Justino, F. (2013). Climate change impacts on sugarcane attainable yield in southern Brazil. *Climatic Change*, 117, 227-239. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0561-y>.
- Materia, S., García, L. P., van Straaten, C., O, S., Mamalakakis, A., Cavicchia, L., ... & Donat, M. (2024). Artificial intelligence for climate prediction of extremes: State of the art, challenges,

- and future perspectives. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 15(6), e914. <https://doi.org/10.1002/wcc.914>
- Meena, M. R., Appunu, C., Arun Kumar, R., Manimekalai, R., Vasantha, S., Krishnappa, G., ... & Hemaprabha, G. (2022). Recent advances in sugarcane genomics, physiology, and phenomics for superior agronomic traits. *Frontiers in Genetics*, 13, 854936. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.854936>
- Mgendi, G. (2024). Unlocking the potential of precision agriculture for sustainable farming. *Discover Agriculture*, 2(1), 87. <https://doi.org/10.1007/s44279-024-00078-3>
- Monteiro, L. A., & Sentelhas, P. C. (2017). Sugarcane yield gap: can it be determined at national level with a simple agrometeorological model?. *Crop and Pasture Science*, 68(3), 272-284. <https://doi.org/10.1071/CP16334>.
- Msomba, B. H., Ndaki, P. M., & Joseph, C. O. (2024). Sugarcane sustainability in a changing climate: a systematic review on pests, diseases, and adaptive strategies. *Frontiers in Agronomy*, 6, 1423233. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1423233>.
- Mulungu, K., Kassie, M., & Tschopp, M. (2025). The role of information and communication technologies-based extension in agriculture: application, opportunities and challenges. *Information Technology for Development*, 1-30. <https://doi.org/10.1080/02681102.2025.2456232>.
- Nsabiyeze, A., Ma, R., Li, J., Luo, H., Zhao, Q., Tomka, J., & Zhang, M. (2024). Tackling climate change in agriculture: A global evaluation of the effectiveness of carbon emission reduction policies. *Journal of Cleaner Production*, 142973. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142973>.
- Nurindah, N., & Yulianti, T. (2018). Strategi pengelolaan serangga hama dan penyakit tebu dalam menghadapi perubahan iklim. *Buletin Tanaman Tembakau, Serat dan Minyak Industri*, 10(1), 39-53. <https://doi.org/10.21082/btsm.v10n1.2018.39-53>.
- Ojo, O. I., & Ilunga, F. (2018). Geospatial analysis for irrigated land assessment, modeling and mapping. In *Multi-purposeful Application of Geospatial Data*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.73314>.
- Olamide, F. O., Olalekan, B. A., Tobi, S. U., Adeyemi, M. A., Julius, J. O., & Oluwaseyi, F. K. (2022). Fundamentals of irrigation methods and their impact on crop production. In *Irrigation and Drainage-Recent Advances*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.105501>.
- Onyeneke, R. U., Nwajiuba, C. A., Emenekwe, C. C., Nwajiuba, A., Onyeneke, C. J., Ohalete, P., & Uwazie, U. I. (2019). Climate change adaptation in Nigerian agricultural sector: A systematic review and resilience check of adaptation measures. *AIMS Agriculture and Food*, 4(4), 967-1006. <https://doi.org/10.3934/agrfood.2019.4.967>.
- Orlove, B. (2022). The concept of adaptation. *Annual Review of Environment and Resources*, 47(1), 535-581. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-112320-095719>.
- Pandey, D. K., & Mishra, R. (2024). Towards sustainable agriculture: Harnessing AI for global food security. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 12, 72-84. <https://doi.org/10.1016/j.aiia.2024.04.003>
- Patterson, D. T. (1995). Weeds in a Changing Climate. *Weed Science*, 43(4), 685-700. <https://doi.org/10.1017/S0043174500081832>.
- Permana, I., Anggoro, O., Carsidi, D., Alam, S., Sihaloho, N. K., Killa, Y. M., ..., & Elizabeth, R. (2022). *Ilmu Lingkungan*. Padang: Get Press.
- Puspitasari, A. R., Ariyani, D., & Putra, R. P. (2022). Agronomic performance and productivity of plant-cane sugarcane under the application of various dosage of biofertilizer and inorganic fertilizer. *Indonesian Sugar Research Journal*, 2(2), 56-66. <https://dx.doi.org/10.54256/isrj.v2i2.79>.

- Puspitasari, A. R., Ariyani, D., & Putra, R. P. (2023). Aplikasi pupuk nano cair pada fase pertumbuhan vegetatif tebu. *Indonesian Sugar Research Journal*, 3(2), 64-71. <http://dx.doi.org/10.54256/isrj.v3i2.112>.
- Puspitasari, A. R., Ariyani, D., & Putra, R. P. (2025). Aplikasi zat pemacu kemasakan tebu sebagai bahan baku awal giling di Sumatera Utara. *Jurnal Agrotek Tropika*, 13(1), 7-14. <http://dx.doi.org/10.23960/jat.v13i1.7849>.
- Puspitasari, A. R., Ariyani, D., Putra, R. P., Widaryanto, E., Maghfoer, M. D., & Tyasmoro, S. Y. (2024). Enhancement of Sugarcane Maturity using Glyphosate and Bispiribac Sodium as Chemical Ripeners in Wet Climate. In *BIO Web of Conferences*, 91. EDP Sciences. <http://dx.doi.org/10.1051/bioconf/20249101006>.
- Putra, R. P. (2020). Perkecambahan dan pertumbuhan awal budet dan budchip tebu (*Saccharum officinarum* L.) yang ditanam pada berbagai posisi mata tunas. *Jurnal Agrotek Tropika*, 8(3), 435-444. <https://dx.doi.org/10.23960/jat.v8i3.3980>.
- Putra, R. P., Arini, N., & Ranomahera, M. R. R. (2021a). Implementation of climate-smart agriculture to boost sugarcane productivity in Indonesia. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Pertanian*, 40(2), 89-102. <http://dx.doi.org/10.21082/jp3.v40n2.2021.p89-102>.
- Putra, R. P., & Dewi, V. A. K. (2025). Pelatihan budidaya tebu bagi petani tebu rakyat di Jawa Timur. *BHAKTI NAGORI (Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat)*, 5(1), 264-270. https://doi.org/10.36378/bhakti_nagori.v5i1.4358
- Putra, R. P., Dewi, V. A. K., & Afrianto, W. F. (2021b). *Serba-Serbi Pertanian Perkotaan*. Solok: Insan Cendekia Mandiri.
- Putra, R. P., Dewi, V. A. K., & Mangarengi, N. A. P. (2024a). *The Utilisation of Organic Waste: The Case of Indonesia*. Bandung: Widina Media Utama.
- Putra, R. P., Dewi, V. A. K., Ranomahera, M. R. R., Arini, N., & Haris, A. (2024b). Dampak aplikasi vinase terhadap lingkungan dan pertumbuhan tanaman tebu (*Saccharum officinarum* L.). *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, 8(3), 1560-1574. <https://doi.org/10.33379/gtech.v8i3.4401>.
- Putra, R. P., Dewi, V. A. K., Ranomahera, M. R. R., Arini, N., & Haris, A. (2024c). Pemanfaatan biochar untuk meningkatkan kualitas tanah dan produktivitas tebu. *Jurnal Pertanian Agros*, 26(2), 754-768. <http://dx.doi.org/10.37159/jpa.v26i2.4651>.
- Putra, R. P., Ranomahera, M. R. R., Arini, N., & Afrianto, W. F. (2021c). Tindakan pengembalian residu panen tebu untuk meningkatkan kualitas tanah dan produktivitas tebu (*Saccharum officinarum* L.). *Buletin Tanaman Tembakau, Serat & Minyak Industri*, 13(1), 48. <https://doi.org/10.21082/btsm.v13n1.2021.48-66>.
- Putra, R. P., Ranomahera, M. R. R., Rizaludin, M. S., Supriyanto, R., & Dewi, V. A. K. (2020). Investigating environmental impacts of long-term monoculture of sugarcane farming in Indonesia through DPSIR framework. *Biodiversitas Journal of Biological Diversity*, 21(10). <https://doi.org/10.13057/biodiv/d211061>.
- Putra, R. P., Yudono, P., & Sulistyaningsih, E. (2015). Pengaruh takaran kompos blotong dan umur simpan mata tunas tunggal terhadap pertumbuhan bibit tebu (*Saccharum officinarum* L.). *Vegetalika*, 4(2), 100-111. <https://doi.org/10.22146/veg.9280>.
- Putra, R. P., Jati, W. W., & Ranomahera, M. R. R. (2024d). *Perbenihan dan Teknologi Benih Tebu*. Yogyakarta: Penerbit Andi.
- Radulov, I., & Berbecea, A. (2023). *Role of Soil Health in Mitigating Climate Change*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.1002402>.
- Ramadhan, I. C., Taryono, & Wulandari, R. (2014). Keragaan pertumbuhan dan rendemen lima klon tebu (*Saccharum officinarum* L.) di ultisol, vertisol, dan inceptisol. *Vegetalika*, 3(4), 77-87. <https://doi.org/10.22146/veg.5763>.
- Ranomahera, M. R. R., Nugroho, B. D. A., Riajaya, P. D., & Putra, R. P. (2020a). Using global climate indices to predict rainfall and sugarcane productivity in drylands of Banyuwangi,

- East Java, Indonesia. *Indonesian Journal of Agricultural Science*, 21(2), 78-88. <http://dx.doi.org/10.21082/ijas.v21n2.2020.p78-88>.
- Ranomahera, M. R. R., Puspitasari, A. R., Putra, R. P., Gustomo, D., & Winarsih, S. (2020b). Agronomic performance and economic benefits of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) under drip irrigation for sandy and clay soils in East Java, Indonesia. *Jurnal Tanah dan Iklim*, 44(2), 141-153. <http://dx.doi.org/10.21082/jti.v44n2.2020.141-153>.
- Rejekiingrum, P. (2014). Dampak perubahan iklim terhadap sumberdaya air: Identifikasi, simulasi, dan rencana aksi. *Jurnal Sumberdaya Lahan*, 8(1), 1-15. <https://doi.org/10.2018/jsdl.v8i1.6440>.
- Riajaya, P. D. (2020). Rainy season period and climate classification in sugarcane plantation regions in Indonesia. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 418(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/418/1/012058>
- Sandhu, K. S., Shiv, A., Kaur, G., Meena, M. R., Raja, A. K., Vengavasi, K., ..., & Kumar, S. (2022). Integrated approach in genomic selection to accelerate genetic gain in sugarcane. *Plants*, 11(16), 2139. <https://doi.org/10.3390/plants11162139>
- Sari, V. K., Haryono, K., & Basuki, B. (2021). Respon varietas tebu unggul baru terhadap pemberian nano silika dan cekaman kekeringan. *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, 21(2), 91-98. <http://dx.doi.org/10.25181/jppt.v21.i2.1988>.
- Schoenefeld, J. J., Schulze, K., & Bruch, N. (2022). The diffusion of climate change adaptation policy. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 13(3), e775. <https://doi.org/10.1002/wcc.775>.
- Singh, C., Iyer, S., New, M. G., Few, R., Kuchimanchi, B., Segnon, A. C., & Morchain, D. (2022). Interrogating 'effectiveness' in climate change adaptation: 11 guiding principles for adaptation research and practice. *Climate and Development*, 14(7), 650-664. <https://doi.org/10.1080/17565529.2021.1964937>.
- Singh, G., & Sahu, R. (2019). A bibliometric analysis on Agriculture 4.0. *NOLEGEIN-Journal of Operations Research & Management*, 2(2), 6-13. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.32803.53282>.
- Snyder, H. (2019). Literature review as a research methodology: An overview and guidelines. *Journal of Business Research*, 104, 333-339. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2019.07.039>
- Sosrodarsono, S., & Takeda, K. (2003). *Hidrologi untuk Pengairan*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Soleh, M. A., Manggala, R., Maxiselly, Y., Ariyanti, M., & Anjarsari, I. R. D. (2017). Respons konduktansi stomata beberapa genotipe tebu sebagai parameter toleransi terhadap stress abiotik Stomatal conductance response of sugarcanes under abiotic stress. *Jurnal Kultivasi* 16(3), 491. <https://doi.org/10.24198/kultivasi.v16i3.14455>.
- Sorvali, J., Kaseva, J., & Peltonen-Sainio, P. (2021). Farmer views on climate change—a longitudinal study of threats, opportunities and action. *Climatic Change*, 164, 1-19. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03020-4>.
- Soverda, N., & Evita, E. (2022). Pemanfaatan kompos ampas tebu pada tanaman sorgum (*Shorgum bicolor* (L.) Moench) di lahan kering: Optimalisasi pemanfaatan lahan kering di Provinsi Jambi. *Biospecies*, 15(1), 23-30. <https://doi.org/10.22437/biospecies.v15i1.16606>.
- Subiyakto. (2016). Hama penggerek tebu dan perkembangan teknik pengendaliannya. *Jurnal Litbang Pertanian*, 35(4), 179-186. <https://doi.org/10.21082/jp3.v35n4.2016.p179-186>. <https://www.neliti.com/id/publications/122883/hama-penggerek-tebu-dan-perkembangan-teknik-pengendaliannya>
- Sulaiman, A. A., Sulaeman, Y., Mustikasari, N., Nursyamsi, D., & Syakir, A. M. (2019). Increasing sugar production in Indonesia through land suitability analysis and sugar mill restructuring. *Land*, 8(4), 61. <https://doi.org/10.3390/land8040061>.

- Sunarti. (2021). Adaptasi petani tebu pada masa gagal panen (study kasus: Desa Kedungmakan Kecamatan Jatirogo Kabupaten Tuban). *Jurnal Sosialisasi*, 8(2), 54-60. <https://doi.org/10.26858/sosialisasi.v1i1.20945>.
- Terán, F., Vives-Peris, V., Gómez-Cadenas, A., & Pérez-Clemente, R. M. (2024). Facing climate change: plant stress mitigation strategies in agriculture. *Physiologia Plantarum*, 176(4), e14484. <https://doi.org/10.1111/pp1.14484>
- Toharisman, A., & Triantarti. (2016). An overview of sugar sector in Indonesia. *Sugar Tech*, 18(6), 636-641. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0490-6>.
- van Hoof, S. (2023). Climate change mitigation in agriculture: barriers to the adoption of carbon farming policies in the EU. *Sustainability*, 15(13), 10452. <https://doi.org/10.3390/su151310452>.
- Wang, X., Wu, Q., Zeng, H., Yang, X., Yang, X., Yi, X., ..., & Que, Y. (2024). Digital evolution and twin miracle of sugarcane breeding. *Field Crops Research*, 318, 109588. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109588>.
- Widyasari, W. B., Putra, L. K., Ranomahera, M. R. R., & Puspitasari, A. R. (2022). Historical notes, germplasm development, and molecular approaches to support sugarcane breeding program in Indonesia. *Sugar Tech*, 24(1), 30-47. <https://doi.org/10.1007/s12355-021-01069-0>.
- Yusara, A., Handoko, H., & Budianto, B. (2019). Analisis kebutuhan air tanaman tebu berdasarkan model simulasi tanaman (Studi kasus: Kabupaten Kediri, Jawa Timur). *Agromet*, 33(1), 30-40. <https://doi.org/10.29244/j.agromet.33.1.30-40>
- Zhao, D., & Li, Y. R. (2015). Climate change and sugarcane production: potential impact and mitigation strategies. *International Journal of Agronomy*, 2015(1), 547386. <https://doi.org/10.1155/2015/547386>.
- Zhu, P., Burney, J., Chang, J., Jin, Z., Mueller, N. D., Xin, Q., ..., & Ciais, P. (2022). Warming reduces global agricultural production by decreasing cropping frequency and yields. *Nature Climate Change*, 12(11), 1016-1023. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01492-5>.