

AI-Driven Smart Sugarcane Plantation Ecosystem: Model Implementasi Artificial Intelligence untuk Mendukung Program Bongkar Ratoon dan Hilirisasi Industri Gula Berkelanjutan di Kabupaten Bone

Hasbi^{1*)}, A. Didi Yuspin²⁾ dan Rusdiawan³⁾

¹⁾ Universitas Sipatokkong Mambo Bone

^{2,3)} Institut Agama Islam Negeri Bone

*) Corresponding author: hasbi8396@gmail.com

Abstrak

Kabupaten Bone merupakan salah satu sentra pengembangan tebu di Sulawesi Selatan yang berperan penting dalam mendukung program swasembada gula nasional. Melalui Program Bongkar Ratoon, pemerintah berupaya meningkatkan produktivitas dan kualitas tebu, namun implementasinya masih menghadapi berbagai kendala, seperti rendahnya adopsi teknologi digital, pengelolaan budidaya yang belum berbasis data, perubahan iklim, serta fluktuasi produktivitas dan rendemen gula. Penelitian ini bertujuan merancang model *AI-Driven Smart Sugarcane Plantation Ecosystem* sebagai solusi transformasi perkebunan tebu berkelanjutan yang mendukung Program Bongkar Ratoon dan hilirisasi industri gula di Kabupaten Bone. Penelitian menggunakan pendekatan *Design Science Research* (DSR) dengan metode *mixed methods*. Data diperoleh melalui studi literatur, observasi lapangan, wawancara dengan petani, penyuluh, pengelola pabrik gula, serta analisis kebijakan pemerintah. Data dianalisis menggunakan pendekatan SWOT dan PESTEL untuk merumuskan model implementasi berbasis *Artificial Intelligence*. Hasil penelitian menghasilkan model ekosistem perkebunan tebu cerdas yang mengintegrasikan *Artificial Intelligence*, *Internet of Things* (IoT), drone, *Geographic Information System* (GIS), sensor lahan, dan dashboard digital dalam sistem pendukung keputusan. Model ini mampu memberikan rekomendasi waktu tanam dan panen, pemupukan presisi, optimasi irigasi, deteksi dini hama dan penyakit, serta prediksi produktivitas dan rendemen tebu secara lebih akurat. Implementasi model diharapkan meningkatkan efisiensi budidaya, memperkuat integrasi antara petani, pabrik gula, dan pemerintah, serta mendukung transformasi perkebunan tebu menuju sistem yang berkelanjutan, unggul, adaptif, dan berdaya saing dalam mendukung ketahanan pangan dan industri gula nasional.

Kata kunci: Artificial Intelligence; Smart Plantation; Tebu; Bongkar Ratoon; Hilirisasi

Abstract

Bone Regency is one of the sugarcane development centers in South Sulawesi, which plays a crucial role in supporting the national sugar self-sufficiency program. Through the Bongkar Ratoon Program, the government seeks to increase sugarcane productivity and quality, but its implementation still faces various obstacles, such as low adoption of digital technology, non-data-based cultivation management, climate change, and fluctuations in productivity and sugar yield. This study aims to design an *AI-Driven Smart Sugarcane Plantation Ecosystem* model as a solution for sustainable sugarcane plantation transformation that supports the Bongkar Ratoon Program and the downstream sugar industry in Bone Regency. The study used a *Design Science Research* (DSR) approach with a *mixed methods* approach. Data were obtained through literature studies, field observations, interviews with farmers, extension workers, sugar factory managers, and government policy analysis. Data were analyzed using the SWOT and PESTEL approaches to formulate an Artificial Intelligence-based implementation model. The results of the study produced a smart sugarcane plantation ecosystem model that integrates Artificial Intelligence, the Internet of Things (IoT), drones, Geographic Information Systems (GIS), land sensors, and digital dashboards in a decision support system. This model is capable of providing recommendations for planting and harvesting times, precision fertilization, irrigation optimization, early detection of pests and diseases, and more accurate predictions of sugarcane productivity and yield. Implementation of the model is expected to increase cultivation efficiency, strengthen integration between farmers, sugar mills, and the government, and support the transformation of sugarcane plantations into a

sustainable, superior, adaptive, and competitive system that supports food security and the national sugar industry.

Keywords: *Artificial Intelligence; Smart Plantation; Sugarcane; Ratoon Removal; Downstream Processing*

PENDAHULUAN

Transformasi digital telah mendorong perubahan fundamental dalam pengelolaan sektor pertanian, dari sistem budidaya yang bersifat konvensional menuju pertanian berbasis data, presisi, dan kecerdasan. Perubahan tersebut semakin penting karena sektor pertanian menghadapi tekanan yang bersamaan berupa peningkatan kebutuhan pangan, keterbatasan sumber daya, perubahan iklim, degradasi lahan, serta tuntutan efisiensi penggunaan input. Dalam konteks tersebut, *smart agriculture* berkembang sebagai pendekatan yang mengintegrasikan teknologi digital, *Internet of Things* (IoT), sensor, penginderaan jauh, big data, *machine learning*, dan *Artificial Intelligence* (AI) untuk menghasilkan informasi yang lebih cepat dan akurat bagi pengambilan keputusan budidaya (Ben Ayed & Hanana, 2021; (Talaviya et al., 2020). Integrasi AI dan IoT memungkinkan data dari lingkungan pertanian dikumpulkan secara terus-menerus, diproses, dan diterjemahkan menjadi rekomendasi yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi input, produktivitas, serta keberlanjutan sistem pertanian (Elijah et al., 2018; Javaid et al., 2023).

Perkembangan tersebut memiliki relevansi yang kuat pada komoditas tebu. Tebu bukan hanya merupakan komoditas pertanian, tetapi juga menjadi bahan baku utama industri gula sehingga produktivitas tanaman, kualitas tebu, dan rendemen mempunyai implikasi langsung terhadap keberlanjutan industri gula. Pengelolaan tebu menghadapi kompleksitas yang relatif tinggi karena produktivitas dipengaruhi oleh kondisi tanah, ketersediaan air, varietas, pemupukan, serangan hama dan penyakit, kondisi iklim, serta ketepatan waktu panen. Kajian mutakhir menunjukkan bahwa AI dapat digunakan untuk berbagai aspek produksi tebu, antara lain pemantauan kondisi tanah, prediksi produktivitas, deteksi penyakit, optimasi irigasi, pengelolaan input, dan prediksi kualitas hasil. Dengan demikian, AI berpotensi mengubah pengelolaan tebu dari pendekatan yang bersifat reaktif menjadi sistem pengambilan keputusan yang lebih prediktif dan berbasis data (Bhatt et al., 2024).

Kebutuhan terhadap transformasi tersebut semakin penting dalam upaya peningkatan produktivitas dan pencapaian swasembada gula nasional. Pemerintah Indonesia menempatkan peningkatan produktivitas tebu sebagai salah satu strategi penting

dalam pengembangan industri gula. Laporan kinerja Direktorat Tanaman Semusim dan Tahunan menunjukkan bahwa produksi tebu nasional masih menghadapi kesenjangan terhadap target yang ditetapkan, sehingga diperlukan berbagai strategi peningkatan produktivitas, termasuk penggunaan varietas unggul, pelaksanaan bongkar ratoon pada tanaman berproduktivitas rendah, perluasan areal tebu, serta pengembangan kemitraan dengan pabrik gula (Kementerian Pertanian, 2024). Kajian kebijakan terbaru juga menempatkan bongkar ratoon dan perbaikan teknologi budidaya sebagai bagian penting dalam strategi menuju swasembada gula konsumsi.

Program Bongkar Ratoon pada dasarnya merupakan upaya memperbarui pertanaman tebu yang telah mengalami penurunan produktivitas setelah beberapa kali ratoon. Program tersebut memiliki nilai strategis karena tanaman lama yang tidak lagi produktif dapat digantikan dengan pertanaman baru yang memiliki potensi hasil lebih baik. Namun, keberhasilan bongkar ratoon tidak hanya ditentukan oleh penggantian tanaman, tetapi juga oleh kualitas bibit, kesiapan lahan, pemupukan, pengelolaan air, pengendalian hama dan penyakit, serta ketepatan waktu tanam dan panen. Penelitian (Fitranto et al., 2024), misalnya, menunjukkan bahwa usahatani tebu dengan sistem bongkar ratoon perlu dianalisis secara komprehensif dari sisi biaya, keuntungan, kelayakan, dan sensitivitas karena keputusan budidaya mempunyai konsekuensi ekonomi bagi petani. Dengan demikian, program bongkar ratoon memerlukan sistem pendukung keputusan yang mampu mengintegrasikan berbagai informasi agronomis, lingkungan, dan ekonomi.

Kabupaten Bone memiliki posisi strategis dalam pengembangan tebu di Sulawesi Selatan. Kabupaten Bone merupakan salah satu sentra pengembangan tebu di Sulawesi Selatan dan memiliki peran dalam mendukung program swasembada gula nasional. Namun demikian, implementasi Program Bongkar Ratoon di wilayah tersebut masih menghadapi persoalan berupa rendahnya adopsi teknologi digital, pengelolaan budidaya yang belum berbasis data, perubahan iklim, serta fluktuasi produktivitas dan rendemen gula. Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan antara kebutuhan pengelolaan perkebunan tebu yang semakin kompleks dengan sistem pengambilan keputusan yang masih terbatas. Persoalan ini menjadi semakin penting karena kualitas bahan baku dan kondisi lingkungan sangat menentukan produktivitas serta rendemen tebu.

Kajian mengenai tebu di Sulawesi Selatan juga menunjukkan bahwa produktivitas dan rendemen masih dapat berada di bawah potensi hasil. Penelitian mengenai pengembangan bibit tebu di Sulawesi Selatan mengidentifikasi kualitas bahan tanam sebagai salah satu faktor yang memengaruhi rendahnya produktivitas dan rendemen,

sementara kajian tersebut juga menunjukkan pentingnya penggunaan teknologi untuk meningkatkan kualitas bahan tanaman (Herniwati et al., 2014). Meskipun penelitian tersebut dilakukan sebelum periode sepuluh tahun terakhir, temuan tersebut tetap relevan sebagai konteks historis pengembangan tebu Sulawesi Selatan. Dalam konteks penelitian saat ini, persoalan tersebut perlu diperluas dari sekadar perbaikan bahan tanam menuju pengelolaan perkebunan secara terintegrasi dan berbasis data.

Perubahan iklim semakin memperkuat kebutuhan tersebut. Variabilitas curah hujan, suhu, ketersediaan air, dan kondisi tanah dapat memengaruhi pertumbuhan dan produktivitas tanaman tebu. Sistem budidaya yang hanya mengandalkan pengalaman dan observasi manual memiliki keterbatasan dalam merespons perubahan kondisi secara cepat. Oleh karena itu, teknologi sensor, penginderaan jauh, drone, dan AI dapat digunakan untuk memperoleh informasi spasial dan temporal mengenai kondisi tanaman dan lahan. UAV/drone, misalnya, mampu menghasilkan citra dengan resolusi spasial dan temporal yang tinggi sehingga dapat mendukung pemantauan tanaman secara lebih detail serta membantu optimalisasi praktik budidaya (Islam et al., 2021; Maes & Steppe, 2018). Pada saat yang sama, IoT memungkinkan data lingkungan pertanian dikumpulkan secara kontinu dan diintegrasikan dengan sistem analitik untuk mendukung keputusan secara real time (Elijah et al., 2018).

Secara konseptual, pendekatan tersebut sejalan dengan paradigma *Precision Agriculture* dan *Agriculture 4.0*, yaitu pengelolaan pertanian berdasarkan informasi spasial, temporal, dan individual untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya, produktivitas, kualitas, profitabilitas, dan keberlanjutan. Penelitian (Carrer et al., 2022), pada perkebunan tebu di Brasil menunjukkan bahwa adopsi teknologi pertanian presisi berkaitan dengan peningkatan efisiensi teknis dan pengurangan kesenjangan teknologi. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa tingkat pendidikan petani, luas lahan, dan akses terhadap bantuan teknis merupakan faktor yang memengaruhi adopsi teknologi pertanian presisi. Temuan ini menunjukkan bahwa transformasi digital pada perkebunan tebu tidak cukup hanya dengan menyediakan perangkat teknologi, tetapi memerlukan ekosistem yang menghubungkan teknologi, manusia, data, kelembagaan, dan proses pengambilan keputusan.

Literatur internasional memperlihatkan perkembangan yang semakin kuat menuju integrasi AI dan IoT dalam pertanian. Penelitian (Talaviya et al., 2020), menunjukkan bahwa AI dapat digunakan untuk pengelolaan irigasi, pemupukan, pengendalian gulma dan hama, serta peningkatan produktivitas. Penelitian selanjutnya oleh (Javaid et al., 2023),

yang menempatkan AI sebagai salah satu teknologi penting dalam transformasi pertanian menuju sistem yang lebih otomatis dan berbasis data. Sementara itu, kajian mengenai AIIoT menunjukkan bahwa integrasi AI dan IoT memungkinkan data sensor diolah menjadi informasi dan prediksi untuk mendukung pengendalian hama, pemantauan tanaman, dan berbagai keputusan budidaya (Adli et al., 2023). Pada komoditas tebu secara khusus, (Bhatt et al., 2024), menunjukkan bahwa AI memiliki prospek besar dalam prediksi hasil, pengelolaan air, identifikasi penyakit, analisis kondisi tanah, dan pengelolaan produksi yang lebih berkelanjutan.

Meskipun perkembangan penelitian mengenai AI dan pertanian cerdas semakin pesat, masih terdapat kesenjangan penelitian. Sebagian besar penelitian terdahulu berfokus pada penerapan teknologi secara parsial, misalnya penggunaan sensor untuk monitoring, drone untuk pemetaan, *machine learning* untuk prediksi hasil, atau IoT untuk pengumpulan data. Kajian mengenai teknologi digital pada produksi tebu juga menunjukkan bahwa integrasi berbagai perangkat digital masih menghadapi persoalan interoperabilitas, biaya, kesiapan pengguna, dan integrasi data (Molin et al., 2024a). Dengan kata lain, masih diperlukan pendekatan yang memandang perkebunan tebu sebagai suatu ekosistem cerdas, bukan sekadar kumpulan teknologi yang berdiri sendiri.

Kesenjangan tersebut menjadi semakin penting pada konteks petani tebu di daerah. Implementasi teknologi digital harus mempertimbangkan kondisi sosial-ekonomi petani, kemampuan literasi digital, akses terhadap infrastruktur, kapasitas penyuluh, kebutuhan pabrik gula, serta kebijakan pemerintah. Karena itu, model *smart plantation* yang dikembangkan tidak hanya harus menjawab pertanyaan mengenai teknologi apa yang dapat digunakan, tetapi juga bagaimana berbagai teknologi tersebut diintegrasikan ke dalam mekanisme pengambilan keputusan yang dapat digunakan oleh petani, penyuluh, pengelola pabrik gula, dan pemerintah.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini menawarkan *AI-Driven Smart Sugarcane Plantation Ecosystem* sebagai model integratif untuk mendukung Program Bongkar Ratoon dan hilirisasi industri gula berkelanjutan di Kabupaten Bone. Model ini mengintegrasikan *Artificial Intelligence*, *Internet of Things (IoT)*, *drone*, *Geographic Information System (GIS)*, sensor lahan, dan dashboard digital dalam suatu sistem pendukung keputusan. Integrasi tersebut diarahkan untuk menghasilkan rekomendasi berbasis data mengenai waktu tanam dan panen, pemupukan presisi, optimasi irigasi, deteksi dini hama dan penyakit, serta prediksi produktivitas dan rendemen tebu.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada pengembangan model ekosistem perkebunan tebu cerdas yang bersifat integratif dan kontekstual, dengan menghubungkan teknologi AI dan perangkat digital dengan kebutuhan Program Bongkar Ratoon, hubungan petani pabrik gula pemerintah, serta agenda hilirisasi industri gula berkelanjutan. Berbeda dari penelitian terdahulu yang cenderung menguji teknologi secara terpisah atau berfokus pada aspek tertentu seperti prediksi hasil, monitoring tanaman, atau efisiensi input, penelitian ini merancang arsitektur ekosistem yang mengintegrasikan data lahan, tanaman, iklim, dan produksi ke dalam sistem pendukung keputusan. Pendekatan tersebut diharapkan dapat menjembatani kesenjangan antara inovasi teknologi dan kebutuhan praktis pengelolaan perkebunan tebu di tingkat daerah.

Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya menempatkan AI sebagai instrumen otomatisasi, tetapi sebagai infrastruktur pengambilan keputusan berbasis data dalam transformasi perkebunan tebu. Pendekatan tersebut diharapkan dapat meningkatkan efisiensi budidaya, memperkuat koordinasi antara petani, pabrik gula, penyuluh, dan pemerintah, serta meningkatkan kemampuan sistem perkebunan dalam merespons perubahan iklim dan ketidakpastian produksi. Model yang dikembangkan diarahkan untuk mendukung transformasi perkebunan tebu Kabupaten Bone menjadi sistem yang lebih berkelanjutan, unggul, adaptif, dan berdaya saing sekaligus mendukung ketahanan pangan dan industri gula nasional.

Atas dasar permasalahan dan kesenjangan penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan merancang model *AI-Driven Smart Sugarcane Plantation Ecosystem* sebagai solusi transformasi perkebunan tebu berkelanjutan yang mendukung Program Bongkar Ratoon dan hilirisasi industri gula di Kabupaten Bone. Penelitian menggunakan pendekatan *Design Science Research (DSR)* yang dipadukan dengan mixed methods, melalui studi literatur, observasi lapangan, wawancara dengan petani, penyuluh, pengelola pabrik gula, serta analisis kebijakan pemerintah. Data selanjutnya dianalisis menggunakan pendekatan SWOT dan PESTEL untuk merumuskan model implementasi berbasis AI. Dengan pendekatan tersebut, penelitian diharapkan menghasilkan model yang tidak hanya memiliki kontribusi akademik dalam pengembangan konsep *smart plantation*, tetapi juga memiliki relevansi praktis bagi penguatan produktivitas tebu, keberlanjutan industri gula, dan implementasi kebijakan pertanian berbasis teknologi di Kabupaten Bone.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Design Science Research* (DSR) dengan metode *mixed methods*. DSR digunakan karena penelitian bertujuan tidak hanya mengidentifikasi permasalahan dalam pengelolaan perkebunan tebu, tetapi juga menghasilkan artefact berupa model AI-Driven Smart Sugarcane Plantation Ecosystem sebagai solusi untuk mendukung Program Bongkar Ratoon dan hilirisasi industri gula berkelanjutan di Kabupaten Bone. Pendekatan DSR dilakukan melalui tahapan identifikasi masalah, perancangan solusi, pengembangan model, dan evaluasi (Peppers et al., 2007). Sementara itu, *mixed methods* digunakan untuk menggabungkan informasi kualitatif dari kondisi lapangan dengan analisis strategis dalam merumuskan model (Barton, 2020).

1. Lokasi dan Sumber Data

Penelitian berfokus pada perkebunan tebu di Kabupaten Bone, Sulawesi Selatan, yang merupakan salah satu sentra pengembangan tebu di Sulawesi Selatan. Permasalahan yang menjadi fokus meliputi rendahnya adopsi teknologi digital, pengelolaan budidaya yang belum berbasis data, perubahan iklim, serta fluktuasi produktivitas dan rendemen gula.

Data penelitian terdiri atas data primer dan sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi lapangan dan wawancara dengan petani, penyuluh, pengelola pabrik gula, dan pemangku kepentingan pemerintah. Data sekunder diperoleh melalui studi literatur dan analisis kebijakan pemerintah yang berkaitan dengan pengembangan tebu, Bongkar Ratoon, digitalisasi pertanian, dan industri gula.

2. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui:

- a. Studi literatur, untuk mengidentifikasi konsep dan teknologi terkait AI, IoT, smart agriculture, drone, GIS, sensor lahan, dan sistem pendukung keputusan.
- b. Observasi lapangan, untuk mengidentifikasi kondisi aktual budidaya dan permasalahan pelaksanaan Program Bongkar Ratoon.
- c. Wawancara, untuk memperoleh informasi mengenai kebutuhan, kendala, dan kesiapan petani, penyuluh, pabrik gula, serta pemerintah terhadap penerapan teknologi digital.
- d. Analisis kebijakan, untuk memastikan model yang dikembangkan sesuai dengan arah kebijakan pengembangan tebu dan industri gula.

3. Teknik Analisis Data

Data dianalisis secara deskriptif untuk mengidentifikasi permasalahan, kebutuhan pengguna, dan komponen teknologi yang diperlukan. Selanjutnya digunakan dua pendekatan analisis strategis, yaitu SWOT dan PESTEL. Analisis SWOT digunakan untuk mengidentifikasi kekuatan, kelemahan, peluang, dan ancaman dalam penerapan ekosistem perkebunan tebu berbasis AI. Analisis SWOT digunakan untuk mengidentifikasi kondisi internal dan eksternal yang memengaruhi pengembangan model. Analisis tersebut membantu menentukan kekuatan dan kelemahan internal serta peluang dan ancaman eksternal yang perlu diperhatikan dalam implementasi model.

Kemudian Analisis lingkungan makro dilakukan menggunakan PESTEL, yang mencakup aspek *Political, Economic, Social, Technological, Environmental*, dan *Legal*. Analisis PESTEL digunakan untuk mengidentifikasi faktor eksternal yang dapat memengaruhi penerapan teknologi AI dan transformasi digital dalam perkebunan tebu. Hasil analisis SWOT dan PESTEL kemudian diintegrasikan dengan temuan lapangan dan hasil studi literatur untuk merumuskan strategi implementasi model. Pendekatan ini memungkinkan model yang dihasilkan mempertimbangkan bukan hanya aspek teknologi, tetapi juga aspek ekonomi, sosial, kelembagaan, lingkungan, dan kebijakan.

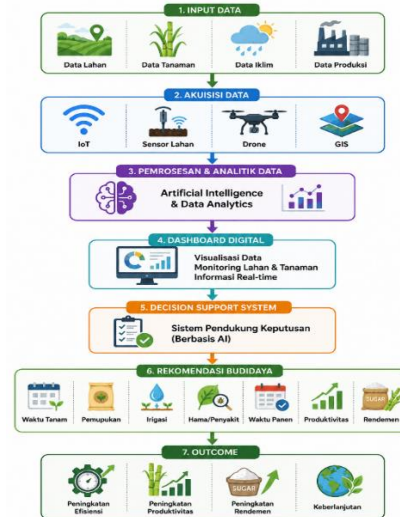
HASIL DAN PEMBAHASAN

a. Pengembangan dan Arsitektur Model *AI-Driven Smart Sugarcane Plantation Ecosystem*

Hasil penelitian menghasilkan model *AI-Driven Smart Sugarcane Plantation Ecosystem* sebagai kerangka ekosistem perkebunan tebu cerdas yang mengintegrasikan teknologi digital dengan proses pengambilan keputusan budidaya. Model ini dikembangkan untuk menjawab permasalahan utama perkebunan tebu di Kabupaten Bone, terutama rendahnya adopsi teknologi digital, pengelolaan budidaya yang belum berbasis data, perubahan iklim, serta fluktuasi produktivitas dan rendemen gula. Kondisi tersebut menunjukkan perlunya perubahan dari sistem pengelolaan konvensional menuju sistem perkebunan yang mampu memanfaatkan data secara terintegrasi.

Model yang dihasilkan mengintegrasikan *Artificial Intelligence (AI)*, *Internet of Things (IoT)*, drone, *Geographic Information System (GIS)*, sensor lahan, dan dashboard digital sebagai satu kesatuan sistem pendukung keputusan. Integrasi tersebut menunjukkan bahwa teknologi tidak ditempatkan sebagai perangkat yang berdiri sendiri, tetapi sebagai

suatu ekosistem yang menghubungkan proses pengumpulan data, pengolahan, analisis, visualisasi, dan pengambilan keputusan. Secara konseptual, arsitektur model terdiri atas beberapa tahapan yang saling berhubungan, yang ditunjukkan pada Gambar 1 sebagai berikut:



Gambar 1. Arsitektur AI-Driven Smart Sugarcane Plantation Ecosystem

Sumber : Diadaptasi dari FAO (2025) dan Tanut et al. (2021).

Arsitektur tersebut menempatkan data sebagai fondasi utama dalam pengelolaan perkebunan. Data lahan, tanaman, iklim, dan produksi menjadi input yang selanjutnya diperoleh dan diperbarui melalui perangkat digital. Data tersebut kemudian diproses menggunakan AI dan data analytics untuk menghasilkan informasi yang dapat digunakan dalam sistem pendukung keputusan. Pendekatan tersebut sejalan dengan perkembangan smart agriculture dan *precision agriculture* yang menempatkan sensor, IoT, UAV, AI, dan analitik data sebagai komponen penting dalam meningkatkan efisiensi pengelolaan tanaman. Integrasi teknologi tersebut memungkinkan pengambilan keputusan dilakukan berdasarkan kondisi aktual dan variasi spasial maupun temporal pada lahan pertanian.

Dalam konteks perkebunan tebu, integrasi data menjadi semakin penting karena produktivitas dan rendemen dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berinteraksi, termasuk kondisi tanah, ketersediaan air, iklim, pengelolaan tanaman, dan waktu panen. Oleh karena itu, pendekatan berbasis ekosistem memungkinkan berbagai sumber informasi tersebut digunakan secara simultan dalam proses pengambilan keputusan.

b. Integrasi Teknologi dan Sistem Pendukung Keputusan

Komponen utama model terdiri atas IoT, sensor lahan, drone, GIS, *Artificial Intelligence*, *data analytics*, dan dashboard digital. Masing-masing teknologi mempunyai fungsi yang berbeda tetapi saling melengkapi. IoT berfungsi sebagai infrastruktur konektivitas yang memungkinkan perangkat dan sensor saling terhubung dan mengirimkan data. Sensor lahan digunakan untuk memperoleh informasi mengenai kondisi lingkungan pertanian, sedangkan drone dapat digunakan untuk memperoleh citra dan informasi spasial mengenai kondisi tanaman. GIS kemudian berfungsi mengorganisasi, menganalisis, dan memvisualisasikan data berdasarkan lokasi geografis. Integrasi teknologi tersebut memungkinkan pengelolaan perkebunan dilakukan dengan tingkat ketelitian yang lebih tinggi dibandingkan pendekatan yang hanya mengandalkan pengamatan manual

Penggunaan drone dan GIS juga memberikan peluang untuk melakukan pemantauan tanaman secara spasial. Informasi mengenai variasi kondisi tanaman dan lahan dapat digunakan untuk menentukan area yang membutuhkan perlakuan tertentu. Dengan demikian, pengelolaan dapat diarahkan pada prinsip *site-specific management*, yaitu perlakuan disesuaikan dengan kondisi spesifik lokasi.

Literatur mengenai digitalisasi produksi tebu menunjukkan bahwa penggunaan berbagai teknologi digital dapat mendukung efisiensi pengelolaan, tetapi tantangan utama terletak pada integrasi perangkat, komunikasi data, dan interoperabilitas antarsistem. Penelitian (Molin et al., 2024), menunjukkan bahwa digitalisasi produksi tebu membutuhkan integrasi berbagai teknologi dan sumber data agar teknologi dapat memberikan manfaat secara optimal.

Selanjutnya, Artificial Intelligence dan data analytics menjadi komponen analitik utama dalam model. AI digunakan untuk mengolah data yang berasal dari berbagai sumber sehingga dapat menghasilkan pola, prediksi, dan rekomendasi. Dalam model penelitian ini, AI diarahkan untuk mendukung prediksi produktivitas dan rendemen, deteksi dini hama dan penyakit, optimasi irigasi, pemupukan presisi, serta penentuan waktu tanam dan panen.

Dalam Penelitian (Bhatt et al., 2024), menunjukkan bahwa AI mempunyai potensi besar dalam pengembangan produksi tebu berkelanjutan, terutama untuk prediksi produktivitas, identifikasi penyakit, optimasi penggunaan air, analisis kondisi tanah, dan adaptasi terhadap perubahan iklim. Dengan demikian, penerapan AI pada model penelitian ini tidak hanya berfungsi sebagai alat otomatisasi, tetapi sebagai decision intelligence yang membantu mengubah data menjadi rekomendasi operasional.

Hasil analisis kemudian ditampilkan melalui dashboard digital. Dashboard berfungsi sebagai antarmuka antara sistem analitik dengan pengguna. Informasi mengenai kondisi lahan, tanaman, iklim, produktivitas, dan rekomendasi dapat disajikan dalam bentuk yang lebih mudah dipahami oleh petani, penyuluh, pengelola pabrik gula, maupun pemerintah. Dengan demikian, dashboard tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi, tetapi juga menjadi bagian dari *Decision Support System* (DSS). Sistem tersebut menghubungkan data dan hasil analisis dengan keputusan budidaya. Posisi dashboard sebagai penghubung antara teknologi dan pengguna menjadi penting karena keberhasilan transformasi digital tidak hanya ditentukan oleh kecanggihan teknologi, tetapi juga oleh kemampuan teknologi tersebut menyediakan informasi yang relevan dan dapat digunakan oleh pemangku kepentingan.

c. Implementasi Model untuk Budidaya, Bongkar Ratoon, dan Keberlanjutan

Hasil utama model selanjutnya diwujudkan dalam bentuk rekomendasi budidaya berbasis AI, yang meliputi waktu tanam, pemupukan, irigasi, pengendalian hama dan penyakit, waktu panen, produktivitas, dan rendemen. Rekomendasi waktu tanam dan panen memungkinkan keputusan budidaya mempertimbangkan kondisi iklim, tanaman, lahan, serta histori produksi. Hal ini penting karena ketepatan waktu tanam dan panen dapat memengaruhi pertumbuhan tanaman dan kualitas bahan baku yang masuk ke pabrik gula.

Pada aspek pemupukan, sistem diarahkan pada penerapan pemupukan presisi. Data kondisi lahan dan tanaman dapat digunakan untuk menentukan kebutuhan input secara lebih spesifik sehingga penggunaan pupuk dapat dilakukan secara lebih efisien. Pendekatan tersebut berpotensi mengurangi pemborosan input sekaligus mendukung produktivitas. Pada aspek irigasi, integrasi sensor lahan dan data iklim memungkinkan sistem memperoleh informasi mengenai kondisi air dan lingkungan tanaman. Informasi tersebut kemudian dapat digunakan untuk mendukung keputusan mengenai kebutuhan dan waktu pemberian air. Pendekatan ini semakin penting dalam menghadapi perubahan iklim dan ketidakpastian ketersediaan air.

Pada aspek hama dan penyakit, citra drone dan analisis AI dapat digunakan untuk mendukung deteksi dini. Identifikasi gangguan tanaman pada tahap awal memungkinkan tindakan pengendalian dilakukan lebih cepat sebelum kerusakan menyebar. Kajian mengenai keberlanjutan tebu dalam kondisi perubahan iklim juga menekankan pentingnya pendekatan adaptif dan prediktif dalam menghadapi hama, penyakit, dan tekanan lingkungan. Selanjutnya, kemampuan prediksi produktivitas dan rendemen mempunyai

nilai strategis bagi petani maupun pabrik gula. Bagi petani, informasi tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan hasil produksi, sedangkan bagi pabrik gula dapat digunakan dalam perencanaan kebutuhan bahan baku dan pengelolaan produksi.

Model ini memiliki relevansi langsung terhadap Program Bongkar Ratoon. Implementasi Bongkar Ratoon membutuhkan keputusan mengenai kondisi tanaman, kesiapan lahan, waktu tanam kembali, penggunaan input, dan pengelolaan tanaman setelah pembongkaran. *AI-Driven Smart Sugarcane Plantation Ecosystem* dapat berfungsi sebagai sistem pendukung implementasi Bongkar Ratoon berbasis data, sehingga keputusan tidak semata-mata bergantung pada pengalaman, tetapi juga mempertimbangkan data aktual lahan, tanaman, iklim, dan produksi.

Dalam konteks ini, teknologi tidak dimaksudkan untuk menggantikan peran petani dan penyuluh. Sebaliknya, teknologi berfungsi memperkuat kemampuan mereka dalam memperoleh informasi dan membuat keputusan. Petani tetap menjadi aktor utama dalam pelaksanaan budidaya, sedangkan AI memberikan informasi prediktif yang dapat menjadi dasar pertimbangan keputusan.

Model juga memiliki dimensi ekosistem kelembagaan. Petani membutuhkan informasi budidaya, penyuluh berperan dalam pendampingan, pabrik gula membutuhkan informasi mengenai estimasi produksi dan rendemen, sedangkan pemerintah membutuhkan informasi untuk perencanaan dan evaluasi kebijakan. Oleh karena itu, dashboard digital dapat dikembangkan sebagai platform yang memperkuat integrasi petani, penyuluh, pabrik gula dan pemerintah. Integrasi tersebut mendukung capaian akhir model berupa peningkatan efisiensi, produktivitas, rendemen, dan keberlanjutan. Efisiensi diperoleh melalui penggunaan input dan sumber daya secara lebih tepat, produktivitas didukung melalui pengelolaan tanaman berbasis data, sedangkan rendemen didukung melalui pengelolaan tanaman dan waktu panen yang lebih baik.

Aspek keberlanjutan menjadi bagian penting karena perkebunan tebu menghadapi perubahan iklim, tekanan terhadap sumber daya air dan tanah, serta kebutuhan untuk meningkatkan produksi tanpa meningkatkan penggunaan sumber daya secara tidak efisien. Penelitian (Bhatt et al., 2024), menunjukkan bahwa AI berpotensi mendukung efisiensi air, pengelolaan tanah dan tanaman, prediksi produktivitas, serta adaptasi produksi tebu terhadap perubahan iklim. Dengan demikian, keberlanjutan dalam model tidak hanya dipahami sebagai peningkatan produksi, tetapi juga sebagai kemampuan sistem perkebunan untuk mempertahankan produktivitas melalui penggunaan sumber daya yang lebih efisien dan peningkatan kapasitas adaptasi terhadap perubahan lingkungan.

d. Analisis Strategis, Kebaruan, dan Implikasi Model

Untuk memastikan model dapat diterapkan dalam konteks Kabupaten Bone, penelitian menggunakan analisis SWOT dan PESTEL. Kedua pendekatan tersebut digunakan untuk merumuskan model implementasi berbasis AI. Dari perspektif SWOT, kekuatan model terletak pada integrasi berbagai teknologi dalam satu sistem, kemampuan menghasilkan informasi berbasis data, serta dukungannya terhadap proses pengambilan keputusan. Kelemahan yang perlu diperhatikan meliputi kebutuhan infrastruktur digital, kualitas dan ketersediaan data, kapasitas sumber daya manusia, serta biaya implementasi teknologi.

Sementara itu, peluang berasal dari meningkatnya kebutuhan digitalisasi pertanian, perkembangan teknologi AI dan IoT, program peningkatan produktivitas tebu, serta kebijakan pemerintah yang mendorong swasembada dan hilirisasi industri gula. Adapun ancaman dapat berasal dari keterbatasan konektivitas, kesenjangan literasi digital, resistensi terhadap perubahan, biaya teknologi, keamanan data, dan ketergantungan terhadap infrastruktur digital.

Analisis PESTEL memperluas analisis tersebut dengan mempertimbangkan lingkungan makro. Aspek politik berkaitan dengan kebijakan pemerintah mengenai tebu dan swasembada gula; aspek ekonomi berkaitan dengan investasi teknologi, biaya produksi, produktivitas, dan manfaat ekonomi; aspek sosial berkaitan dengan kemampuan, literasi, dan penerimaan petani; aspek teknologi berkaitan dengan AI, IoT, drone, GIS, sensor, dan konektivitas; aspek lingkungan berkaitan dengan perubahan iklim, air, tanah, hama, dan penyakit; sedangkan aspek legal berkaitan dengan regulasi pertanian, teknologi digital, dan tata kelola data.

Hasil sintesis tersebut memperlihatkan bahwa penerapan teknologi pada perkebunan tebu tidak dapat hanya dilihat dari aspek teknis. Faktor manusia, kelembagaan, ekonomi, infrastruktur, lingkungan, dan kebijakan harus menjadi bagian dari rancangan model. Hal tersebut sejalan dengan penelitian mengenai adopsi teknologi pertanian presisi pada tebu yang menunjukkan bahwa adopsi teknologi dipengaruhi oleh faktor ekonomi, kapasitas pengguna, pendidikan, bantuan teknis, dan kesiapan teknologi.

Berdasarkan hasil tersebut, kebaruan (*novelty*) penelitian terletak pada pengembangan model ekosistem perkebunan tebu yang mengintegrasikan AI, IoT, sensor lahan, drone, GIS, dan dashboard digital dalam satu sistem pendukung keputusan yang secara spesifik diarahkan untuk mendukung Program Bongkar Ratoon dan hilirisasi industri gula berkelanjutan di Kabupaten Bone. Kebaruan tersebut berbeda dari pendekatan

yang menggunakan teknologi secara parsial, misalnya AI hanya untuk prediksi produktivitas, drone hanya untuk pemantauan tanaman, atau sensor hanya untuk monitoring kondisi lahan. Model penelitian ini menghubungkan seluruh komponen tersebut dalam suatu alur dari:

Data → Teknologi → Analitik → Keputusan → Rekomendasi → Outcome.

Secara akademik, model memberikan kontribusi terhadap pengembangan konsep smart plantation dengan menempatkan AI bukan sekadar sebagai alat prediksi, tetapi sebagai bagian dari ekosistem pengambilan keputusan. Secara praktis, model dapat menjadi kerangka awal bagi pemerintah, petani, penyuluh, dan pabrik gula dalam mengembangkan transformasi digital perkebunan tebu. Implikasi penelitian selanjutnya adalah perlunya pengembangan model konseptual menjadi prototipe yang dapat diuji menggunakan data aktual. Pengujian selanjutnya dapat diarahkan pada akurasi model AI, integrasi sensor secara *real-time*, penggunaan drone dan GIS pada areal pertanaman, serta pengukuran manfaat ekonomi dan teknis bagi petani dan industri gula.

Dengan demikian, hasil penelitian menunjukkan bahwa transformasi perkebunan tebu melalui AI membutuhkan pendekatan ekosistem, bukan sekadar adopsi teknologi individual. Integrasi data, teknologi, manusia, kelembagaan, dan proses pengambilan keputusan menjadi fondasi untuk mewujudkan perkebunan tebu yang lebih efisien, produktif, adaptif, berkelanjutan, dan berdaya saing. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang menempatkan model sebagai instrumen untuk memperkuat integrasi petani, pabrik gula, dan pemerintah serta mendukung transformasi perkebunan tebu berkelanjutan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menghasilkan model AI-Driven Smart Sugarcane Plantation Ecosystem sebagai kerangka transformasi perkebunan tebu berbasis teknologi untuk mendukung Program Bongkar Ratoon dan hilirisasi industri gula berkelanjutan di Kabupaten Bone. Model tersebut mengintegrasikan Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), drone, *Geographic Information System* (GIS), sensor lahan, dan dashboard digital ke dalam suatu sistem pendukung keputusan. Integrasi tersebut memungkinkan pemanfaatan data lahan, tanaman, iklim, dan produksi untuk mendukung rekomendasi waktu tanam dan panen, pemupukan presisi, optimasi irigasi, deteksi dini hama dan penyakit, serta prediksi produktivitas dan rendemen tebu.

Model ini memberikan kontribusi konseptual dalam membangun ekosistem perkebunan tebu yang menghubungkan teknologi, data, dan pemangku kepentingan, sehingga dapat memperkuat koordinasi antara petani, penyuluh, pabrik gula, dan pemerintah. Penerapan model diharapkan mendukung peningkatan efisiensi, produktivitas, rendemen, dan keberlanjutan perkebunan tebu serta memperkuat ketahanan pangan dan industri gula nasional.

Sebagai tindak lanjut, model yang dihasilkan perlu dikembangkan dari tahap konseptual menuju prototipe dan implementasi terbatas (*pilot project*) pada wilayah perkebunan tebu yang representatif. Pengujian selanjutnya perlu menggunakan data aktual untuk mengevaluasi akurasi AI dalam prediksi produktivitas dan rendemen, deteksi hama dan penyakit, optimasi irigasi, serta rekomendasi waktu tanam dan panen. Selain aspek teknis, implementasi juga perlu memperhatikan kesiapan infrastruktur digital, kapasitas petani dan penyuluh, integrasi data antarpemangku kepentingan, biaya penerapan, serta aspek sosial, ekonomi, lingkungan, dan kelembagaan. Dengan pengembangan dan evaluasi secara bertahap, model ini diharapkan dapat menjadi sistem pendukung keputusan yang aplikatif, berkelanjutan, dan dapat direplikasi pada wilayah sentra tebu lainnya.

DAFTAR PUSTAKA

- Adli, H. K. (2023). Recent Advancements and Challenges of AIoT Application in Smart Agriculture: A Review. *Sensors*, 1-2.
- Barton, G. (2020). Designing and Conducting Mixed Methods Research (3rd Edition; International Student Edition). *The Cognitive Psychology Bulletin*, 88-89.
- Ben Ayed, R. &. (2021). Artificial Intelligence to Improve the Food and Agriculture Sector. *Journal of Food Quality*, 1-2.
- Bhatt, R. A. (2024). Prospects of Artificial Intelligence for the Sustainability of Sugarcane Production in the Modern Era of Climate Change: An Overview of Related Global Findings. *Journal of Agriculture and Food Research*, 1-2.
- Carrer, M. H. (2022). Precision Agriculture Adoption and Technical Efficiency: An Analysis of Sugarcane Farms in Brazil. *Technological Forecasting and Social Change*, 121510.
- Elijah, O. T. (2018). An Overview of Internet of Things (IoT) and Data Analytics in Agriculture: Benefits and Challenges. *IEEE Internet of Things Journal*, 3758-3759.

- Fitianto, D. Y. (2024). Analisis Kelayakan Usaha Tani Tebu Bongkar Ratoon (Studi Kasus Petani di Kecamatan Pagu). *Mimbar Agribisnis: Jurnal Pemikiran Masyarakat Ilmiah Berwawasan Agribisnis*, Vol.10, No. 2, 3238-3239.
- Herniwati, F. D. (2014). Prospek Pengembangan Bibit Tebu Asal Kultur Jaringan di Sulawesi Selatan. *Semiloka Nasional: Tanaman Pemanis, Serat, Tembakau dan Minyak Industri* (pp. 55-56). Makassar: Balai Besar Perpustakaan dan Literasi Pertanian.
- Islam, N. M. (2021). A Review of Applications and Communication Technologies for Internet of Things (Iot) and Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Based Sustainable Smart Farming. *Sustainability (Switzerland)*, 1-2.
- Javaid, M. A. (2023). Understanding the potential applications of Artificial Intelligence in Agriculture Sector. *Advanced Agrochem*, 15-16.
- Maes, W. &. (2018). Perspectives for Remote Sensing with Unmanned Aerial Vehicles in Precision Agriculture. *Trends in Plant Science*, 1-2.
- Molin, J. P. (2024). Challenges of Digital Solutions in Sugarcane Crop Production: A Review. *AgriEngineering*, 925-926.
- Molin, J. P. (2024). Challenges of Digital Solutions in Sugarcane Crop Production: A Review. *AgriEngineering*, 925-926.
- Peffer, K. T. (2007). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems*, 45-46.
- Pertanian, K. (2024). *Laporan Kinerja Direktorat Tanaman Semusim dan Tahunan Tahun 2023*. Jakarta: Direktorat Jenderal Perkebunan, Kementerian Pertanian Republik Indonesia.
- Talaviya, T. D. (2020). Implementation of Artificial Intelligence in Agriculture for Optimisation of Irrigation and Application of Pesticides and Herbicides. *Artificial Intelligence in Agriculture* 4, 58-59.