

PENDEKATAN TEKNIK INDUSTRI DALAM BUDIDAYA TANAMAN ANTI OKSIDAN

Ai Nurhayati¹

Program Studi Teknik Industri ¹
Universitas Teknologi Bandung¹
ai.nurhayati@utb-univ.ac.id¹

Abstrak

Tanaman yang mengandung senyawa antioksidan seperti rosela, pegagan, dan kemangi memiliki nilai ekonomis tinggi serta manfaat kesehatan yang luas, terutama di bidang pangan fungsional, farmasi, dan kosmetik. Namun, proses budidaya tanaman ini masih menghadapi tantangan terkait efisiensi dan keberlanjutan. Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah bagaimana pemanfaatan sains dan teknologi, khususnya dari perspektif teknik industri, dapat meningkatkan efisiensi dan mutu dalam sistem budidaya tanaman antioksidan. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), manajemen rantai pasok, dan metode *lean* dalam sistem produksi pertanian tanaman antioksidan. Metode penelitian dilakukan melalui studi literatur dan analisis sistem produksi berbasis teknologi. Studi kasus digunakan untuk menelaah implementasi sensor IoT dalam pemantauan lingkungan budidaya, penerapan prinsip *lean agriculture*, serta penerapan sistem manajemen mutu dan simulasi proses budidaya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi sensor suhu, kelembapan tanah, dan intensitas cahaya dengan sistem irigasi otomatis dapat menghemat air dan menjaga kualitas tanaman. Penerapan *lean agriculture* melalui eliminasi pemborosan dan visual *management* mampu meningkatkan efisiensi operasional. Selain itu, penggunaan sistem manajemen mutu dan *traceability*, seperti QR code dan ERP, mendukung jaminan mutu produk serta transparansi rantai pasok. Simulasi menggunakan perangkat lunak industri seperti FlexSim membantu mengidentifikasi *bottleneck* dan mengoptimalkan tata letak lahan. Kesimpulannya, pendekatan teknik industri dalam budidaya tanaman antioksidan secara signifikan dapat meningkatkan efisiensi, mutu, dan keberlanjutan produksi. Integrasi sains dan teknologi menjadi kunci dalam menciptakan sistem pertanian yang modern dan kompetitif. Kolaborasi lintas disiplin antara teknik industri, pertanian, dan teknologi informasi sangat diperlukan untuk penerapan sistem ini secara efektif di lapangan. Kata kunci : IoT, manajemen rantai pasok, pertanian *lean*, pertanian presisi, tanaman antioksidan.

Abstract

Plants rich in antioxidant compounds such as roselle, gotu kola, and basil hold high economic value and offer significant health benefits, especially in the fields of functional food, pharmaceuticals, and cosmetics. However, their cultivation still faces major challenges in terms of efficiency and sustainability. This study examines the application of science and technology, particularly from an industrial engineering perspective, to enhance the efficiency and quality of antioxidant plant cultivation systems. The objective is to analyze the application of technologies, including the Internet of Things (IoT), supply chain management, and lean methods, in agricultural production systems. The research method involved a literature review and analysis of technology-based production systems for antioxidant plants. Case studies were employed to examine the implementation of IoT sensors for monitoring environmental parameters, the adoption of lean agriculture principles, as well as the use of quality management systems and process simulations. The findings indicate that integrating temperature, soil moisture, and light intensity sensors with automated irrigation systems can significantly conserve water and maintain plant quality. The application of lean agriculture principles—such as waste elimination and visual management—enhances operational efficiency. Moreover, quality assurance and traceability systems using QR codes and ERP (Enterprise Resource Planning) support product standardization and supply chain transparency. Process simulation with industrial software like FlexSim helps identify bottlenecks and optimize land layout. In conclusion, applying industrial engineering approaches in antioxidant plant cultivation significantly improves efficiency, quality, and sustainability. The integration of science and technology is essential for developing a modern and competitive agricultural system. Effective implementation requires multidisciplinary collaboration among experts in agriculture, industrial engineering, and information technology.

Keywords : Antioxidant plants, IoT, lean agriculture, precision agriculture, supply chain management.

I. PENDAHULUAN

Permintaan global terhadap produk berbasis herbal dan pangan fungsional semakin meningkat seiring meningkatnya kesadaran masyarakat akan pentingnya gaya hidup sehat dan konsumsi produk alami [1]. Tanaman seperti rosela (*Hibiscus sabdariffa*), pegagan (*Centella asiatica*), kemangi (*Ocimum sanctum*) serta lidah buaya dikenal mengandung senyawa antioksidan tinggi yang bermanfaat untuk menangkal radikal bebas, memperkuat sistem imun, serta mendukung proses regenerasi sel [2]. Contoh tanaman antioksidan yaitu tanaman kemangi dapat dilihat pada Gambar 1. Potensi ekonomi tanaman-tanaman ini tidak hanya terbatas pada konsumsi domestik, tetapi juga terbuka luas dalam pasar ekspor di sektor pangan, farmasi, dan kosmetik [3].



Gambar 1. Tanaman kemangi

Namun demikian, tantangan utama dalam pengembangan budidaya tanaman antioksidan di Indonesia terletak pada keterbatasan teknologi dan sistem produksi yang masih bersifat konvensional [4]. Proses budidaya yang tidak terstandarisasi, penggunaan input pertanian yang kurang efisien, serta ketidaksesuaian antara jadwal tanam dan permintaan pasar menyebabkan inefisiensi yang berdampak pada rendahnya produktivitas dan daya saing hasil pertanian [5]. Di sisi lain, sektor pertanian belum sepenuhnya memanfaatkan perkembangan teknologi digital dan prinsip manajemen modern seperti yang diterapkan di sektor manufaktur [6].

Teknik industri sebagai disiplin yang berfokus pada efisiensi, produktivitas, dan optimalisasi sistem, memiliki potensi besar untuk diadaptasi dalam sistem produksi pertanian [7]. Penerapan prinsip-prinsip *lean manufacturing* dalam konteks pertanian, yang dikenal sebagai *lean agriculture*, dapat mengurangi pemborosan sumber daya dan meningkatkan efektivitas operasional [8]. Demikian pula, teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan pemantauan *real-time* terhadap parameter lingkungan seperti suhu, kelembaban, dan intensitas cahaya, yang penting dalam proses budidaya [9]. Sistem manajemen mutu berbasis perangkat lunak *Enterprise Resource Planning* (ERP) juga dapat diadopsi untuk mendukung transparansi, *traceability*, serta pengambilan keputusan berbasis data [10].

Hasil studi oleh Zhang et al. menunjukkan bahwa integrasi teknik industri dalam budidaya tanaman herbal dapat mengoptimalkan penggunaan lahan, meningkatkan hasil panen, dan mempercepat proses distribusi melalui sistem rantai pasok yang efisien [11]. Oleh karena itu, pendekatan multidisipliner yang menggabungkan pertanian, teknologi informasi, dan teknik industri dinilai sangat relevan untuk menjawab tantangan dalam pengembangan pertanian berkelanjutan di era digital. Berdasarkan latar belakang di atas, permasalahan utama yang diangkat dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana penerapan teknologi dan prinsip teknik industri dapat meningkatkan efisiensi dan mutu dalam budidaya tanaman antioksidan?
2. Teknologi apa saja yang relevan dan aplikatif dalam mendukung sistem produksi pertanian tanaman antioksidan?
3. Bagaimana desain sistem budidaya yang efisien dan berkelanjutan dari perspektif teknik industri?

Penelitian ini dimaksudkan untuk mengeksplorasi pemanfaatan sains dan teknologi dalam sistem budidaya tanaman antioksidan dengan pendekatan teknik industri. Adapun tujuan khusus dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis tantangan dan peluang dalam budidaya tanaman antioksidan secara efisien dan terstandar.
2. Mengkaji penerapan teknologi seperti IoT, *lean agriculture*, dan sistem manajemen mutu dalam proses budidaya.
3. Merancang model sistem budidaya berbasis teknologi yang efisien, berkelanjutan, dan dapat diterapkan dalam skala industri kecil hingga menengah.

Dengan tercapainya tujuan tersebut, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi strategis dalam transformasi sektor pertanian tradisional menjadi sistem pertanian modern berbasis teknologi dan efisiensi.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Landasan teori dalam tinjauan pustaka ini bertujuan untuk menjelaskan konsep-konsep ilmiah yang melandasi pemanfaatan pendekatan teknik industri dalam sistem budidaya tanaman antioksidan. Dengan memahami teori-teori ini, perancangan sistem budidaya dapat dilakukan secara efisien, efektif, dan berkelanjutan.

1. Tanaman Antioksidan dan Potensinya

Tanaman seperti rosela (*Hibiscus sabdariffa*), pegagan (*Centella asiatica*), kemangi (*Ocimum basilicum*) serta lidah buaya dikenal kaya akan senyawa antioksidan seperti flavonoid dan polifenol [12]. Senyawa ini mampu menangkal radikal bebas dan berpotensi digunakan dalam industri pangan fungsional, farmasi, hingga kosmetik [13]. Budidaya tanaman antioksidan memerlukan standard tertentu agar kandungan senyawa aktif tetap tinggi, sehingga pendekatan berbasis sistem produksi menjadi relevan [14].

2. Teknik Industri dalam Sistem Produksi Pertanian

Teknik industri berperan penting dalam peningkatan efisiensi, optimalisasi aliran kerja, dan pengurangan pemborosan dalam sistem produksi. Dalam konteks budidaya tanaman, pendekatan ini dapat diterapkan untuk merancang proses tanam, panen, dan distribusi yang efisien dan responsif terhadap permintaan pasar [15]. *Tools* seperti pemodelan proses, perencanaan produksi, dan *lean thinking* digunakan dalam mendesain sistem pertanian yang modern [16].

3. *Internet of Things* (IoT) dalam Pertanian Presisi

IoT (*Internet of Things*) memungkinkan pengumpulan data lingkungan secara *real-time* melalui sensor suhu, kelembaban tanah, dan pencahayaan. Data ini digunakan untuk mengontrol sistem irigasi otomatis, yang tidak hanya menghemat air tetapi juga menjaga kualitas pertumbuhan tanaman [17]. IoT juga memungkinkan pemantauan jarak jauh melalui perangkat *mobile*, meningkatkan pengambilan keputusan berbasis data [18].

4. *Lean Agriculture*

Lean Agriculture merupakan penerapan prinsip *lean manufacturing* di sektor pertanian, terutama dalam menghilangkan pemborosan (*waste*), meningkatkan nilai tambah, dan menerapkan *continuous improvement* secara berkelanjutan [19]. Teknik seperti 5S, visual management, dan Kanban dapat digunakan untuk merencanakan penjadwalan tanam dan panen sesuai permintaan pasar [20].

5. Sistem Manajemen Mutu dan *Traceability*

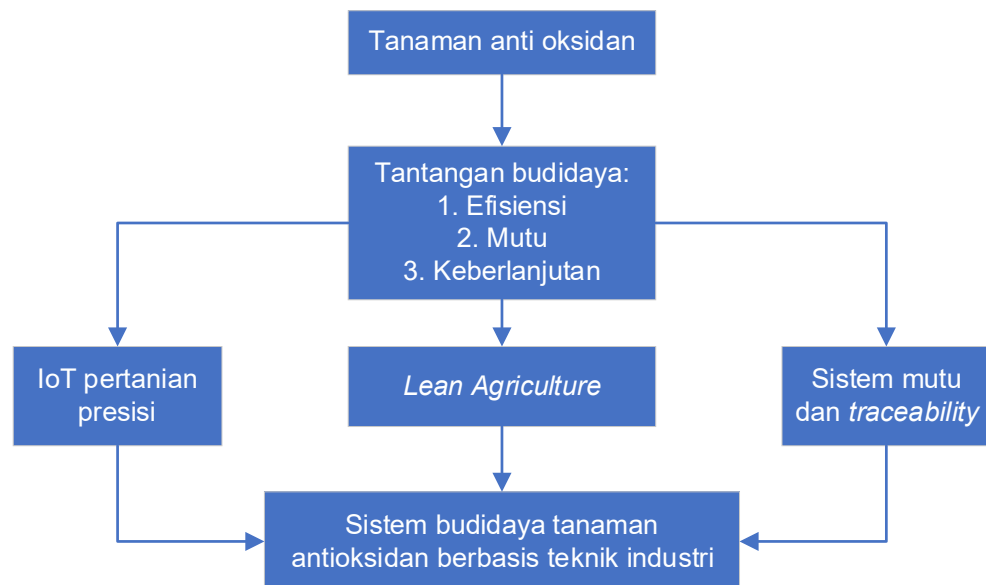
Dalam industri berbasis tanaman herbal dan pangan fungsional, standardisasi dan jaminan mutu sangat krusial. Sistem manajemen mutu seperti ISO 22000, dikombinasikan dengan *traceability* berbasis QR Code dan ERP (*Enterprise Resource Planning*), memungkinkan pelacakan proses produksi dari ladang ke konsumen [21]. Hal ini penting dilakukan untuk menjamin keamanan produk dan meningkatkan kepercayaan konsumen.

6. Simulasi dan Optimasi Proses Produksi

Software simulasi seperti FlexSim dan AnyLogic digunakan untuk memodelkan proses budidaya, mengidentifikasi *bottleneck*, dan menguji berbagai skenario produksi tanpa harus mencoba langsung di lapangan. Simulasi ini dapat membantu merancang tata letak lahan, menentukan kapasitas optimal, serta mengevaluasi dampak perubahan skenario produksi [22].

7. Kerangka Pemikiran Visual

Kerangka pemikiran ini menggambarkan alur logis dari tantangan budidaya tanaman antioksidan menuju solusi integratif berbasis teknik industri dan teknologi.



Gambar 2. Diagram kerangka konseptual

8. Analisis Perbandingan Antar Teori

TABEL I
PERBANDINGAN ANTAR TEORI

Prinsip	Fokus Utama	Kelebihan	Kelemahan
Teknik Industri	Efisiensi sistem produksi	Pendekatan sistematis dan terukur	Kurang memperhatikan aspek biologis tanaman
IoT Pertanian Presisi	Monitoring otomatis berbasis data	<i>Real-time</i> , efisiensi energi dan air	Butuh infrastruktur dan biaya awal

<i>Lean Agriculture</i>	Pengurangan pemborosan (<i>waste</i>)	Mudah diterapkan, efisien, adaptif	Butuh kedisiplinan implementasi
Sistem Manajemen Mutu & <i>Traceability</i>	Standardisasi dan kepercayaan produk	Meningkatkan nilai tambah dan keamanan	Implementasi kompleks untuk UMKM
Simulasi Proses Produksi	Optimasi dan prediksi proses budidaya	Efektif untuk perencanaan dan pengambilan keputusan	Butuh keahlian dan perangkat lunak khusus

III. METODE PENELITIAN

1. Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kualitatif dengan pendekatan studi literatur dan studi kasus. Penelitian dilakukan untuk menganalisis potensi penerapan pendekatan teknik industri dalam sistem budidaya tanaman antioksidan, seperti rosela, pegagan, dan kemangi, guna meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan keberlanjutan proses budidaya tersebut. Pendekatan teknik industri digunakan sebagai landasan konseptual untuk mengidentifikasi masalah dalam proses budidaya dan menawarkan solusi berbasis teknologi dan manajemen sistem [23]. Fokus utama penelitian ini adalah pada pengintegrasian teknologi pertanian presisi seperti *Internet of Things* (IoT), penerapan metode *lean agriculture*, manajemen mutu berbasis ERP, serta simulasi proses menggunakan perangkat lunak industri.

2. Sumber dan Jenis Data

Penelitian menggunakan data sekunder yang diperoleh dari:

- Literatur ilmiah, termasuk jurnal internasional, buku akademik, laporan penelitian, dan artikel teknologi pertanian dan teknik industri.
- Studi kasus dokumentatif, terutama dari implementasi teknologi IoT, sistem ERP, dan *lean agriculture* dalam sektor budidaya tanaman herbal yang dilaporkan dalam literatur.

Jenis data mencakup deskripsi sistem budidaya tanaman antioksidan, data teknis penerapan teknologi, efisiensi proses, dan model sistem produksi berbasis simulasi.

3. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui:

a. Studi Literatur

Mengkaji publikasi dan referensi ilmiah terkait teknologi pertanian presisi, sistem manajemen mutu, prinsip *lean manufacturing*, dan sistem informasi pertanian berbasis digital.

b. Analisis Studi Kasus

Menggunakan data dokumentatif dari studi-studi yang telah menerapkan IoT dalam budidaya tanaman herbal, implementasi sistem manajemen mutu, serta penggunaan *software* simulasi industri dalam sektor pertanian.

c. Dokumentasi Model Sistem

Informasi diperoleh dari dokumentasi rancangan sistem budidaya berbasis teknik industri, seperti penerapan visual *management*, pemetaan rantai pasok, dan simulasi proses produksi pertanian.

4. Teknik Analisis Data

Data dianalisis secara deskriptif dan sistematis untuk menghasilkan model penerapan pendekatan teknik industri dalam budidaya tanaman antioksidan. Langkah-langkah analisis yang dilakukan meliputi:

a. Analisis Integrasi IoT

Menilai manfaat penggunaan sensor suhu, kelembaban tanah, dan cahaya dalam mendukung otomatisasi sistem irigasi dan pemantauan lingkungan budidaya.

b. Evaluasi Penerapan *Lean Agriculture*

Menganalisis proses budidaya berdasarkan prinsip *lean*, seperti eliminasi pemborosan, penjadwalan berbasis Kanban, dan perbaikan berkelanjutan.

c. Analisis Sistem Manajemen Mutu dan *Traceability*

Meninjau peran sistem ERP dan QR code dalam menjamin standard mutu dan transparansi rantai pasok hasil panen tanaman antioksidan.

d. Simulasi Proses Produksi

Menggunakan perangkat lunak simulasi industri (misalnya FlexSim atau AnyLogic) untuk memetakan proses budidaya, mengidentifikasi *bottleneck*, serta mengoptimalkan *layout* dan alur proses.

5. Tahapan Pelaksanaan Penelitian

Penelitian dilaksanakan melalui tahapan sebagai berikut:

- Identifikasi Masalah: Merumuskan permasalahan budidaya tanaman antioksidan dari sisi efisiensi dan keberlanjutan sistem produksi
- Studi Literatur dan Pengumpulan Data Sekunder: mengumpulkan referensi akademik yang relevan sebagai dasar teori dan data analisis.

- c. Analisis Model Penerapan Teknik Industri: Menganalisis data untuk menyusun model sistem budidaya tanaman antioksidan dengan pendekatan teknik industri.
- d. Studi Kasus dan Simulasi: Menganalisis implementasi nyata dari pendekatan teknologi, termasuk pemanfaatan IoT dan metode *lean* di lapangan.
- e. Penyusunan Rekomendasi Sistem Produksi Terintegrasi: Merancang model sistem budidaya efisien dan terstandar yang dapat diterapkan secara praktis di sektor pertanian herbal.

IV. HASIL PENELITIAN

1. Integrasi Teknologi IoT dalam Budidaya Tanaman Antioksidan

Hasil analisis menunjukkan bahwa pemanfaatan *Internet of Things* (IoT) dapat memberikan dampak signifikan dalam pengelolaan lahan budidaya tanaman antioksidan. Sensor-sensor seperti suhu, kelembaban tanah, dan intensitas cahaya telah digunakan di beberapa studi kasus untuk mengumpulkan data secara *real-time*. Data ini kemudian diproses dan dihubungkan dengan sistem irigasi otomatis yang dapat menyesuaikan kebutuhan air secara presisi. Hasilnya, penggunaan air menjadi lebih efisien, dan kondisi pertumbuhan tanaman dapat dikendalikan secara optimal. Contoh penerapan IoT adalah sistem pemantauan berbasis sensor yang dihubungkan ke aplikasi seluler, memungkinkan petani mengetahui kondisi lahan tanpa harus hadir secara fisik. Hal ini sangat membantu dalam menjaga kualitas tanaman seperti rosela dan pegagan yang sensitif terhadap kelembaban tanah.

2. Teknik Industri dalam Sistem Produksi Pertanian

Prinsip *lean manufacturing* yang diadaptasi dalam sektor pertanian, dikenal sebagai *lean agriculture*, juga terbukti mampu meningkatkan efisiensi proses budidaya. Dalam studi ini, beberapa konsep *lean* yang berhasil diterapkan antara lain:

- a. Eliminasi pemborosan (*waste*): seperti waktu tunggu dalam proses penanaman dan panen, serta pemakaian pupuk dan air yang tidak terukur.
- b. Visual *management*: menggunakan papan informasi atau kode warna untuk menandai status tanaman dan jadwal panen.
- c. Sistem Kanban sederhana: digunakan untuk penjadwalan tanam dan panen berdasarkan permintaan pasar, menghindari kelebihan produksi yang tidak terserap.

Implementasi prinsip *lean* ini membantu petani untuk fokus pada aktivitas yang bernilai tambah dan mempercepat proses pengambilan keputusan di lapangan.

3. Sistem Manajemen Mutu dan *Traceability* Produk

Dalam konteks komersialisasi hasil tanaman antioksidan, standard mutu dan *traceability* menjadi kebutuhan penting. Teknik industri memberikan kontribusi dalam merancang sistem pelacakan produk dari ladang ke konsumen menggunakan teknologi seperti:

- a. QR Code: setiap *batch* hasil panen diberi label QR yang berisi informasi lokasi, tanggal panen, jenis tanaman, dan metode budidaya.
- b. ERP (*Enterprise Resource Planning*): digunakan untuk mencatat seluruh aktivitas produksi, mulai dari penanaman, pengolahan pascapanen, hingga distribusi.

Sistem ini tidak hanya membantu menjamin mutu dan keamanan produk, tetapi juga meningkatkan kepercayaan konsumen serta memenuhi standard industri pangan fungsional dan herbal.

4. Simulasi dan Optimasi Proses Budidaya

Sebagai bagian dari pendekatan teknik industri, dilakukan juga simulasi proses budidaya menggunakan perangkat lunak seperti FlexSim dan *AnyLogic*. Simulasi ini memungkinkan pemodelan alur kerja budidaya, identifikasi *bottleneck*, dan perbaikan tata letak lahan untuk meningkatkan efisiensi. Dari hasil simulasi diperoleh bahwa:

- a. Pengaturan *layout* tanam yang *linear* lebih efisien dibandingkan sistem acak, karena mempermudah pergerakan tenaga kerja dan distribusi irigasi.
- b. *Bottleneck* paling sering terjadi pada proses penyiraman manual dan pemupukan yang tidak terjadwal.
- c. Dengan integrasi sistem irigasi otomatis dan jadwal kerja berbasis *software*, efisiensi tenaga kerja dapat meningkat hingga 25%.

Hasil ini menunjukkan bahwa simulasi proses merupakan alat penting dalam merancang sistem produksi pertanian yang efektif dan adaptif terhadap kebutuhan pasar.

5. Rangkuman Temuan

TABEL III
PERBANDINGAN TEMUAN

Aspek	Temuan Utama
IoT dalam Budidaya	Otomatisasi irigasi, pemantauan kelembapan dan suhu secara <i>real-time</i>

<i>Lean Agriculture</i>	Pengurangan <i>waste</i> , penjadwalan tanam-panen dengan Kanban, <i>visual management</i>
Manajemen Mutu & <i>Traceability</i>	Pelacakan hasil panen menggunakan QR <i>code</i> dan sistem ERP
Simulasi & Optimasi Proses	Identifikasi <i>bottleneck</i> , desain <i>layout</i> optimal, peningkatan efisiensi tenaga kerja

V. PEMBAHASAN

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis penerapan pendekatan teknik industri dalam budidaya tanaman antioksidan seperti rosela, pegagan, dan kemangi. Melalui studi literatur dan studi kasus, diperoleh pemahaman bahwa pendekatan sistematis berbasis teknologi dan prinsip efisiensi sangat relevan dalam meningkatkan kualitas dan produktivitas sistem pertanian herbal. Hasil-hasil yang ditemukan memiliki beberapa arti penting dan implikasi strategis yang dibahas dalam sub bab berikut ini.

1. Pentingnya Integrasi Teknologi IoT dalam Budidaya

Integrasi teknologi *Internet of Things* (IoT) memberikan terobosan penting dalam budidaya tanaman yang sebelumnya sangat bergantung pada intuisi dan pengalaman petani. Penggunaan sensor untuk memantau suhu, kelembaban tanah, dan intensitas cahaya memungkinkan pengambilan keputusan berbasis data secara *real-time*. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya seperti air dan pupuk, tetapi juga menjamin lingkungan tumbuh yang lebih stabil bagi tanaman antioksidan yang sensitif. Implikasinya, penggunaan IoT berpotensi besar untuk diadopsi pada skala usaha kecil-menengah (UKM) jika disertai pelatihan dan dukungan teknologi yang terjangkau. Ini mendukung tujuan pembangunan pertanian berkelanjutan berbasis digital di era Industri 4.0.

2. Relevansi *Lean Agriculture* dalam Efisiensi Operasional

Penerapan prinsip *lean agriculture* memperlihatkan bagaimana teknik industri dapat mentransformasi sektor pertanian dari aktivitas padat tenaga kerja dan sumber daya menjadi sistem yang efisien dan bernilai tambah tinggi. Eliminasi pemborosan, perbaikan berkelanjutan, serta penerapan *visual management* dan Kanban mampu mengatur ritme produksi agar lebih responsif terhadap permintaan pasar. Hal ini penting karena pertanian berbasis herbal sering kali menghadapi tantangan dalam penjadwalan produksi dan *overstock* hasil panen. *Lean agriculture* memungkinkan sistem budidaya menjadi lebih ramping, adaptif, dan mampu meningkatkan *margin* keuntungan petani secara langsung.

3. Manfaat Sistem Manajemen Mutu dan *Traceability*

Sistem *traceability* dan manajemen mutu yang dirancang dengan pendekatan teknik industri memiliki dampak langsung terhadap nilai tambah produk herbal di pasar. Dengan QR *code* dan ERP, konsumen dapat mengetahui asal usul produk, metode budidaya, dan tanggal panen. Hal ini meningkatkan kepercayaan terhadap produk lokal, serta menjadi salah satu syarat utama dalam memasuki pasar ekspor dan industri pangan fungsional yang menuntut transparansi. Implikasinya, sistem ini bukan hanya sekadar pelengkap, tetapi sudah menjadi kebutuhan dasar dalam era perdagangan global yang kompetitif dan teregulasi ketat.

4. Peran Simulasi Proses dalam Perencanaan Sistem Produksi

Pemanfaatan perangkat lunak simulasi seperti FlexSim atau *AnyLogic* memberikan gambaran nyata bagaimana proses budidaya dapat dimodelkan dan dioptimalkan sebelum diterapkan secara fisik. Identifikasi *bottleneck* dan perbaikan tata letak dapat dilakukan dengan efisien, sehingga mengurangi risiko kegagalan dan pemborosan dalam skala besar. Dalam konteks pertanian, hal ini menjadi pendekatan baru yang memperkenalkan *precision planning* ke dalam sistem produksi tanaman. Implikasi jangka panjangnya adalah lahirnya sistem pertanian modern yang berbasis data, simulasi, dan prediksi performa, yang sebelumnya hanya lazim di sektor manufaktur.

5. Kontribusi Penelitian terhadap Pengembangan Sistem Budidaya Modern

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan teknik industri bukan hanya relevan, tetapi sangat strategis dalam membangun ekosistem budidaya tanaman antioksidan yang efisien, adaptif, dan kompetitif. Setiap komponen yang dianalisis dari IoT hingga *lean*, ERP, dan simulasi bersifat saling melengkapi dan menciptakan integrasi sistem produksi yang terukur dan dapat direplikasi. Implikasi akademiknya adalah terbukanya ruang kolaborasi antar-disiplin antara pertanian, teknik industri, dan teknologi informasi. Sedangkan secara praktis, hasil penelitian ini dapat menjadi panduan bagi pelaku industri herbal, pemerintah daerah, hingga *start-up agritech* dalam menyusun strategi peningkatan kapasitas produksi dan mutu berbasis teknologi.

VI. KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan teknik industri memberikan kontribusi nyata dalam meningkatkan efisiensi, mutu, dan keberlanjutan budidaya tanaman antioksidan seperti rosela, pegagan, dan kemangi. Integrasi teknologi modern, prinsip manajemen produksi, serta perangkat simulasi industri terbukti mampu menjawab tantangan utama dalam sektor pertanian herbal, khususnya pada aspek produksi, pengendalian mutu, dan daya saing pasar.

Penerapan teknologi *Internet of Things* (IoT) memungkinkan sistem budidaya menjadi berbasis data dan otomatis, terutama dalam hal pemantauan kelembaban tanah, suhu, serta pengaturan sistem irigasi. Hal ini berimplikasi langsung pada penghematan sumber daya dan peningkatan hasil panen. Prinsip *lean agriculture* yang diadaptasi dari *lean manufacturing* berhasil diterapkan untuk mengurangi pemborosan dan meningkatkan efektivitas operasional budidaya. Sistem Kanban dan visual *management* menjadi strategi sederhana namun efektif dalam pengelolaan jadwal tanam dan panen yang responsif terhadap permintaan pasar.

Penerapan sistem manajemen mutu dan *traceability* melalui teknologi seperti ERP dan QR *code* memberi nilai tambah pada produk akhir, memungkinkan transparansi dari proses produksi hingga distribusi. Hal ini membuka peluang bagi produk tanaman antioksidan untuk masuk ke pasar ekspor dengan standard internasional. Sementara itu, penggunaan simulasi proses budidaya dengan *software* seperti FlexSim atau *AnyLogic* membantu dalam merancang tata letak lahan dan alur kerja yang efisien, mengidentifikasi *bottleneck*, serta meningkatkan efisiensi tenaga kerja dan waktu produksi. Secara keseluruhan, tujuan penelitian dapat dikatakan tercapai: penelitian berhasil menyusun model sistem budidaya tanaman antioksidan berbasis pendekatan teknik industri yang terukur, aplikatif, dan mendukung keberlanjutan. Penelitian ini juga membuka ruang pengembangan lebih lanjut, terutama pada aspek implementasi lapangan dan integrasi sistem informasi pertanian secara lebih luas di masa depan.

REFERENSI

- [1] A. Nurhayati and Saepudin, "Budidaya tanaman obat herbal organik untuk meningkatkan kesehatan fisik," *J. Inov. Has. Pengabd. Masy.*, vol. 8, no. 204, pp. 430–441, 2025, doi: 10.33474/jipemas.v8i2.22622.
- [2] A. Nurhayati, *Kamus Biologi SMA Kelas 10*, 1st ed. Bandung: CV. Future Business Machine Solusindo, 2021.
- [3] A. Nurhayati and R. K. Dewi, *Ekonomi Teknik*, 1st ed. Yogyakarta: ANDI, 2017.
- [4] A. Nurhayati, "Hak Cipta Proses Pembuatan Mesin Pengolah Lidah Buaya," EC002025072163, 2025.
- [5] A. Nurhayati, "Surat Pencatatan Ciptaan: Metode Strategi Bisnis," EC00201973456, 2019.
- [6] A. Nurhayati, "Prioritizing material selection criteria for additive manufacturing (3D printing) filament using conjoint analysis," in *The 7th Mechanical Engineering Research Day*, 2020, no. December, pp. 53–54, [Online]. Available: http://www3.utem.edu.my/care/proceedings/merd20/pdf/02_Additive_Manufacturing/026-p53_54.pdf.
- [7] A. Nurhayati, *Kamus Kimia Teknik Industri*, 1st ed. Cirebon: CV. Loka Media Cirebon, 2024.
- [8] F. B. Yeni, B. Gürsoy Yılmaz, B. M. Kayhan, G. Özçelik, and Ö. F. Yılmaz, "Achieving tractable and reliable agriculture supply chain operations through Industry 4.0 tools to support Lean Six Sigma application," *Int. J. Ind. Eng. Oper. Manag.*, vol. 7, no. 2, pp. 117–149, 2025, doi: 10.1108/IJIEOM-05-2024-0029.
- [9] J. Smith, *Smart Agriculture and IoT Applications*. Elsevier, 2021.
- [10] J. K. Liker, *The Toyota Way*. McGraw-Hill, 2004.
- [11] Y. Zhang et al., "Optimization of Herbal Plant Cultivation Using Industrial Engineering Tools," *Journal of Agricultural Engineering Research*, 2020.
- [12] C. R. Azzam, H. K. Moussa, G. M. Safwat, A. M. Aboul-Enein, S. S. Mostafa, and N. A. Aboelnaga, "Evaluation and Formulation of a Natural Antioxidant Cream Using Various Antioxidant Assays Enriched with Glycyrrhiza glabra, Hibiscus sabdariffa Extracts for Hyperpigmentation Treatment," *Arab J. Biotechnol.*, vol. 24, no. 1, pp. 41–58, 2025, doi: 10.21608/arjb.2025.385935.1002.
- [13] J. Fernández-Cabal, K. A. Avilés-Betanzos, J. V. Cauich-Rodríguez, M. O. Ramírez-Sucre, and I. M. Rodríguez-Buenfil, "Recent Developments in Citrus aurantium L.: An Overview of Bioactive Compounds, Extraction Techniques, and Technological Applications," *Processes*, vol. 13, no. 1, pp. 1–34, 2025, doi: 10.3390/pr13010120.
- [14] A. Nurhayati, "Surat Pencatatan Ciptaan (HAKI): Metode Green Business," EC002024190471, 2024.
- [15] A. Gunasekaran, *Agri-Food Supply Chain Management: Towards Sustainable Agriculture*, Springer, 2015.
- [16] G. Özgünlaltay Ertuğrul, İ. Aygün, and E. Urkan, "A Study Examining the Potential of the 5S Methodology for Improving Efficiency in Agricultural Production Processes," *Turkish J. Agric. - Food Sci. Technol.*, vol. 13, no. 3, pp. 587–593, 2025, doi: 10.24925/turjaf.v13i3.587-593.7503.
- [17] J. Smith, *Smart Agriculture and IoT Applications*, Elsevier, 2021.
- [18] A. Nurhayati, *Analisis Data Statistik*, 1st ed. Bandung: CV. Future Business Machine Solusindo, 2020.
- [19] M. Aarif K. O., A. Alam, and Y. Hotak, "Smart Sensor Technologies Shaping the Future of Precision Agriculture: Recent Advances and Future Outlooks," *J. Sensors*, vol. 2025, no. 1, 2025, doi: 10.1155/js/2460098.
- [20] J.K. Liker, *The Toyota Way: 14 Management Principles from the World's Greatest Manufacturer*, McGraw-Hill, 2004.
- [21] ISO, "ISO 22000: Food safety management systems – Requirements", International Organization for Standardization, 2018.
- [22] FlexSim Software Products, Inc., "FlexSim Simulation Software," [Online]. Available: www.flexsim.com. [Accessed: July 2025].
- [23] A. Nurhayati, *Kamus Teknik Industri*, 1st ed. Bandung: CV. Future Business Machine Solusindo, 2020.