INOMATEC: Jurnal Inovasi dan Kajian Multidisipliner Kontemporer
Vol. 02, No. 01, Tahun 2026, Hal. 70-91, ISSN: 3123-5573 (Online)

Pengembangan Mesin Pertanian Hemat Energi untuk Mendukung Produktivitas dan Keberlanjutan Pertanian

Zaenal Arifin[1]
[1]Sekolah Tinggi Teknologi Nusantara Lampung
Email: zaenal.arifin7802@gmail.com

Article Info

Article history:

Received October 12, 2026
Revised October 26, 2026
Accepted November 04, 2026

Keywords:

agricultural machinery; energy efficiency; agricultural productivity; agricultural mechanization; environmental sustainability

ABSTRACT

The development of energy-efficient agricultural machinery is increasingly important for improving agricultural productivity while supporting the sustainability of agricultural systems. Conventional agricultural machinery continues to face challenges related to fuel consumption, operational costs, and environmental emissions. This study aims to examine technological developments in energy-efficient agricultural machinery, identify innovations and operational factors that support energy efficiency, and develop a conceptual framework to support agricultural productivity and sustainability. A qualitative approach was employed through a narrative-conceptual literature study using relevant scientific publications from 2020 to 2026 retrieved from Scopus and Google Scholar. The literature was analyzed descriptively, comparatively, and thematically based on four dimensions: technological innovation, energy optimization, operational performance and productivity, and environmental sustainability. The findings indicate that agricultural machinery efficiency can be supported through the optimization of conventional machinery, electrification, hybrid propulsion systems, and digital technologies for operational control and monitoring. This study proposes a conceptual framework integrating these four dimensions as a foundation for developing energy-efficient agricultural machinery. The framework is expected to provide a reference for further research and the development of more efficient, adaptive, and sustainable agricultural mechanization technologies. Empirical validation is still required to examine its applicability under different agricultural conditions.

This is an open access article under the CC BY-SA license.

Article Info

Article history:

Received October 12, 2026
Revised October 26, 2026
Accepted November 04, 2026

Kata kunci:

mesin pertanian; efisiensi energi; produktivitas pertanian; mekanisasi pertanian; keberlanjutan lingkungan

ABSTRAK

Pengembangan mesin pertanian hemat energi menjadi salah satu kebutuhan penting dalam meningkatkan produktivitas sekaligus mendukung keberlanjutan sistem pertanian. Penggunaan mesin konvensional masih menghadapi tantangan berupa konsumsi bahan bakar, biaya operasional, dan emisi lingkungan. Penelitian ini bertujuan menganalisis perkembangan teknologi mesin pertanian hemat energi, mengidentifikasi pendekatan inovasi dan faktor operasional yang mendukung efisiensi energi, serta menyusun kerangka konseptual untuk mendukung produktivitas dan keberlanjutan pertanian. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif melalui studi literatur naratif-konseptual dengan memanfaatkan publikasi ilmiah relevan periode 2020–2026 yang diperoleh melalui Scopus dan Google Scholar. Analisis dilakukan secara deskriptif-komparatif dan tematik dengan mengelompokkan literatur berdasarkan inovasi teknologi, optimalisasi energi, kinerja

operasional dan produktivitas, serta keberlanjutan lingkungan. Hasil kajian menunjukkan bahwa efisiensi mesin pertanian dapat didukung melalui optimalisasi mesin konvensional, elektrifikasi, sistem penggerak hibrida, dan penerapan teknologi digital untuk pengendalian serta pemantauan operasional. Penelitian ini menghasilkan kerangka konseptual yang mengintegrasikan empat dimensi tersebut sebagai landasan pengembangan mesin pertanian hemat energi. Kerangka yang dihasilkan diharapkan menjadi referensi bagi penelitian dan pengembangan teknologi mekanisasi pertanian yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan. Validasi empiris masih diperlukan untuk menguji penerapannya pada berbagai kondisi pertanian.

This is an open access article under the CC BY-SA license.

Corresponding Author:

Zaenal Arifin
Sekolah Tinggi Teknologi Nusantara Lampung
Email: zaenal.arifin7802@gmail.com

PENDAHULUAN

Sektor pertanian berperan strategis dalam pemenuhan kebutuhan pangan dan pembangunan ekonomi berkelanjutan. Pertumbuhan penduduk dan meningkatnya kebutuhan pangan menuntut peningkatan produktivitas melalui teknologi dan mekanisasi. Traktor, alat pengolah tanah, mesin tanam, dan mesin panen dapat mempercepat pekerjaan serta meningkatkan kapasitas produksi. Namun, mekanisasi tidak otomatis menjamin keberlanjutan karena berkaitan dengan konsumsi energi, biaya operasional, emisi, dan tekanan terhadap sumber daya alam. Mekanisasi dapat meningkatkan produktivitas tenaga kerja dan ketahanan pangan, tetapi juga menimbulkan dampak lingkungan apabila tidak dikelola secara tepat (Daum, 2023). Karena itu, pengembangan mesin perlu mempertimbangkan efisiensi energi dan dampak lingkungan, selain kapasitas kerjanya (Lampridi et al., 2020; Scolaro et al., 2021).

Salah satu tantangan mekanisasi ialah mengoptimalkan energi selama operasi. Konsumsi mesin dipengaruhi karakteristik mesin, kebutuhan daya, jenis implement, kondisi tanah, kedalaman pengolahan, dan kecepatan kerja. Evaluasi jejak energi perlu memperhatikan karakteristik mesin serta parameter kegiatan pertanian (Lampridi et al., 2020). Efisiensi kerja lapangan juga dipengaruhi pola lintasan dan konfigurasi operasi (Zhou et al., 2020), sedangkan kedalaman pengolahan dan tingkat transmisi berkaitan dengan beban mekanis serta konsumsi bahan bakar (Kim et al., 2020). Jenis implement, tekstur tanah, kecepatan maju, dan kedalaman kerja turut memengaruhi konsumsi bahan bakar serta kualitas pengolahan tanah (Damanauskas & Janulevičius, 2022). Dengan demikian, efisiensi energi merupakan hasil interaksi desain mesin, kondisi lahan, dan strategi pengoperasian.

Perkembangan teknologi menawarkan pendekatan untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, antara lain elektrifikasi, sistem hibrida, dan manajemen energi. Elektrifikasi mesin pertanian mencakup penerapan motor listrik pada traktor dan implement

sebagai alternatif sistem penggerak konvensional (Scolaro et al., 2021), termasuk integrasi traktor dan implement bertenaga listrik (Mocera et al., 2023). Pada traktor listrik, efisiensi juga ditentukan konfigurasi sistem penggerak dan strategi manajemen energi (Yu et al., 2025). Strategi pengelolaan energi pada traktor hibrida serta penerapan teknologi cerdas memperluas peluang penyesuaian penggunaan energi dengan kebutuhan operasi (Yang et al., 2025; Zhang et al., 2025).

Selain pilihan sumber tenaga, efisiensi dapat ditingkatkan melalui pengelolaan mesin dan penyesuaian parameter operasi. Optimalisasi operasi dan manajemen mesin merupakan strategi untuk memperbaiki efisiensi penggunaan energi pada tingkat usaha tani (Jensen et al., 2025). Kecerdasan buatan dapat digunakan untuk memprediksi konsumsi bahan bakar dan merekomendasikan parameter pengoperasian berdasarkan kondisi tanah serta karakteristik pekerjaan (Nagar et al., 2024). Sistem pemantauan berbasis Internet of Things juga dapat mengintegrasikan informasi kedalaman pengolahan, gaya tarik, waktu kerja, dan konsumsi bahan bakar untuk mengevaluasi kinerja mesin (C. Wen et al., 2026). Oleh karena itu, pengembangan mesin hemat energi perlu menggabungkan inovasi sistem penggerak, pengendalian, dan pemantauan operasional.

Penelitian terdahulu menunjukkan potensi pendekatan tersebut. Konversi traktor konvensional menjadi sistem hibrida dengan strategi manajemen energi dapat mengoptimalkan penggunaan energi dari mesin pembakaran dan motor listrik (Ozturk et al., 2024). Pada traktor listrik, pengendalian distribusi torsi dan traksi dilaporkan dapat meningkatkan efisiensi kerja serta mengurangi selip roda dalam kondisi pengujian tertentu (C. Wen et al., 2026). Evaluasi arsitektur hibrida menggunakan data operasi nyata juga menekankan pentingnya kesesuaian sistem penggerak dengan profil beban dan kebutuhan pekerjaan (Mattetti et al., 2025). Namun, elektrifikasi masih menghadapi tantangan kapasitas dan bobot baterai, kebutuhan pengisian, infrastruktur energi, serta kesesuaian teknologi dengan karakteristik pekerjaan pertanian.

Keberlanjutan teknologi perlu dinilai secara menyeluruh. Dampak lingkungan mesin tidak hanya ditentukan emisi selama operasi, tetapi juga sumber energi dan tahapan daur hidupnya. Perbandingan traktor hibrida diesel-listrik, traktor konvensional, dan mesin pengolah tanah melalui pendekatan life cycle assessment menunjukkan pentingnya penilaian indikator energi dan lingkungan secara bersamaan (Liu et al., 2024). Hubungan mekanisasi dengan efisiensi lingkungan juga tidak selalu linear sehingga peningkatan penggunaan mesin perlu disertai pemilihan teknologi dan pengelolaan yang sesuai (Yan et al., 2024). Dengan demikian, kinerja mesin hemat energi perlu dianalisis melalui keterkaitan konsumsi energi, kapasitas dan kualitas kerja, biaya operasional, serta konsekuensi lingkungan.

Kajian terdahulu telah membahas efisiensi operasi, elektrifikasi, sistem hibrida, manajemen energi, pengendalian cerdas, dan dampak lingkungan. Namun, aspek-aspek tersebut masih sering dianalisis secara terpisah. Diperlukan sintesis yang menghubungkan inovasi teknologi mesin, optimalisasi konsumsi energi, kinerja operasional dan produktivitas, serta keberlanjutan lingkungan dalam satu kerangka konseptual. Dengan demikian, kesenjangan penelitian ini bukan terletak pada ketiadaan inovasi mesin hemat energi, melainkan pada

perlunya integrasi berbagai pendekatan tersebut sebagai landasan memahami arah pengembangan mesin pertanian.

Penelitian ini menawarkan kebaruan berupa kerangka konseptual yang mengintegrasikan empat dimensi, yaitu inovasi teknologi mesin, optimalisasi energi, kinerja operasional dan produktivitas, serta keberlanjutan lingkungan. Melalui studi literatur, penelitian bertujuan mengidentifikasi perkembangan teknologi mesin pertanian hemat energi, menjelaskan faktor teknologi dan operasional yang mendukung efisiensi, serta menganalisis keterkaitannya dengan produktivitas dan keberlanjutan. Kerangka yang dihasilkan diharapkan menjadi landasan konseptual bagi peneliti, pengembang teknologi, dan pemangku kepentingan dalam menentukan arah inovasi mekanisasi pertanian yang efisien dan berkelanjutan.

METODE

Bagian metode disusun menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode studi literatur naratif-konseptual (*narrative-conceptual literature study*). Pendekatan ini dipilih karena penelitian bertujuan mengkaji perkembangan teknologi mesin pertanian hemat energi, membandingkan pendekatan inovasi yang telah dikembangkan, serta menyintesis berbagai temuan penelitian menjadi kerangka konseptual pengembangan mesin pertanian berkelanjutan. Berbeda dari *systematic literature review*, penelitian ini tidak diarahkan untuk melakukan pencarian komprehensif berdasarkan protokol SLR, penghitungan artikel melalui tahapan PRISMA, atau menghasilkan estimasi statistik gabungan. Analisis dilakukan melalui penelusuran literatur yang relevan, evaluasi substansi penelitian, pengelompokan tema, dan sintesis konseptual. Snyder (2019) menjelaskan bahwa pendekatan tinjauan literatur dapat disesuaikan dengan tujuan penelitian, termasuk pendekatan integratif yang menekankan analisis kualitatif dan pengembangan model atau kerangka teoretis. Pengembangan pengetahuan melalui integrasi hasil penelitian terdahulu juga menjadi karakteristik penting kajian literatur konseptual (Torraco, 2016).

Jenis dan Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode studi literatur naratif-konseptual. Pendekatan tersebut digunakan untuk memahami perkembangan pengetahuan mengenai teknologi mesin pertanian hemat energi melalui interpretasi dan perbandingan hasil penelitian terdahulu. Fokus kajian meliputi teknologi sistem penggerak, elektrifikasi dan sistem hibrida, optimalisasi konsumsi energi, kinerja operasional mesin, produktivitas pertanian, serta dampak lingkungan.

Studi literatur dilakukan dengan mengidentifikasi, mempelajari, dan menginterpretasikan publikasi ilmiah yang relevan dengan permasalahan penelitian. Selanjutnya, informasi dari berbagai sumber dibandingkan untuk menemukan kesamaan, perbedaan, perkembangan teknologi, dan hubungan antarkomponen yang dapat menjadi dasar pengembangan kerangka konseptual. Pendekatan ini memungkinkan hasil penelitian terdahulu diintegrasikan menjadi pemahaman baru tanpa mengharuskan adanya pengujian prototipe atau pengumpulan data lapangan (Paul & Criado, 2020; Snyder, 2019).

Sumber Literatur dan Strategi Penelusuran

Sumber literatur utama penelitian berasal dari publikasi ilmiah yang tersedia melalui database Scopus. *Google Scholar* digunakan sebagai sumber pendukung untuk menemukan publikasi relevan, menelusuri referensi tambahan, dan memeriksa keterkaitan antarpublikasi. Literatur difokuskan pada artikel penelitian dan artikel tinjauan ilmiah yang diterbitkan selama periode 2020-2026. Penggunaan rentang tersebut dimaksudkan untuk menggambarkan perkembangan teknologi mesin pertanian dan inovasi efisiensi energi dalam beberapa tahun terakhir.

Penelusuran menggunakan kombinasi kata kunci berbahasa Inggris dan Indonesia yang dikelompokkan berdasarkan tiga fokus utama, yaitu teknologi mesin pertanian, efisiensi energi, serta produktivitas dan keberlanjutan pertanian. Strategi penelusuran disesuaikan dengan karakteristik masing-masing database dan diarahkan untuk memperoleh publikasi yang memiliki keterkaitan substantif dengan tujuan penelitian. Pencarian pendukung dilakukan dengan kombinasi kata kunci yang menghubungkan teknologi mesin dengan produktivitas dan keberlanjutan agar literatur yang relevan tetapi tidak menyebut semua istilah tersebut dalam satu rekaman tetap dapat ditemukan.

Tabel 1. Strategi Penelusuran Literatur

Kelompok	Kata kunci bahasa Inggris
Mesin pertanian	"*Agricultural Machinery*", "*Agricultural Mechanization*", *Tractor*, "*Farm Equipment*"
Efisiensi energi	"*Energy Efficiency*", "*Energy Consumption*", "*Fuel Consumption*", "*Energy Optimization*"
Inovasi teknologi	*Electrification*, "*Electric Tractor*", "*Hybrid Tractor*", "*Energy Management*", "*Smart Machinery*"
Produktivitas	"*Agricultural Productivity*", "*Field Performance*", "*Operational Efficiency*"
Keberlanjutan	"*Sustainable Agriculture*", "*Environmental Impact*", *Emissions*, "*Life Cycle Assessment*"

Sumber: Disusun oleh penulis.

Kriteria Relevansi Literatur

Literatur yang digunakan dipilih berdasarkan kesesuaian substansi dengan tujuan penelitian. Pemilihan dilakukan secara purposif dengan memperhatikan kontribusi publikasi terhadap pemahaman teknologi mesin pertanian hemat energi. Artikel tidak hanya dinilai berdasarkan kesamaan kata kunci, tetapi juga berdasarkan pembahasan teknologi, indikator kinerja, dan relevansinya terhadap produktivitas serta keberlanjutan pertanian. Prinsip transparansi dalam penjelasan sumber dan proses evaluasi literatur penting untuk menjaga kualitas sintesis penelitian (Snyder, 2019; Watson & Webster, 2020).

Tabel 2. Kriteria Relevansi Literatur

Kriteria inklusi	Kriteria eksklusi
Artikel jurnal ilmiah periode 2020-2026	Publikasi sebelum 2020
Berasal dari jurnal ilmiah yang relevan	Blog, berita, opini, dan sumber nonilmiah
Membahas mesin atau mekanisasi pertanian	Tidak berkaitan dengan mesin pertanian
Membahas konsumsi energi, efisiensi bahan bakar, elektrifikasi, atau sistem hibrida	Hanya membahas budidaya atau produksi tanaman tanpa keterkaitan teknologi mesin
Memuat pembahasan kinerja operasional, produktivitas, atau dampak lingkungan	Tidak memiliki hubungan substantif dengan fokus penelitian
Memiliki identitas publikasi yang dapat diverifikasi	Duplikasi atau informasi publikasi yang tidak dapat diverifikasi
Tersedia informasi abstrak dan substansi yang memadai untuk dianalisis	Informasi tidak memadai untuk menilai relevansi penelitian

Sumber: Disusun oleh penulis.

Kriteria tersebut digunakan sebagai pedoman seleksi substantif, bukan sebagai protokol penyaringan SLR. Dengan demikian, penelitian tidak menetapkan jumlah artikel yang harus diperoleh melalui perhitungan tahapan PRISMA. Literatur dipilih berdasarkan kedalaman pembahasan dan kemampuannya menjelaskan dimensi teknologi, energi, produktivitas, serta keberlanjutan.

Teknik Analisis dan Sintesis Literatur

Analisis dilakukan secara deskriptif-komparatif dan tematik. Tahap pertama adalah membaca dan memahami substansi publikasi untuk mengidentifikasi fokus penelitian, jenis mesin, teknologi yang digunakan, serta indikator efisiensi energi dan kinerja operasional. Tahap kedua adalah mengelompokkan informasi berdasarkan persamaan dan perbedaan pendekatan teknologi. Tahap ketiga adalah membandingkan hasil penelitian untuk mengidentifikasi perkembangan, manfaat, keterbatasan, serta tantangan penerapan mesin pertanian hemat energi.

Sintesis tematik dilakukan dengan mengelompokkan informasi ke dalam empat tema utama, yaitu inovasi teknologi mesin pertanian, optimalisasi konsumsi energi, kinerja operasional dan produktivitas, serta keberlanjutan lingkungan. Pengelompokan tema dilakukan melalui proses pembacaan, pemberian kode terhadap informasi relevan, pengembangan kategori, dan interpretasi hubungan antartema. Proses analisis tematik mengikuti prinsip identifikasi pola dan pembentukan tema sebagaimana dijelaskan Byrne (2022). Untuk menjaga konsistensi interpretasi, keputusan pengelompokan dan dasar penarikan kesimpulan dicatat sehingga proses analisis dapat ditelusuri kembali (Nowell et al., 2017). Matriks tersebut digunakan untuk membandingkan substansi setiap publikasi dan mencegah analisis hanya berorientasi pada satu jenis teknologi. Pendekatan sintesis kualitatif memungkinkan berbagai

hasil penelitian dengan metode dan konteks berbeda diinterpretasikan berdasarkan hubungan konseptual yang relevan (Onwuegbuzie et al., 2012).

Tabel 3. Matriks Analisis dan Sintesis Literatur

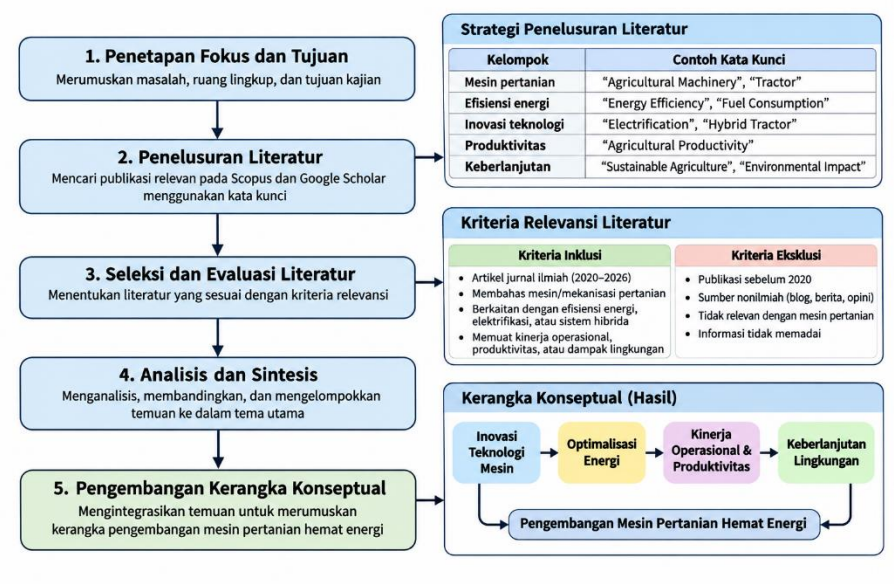
Dimensi analisis	Aspek yang dikaji	Indikator atau informasi
Inovasi teknologi	Sistem penggerak dan teknologi mesin	Mesin diesel, listrik, hibrida, motor traksi, sistem kendali
Efisiensi energi	Penggunaan dan optimalisasi energi	Konsumsi bahan bakar, konsumsi energi, efisiensi daya, manajemen energi
Kinerja operasional	Kemampuan mesin dalam kegiatan pertanian	Kapasitas lapangan, kecepatan kerja, efisiensi traksi, kualitas pekerjaan
Produktivitas pertanian	Efektivitas penggunaan mesin	Penghematan waktu, kapasitas kerja, efisiensi tenaga kerja
Keberlanjutan lingkungan	Dampak penggunaan teknologi	Emisi, penggunaan energi terbarukan, dampak daur hidup, efisiensi sumber daya
Tantangan pengembangan	Kendala penerapan teknologi	Biaya investasi, baterai, infrastruktur energi, kondisi lahan, pemeliharaan

Sumber: Disusun oleh penulis.

Pengembangan Kerangka Konseptual

Tahap akhir penelitian adalah menyusun kerangka konseptual berdasarkan hasil analisis dan sintesis literatur. Kerangka ini dikembangkan dengan mengintegrasikan empat dimensi utama yang telah diidentifikasi, yaitu inovasi teknologi mesin, optimalisasi energi, kinerja operasional dan produktivitas, serta keberlanjutan lingkungan. Proses pengembangan dilakukan dengan mengidentifikasi hubungan antardimensi, membandingkan temuan penelitian terdahulu, dan merumuskan keterkaitan konseptual yang dapat menjelaskan arah pengembangan mesin pertanian hemat energi. Integrasi literatur menjadi dasar untuk menghasilkan kerangka pengetahuan baru yang melampaui rangkuman hasil penelitian secara individual (Torraco, 2016). Kerangka konseptual yang dihasilkan tidak dimaksudkan sebagai model empiris yang telah diuji, melainkan sebagai konstruksi teoretis untuk menjelaskan komponen dan hubungan yang perlu dipertimbangkan dalam pengembangan mesin pertanian hemat energi. Dengan demikian, hasilnya dapat digunakan sebagai dasar bagi penelitian lanjutan yang berorientasi pada desain, pengembangan prototipe, dan pengujian kinerja mesin pertanian.

Diagram Alur Penelitian



Gambar 1. Alur Pelaksanaan Studi Literatur Naratif-Konseptual

Berdasarkan Gambar 1, pelaksanaan penelitian diawali dengan penetapan fokus dan tujuan kajian untuk menentukan ruang lingkup pembahasan mengenai pengembangan mesin pertanian hemat energi. Tahap berikutnya adalah penelusuran literatur melalui database Scopus dan Google Scholar menggunakan kombinasi kata kunci yang berkaitan dengan mesin pertanian, efisiensi energi, inovasi teknologi, produktivitas, dan keberlanjutan. Literatur yang diperoleh selanjutnya dievaluasi berdasarkan kesesuaian substansi, periode publikasi, serta kontribusinya terhadap tujuan penelitian. Publikasi yang relevan kemudian dianalisis dan dibandingkan untuk mengidentifikasi persamaan, perbedaan, perkembangan teknologi, manfaat, dan keterbatasan masing-masing pendekatan. Proses analisis dilanjutkan melalui sintesis tematik dengan mengelompokkan hasil kajian ke dalam empat dimensi utama, yaitu inovasi teknologi mesin pertanian, optimalisasi konsumsi energi, kinerja operasional dan produktivitas, serta keberlanjutan lingkungan. Keempat dimensi tersebut kemudian diintegrasikan untuk membangun kerangka konseptual pengembangan mesin pertanian hemat energi. Penyusunan kerangka ini mengacu pada prinsip sintesis literatur dan pengembangan konseptual sebagaimana dijelaskan oleh Snyder (2019) dan Torraco (2016), serta proses identifikasi tema dalam analisis kualitatif yang dikembangkan oleh Byrne (2022).

Hasil dari keseluruhan tahapan tersebut berupa kerangka konseptual yang menggambarkan keterkaitan antara inovasi teknologi, efisiensi energi, kinerja operasional, produktivitas pertanian, dan keberlanjutan lingkungan. Kerangka yang dihasilkan merupakan sintesis konseptual berdasarkan literatur yang dianalisis dan belum merepresentasikan model empiris yang telah diuji melalui pengembangan prototipe atau pengujian lapangan. Oleh karena itu, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi landasan bagi penelitian selanjutnya dalam mengembangkan dan mengevaluasi teknologi mesin pertanian yang lebih efisien, adaptif, dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil penelitian ini disajikan berdasarkan sintesis literatur mengenai perkembangan mesin pertanian hemat energi, dengan menitikberatkan pada inovasi teknologi, efisiensi energi, kinerja operasional dan produktivitas, serta keberlanjutan lingkungan. Pembahasan dilakukan secara deskriptif-komparatif dengan membandingkan pendekatan teknologi, hasil penelitian terdahulu, manfaat, dan keterbatasan penerapannya. Sintesis ini menjadi dasar untuk mengembangkan kerangka konseptual pengembangan mesin pertanian hemat energi.

Perkembangan Teknologi Mesin Pertanian

Perkembangan teknologi mesin pertanian menunjukkan pergeseran dari mekanisasi konvensional berbasis mesin pembakaran internal menuju sistem yang lebih efisien melalui optimalisasi mekanis, elektrifikasi, teknologi hibrida, dan pengendalian digital. Perubahan tersebut didorong oleh kebutuhan untuk meningkatkan kapasitas kerja sekaligus mengurangi konsumsi bahan bakar dan emisi dari kegiatan operasional pertanian. Mekanisasi tetap memiliki fungsi penting dalam meningkatkan produktivitas tenaga kerja, memperbaiki efisiensi kegiatan produksi, dan mendukung ketahanan pangan. Namun, manfaat tersebut perlu diseimbangkan dengan pengelolaan dampak lingkungan dan kesesuaian teknologi terhadap karakteristik usaha tani (Daum, 2023).

Berdasarkan literatur, perkembangan mesin pertanian dapat dikelompokkan menjadi empat pendekatan. Pertama, optimalisasi mesin konvensional melalui pencocokan daya dan beban, pengaturan transmisi, serta penyesuaian parameter pengoperasian. Kedua, pengembangan mesin listrik melalui penggunaan motor traksi dan baterai. Ketiga, penerapan sistem hibrida yang mengombinasikan mesin diesel dengan motor listrik. Keempat, integrasi teknologi digital untuk mengendalikan, memantau, dan mengoptimalkan kinerja mesin. Keempat pendekatan tersebut menunjukkan bahwa efisiensi energi dapat dicapai melalui beberapa jalur teknologi, bukan hanya melalui penggantian sumber tenaga (Jensen et al., 2025; Scolaro et al., 2021; Yu et al., 2025).

Tabel 4. Sintesis Penelitian Terdahulu tentang Pengembangan Mesin Pertanian Hemat Energi

Peneliti	Fokus penelitian	Temuan utama	Dimensi kontribusi
Lampridi et al. (2020)	Jejak energi operasi pertanian	Konsumsi energi dipengaruhi karakteristik mesin dan parameter operasional	Efisiensi energi
Scolaro et al. (2021)	Elektrifikasi mesin pertanian	Elektrifikasi dan sistem hibrida menjadi alternatif pengembangan mesin	Inovasi teknologi
Damanauskas &	Konsumsi bahan	Jenis implement, kedalaman,	Kinerja

Peneliti	Fokus penelitian	Temuan utama	Dimensi kontribusi
Janulevičius (2022)	bakar pengolahan tanah	kecepatan, dan tekstur tanah memengaruhi konsumsi bahan bakar	operasional
Daum (2023)	Mekanisasi dan keberlanjutan sistem pangan	Mekanisasi memiliki manfaat sosial-ekonomi sekaligus risiko lingkungan	Keberlanjutan
Nagar et al. (2024)	Prediksi konsumsi bahan bakar berbasis AI	ANN digunakan untuk memprediksi konsumsi bahan bakar dan merekomendasikan parameter kerja	Teknologi digital
Ozturk et al. (2024)	Sistem penggerak traktor hibrida	Strategi ECMS menunjukkan potensi penghematan bahan bakar dan pengurangan emisi	Efisiensi energi
C.-K. Wen et al. (2024)	Traktor listrik dengan penggerak roda	Pengendalian torsi dan ballast meningkatkan efisiensi traksi	Inovasi dan kinerja
Liu et al. (2024)	Evaluasi energi dan lingkungan	Perbandingan teknologi mesin dilakukan menggunakan LCA	Keberlanjutan
Yan et al. (2024)	Mekanisasi dan efisiensi lingkungan	Hubungan mekanisasi dengan efisiensi lingkungan berbentuk U pada konteks penelitian	Dampak lingkungan
Jensen et al. (2025)	Optimalisasi operasi dan pengelolaan mesin	Pencocokan daya dan beban serta transmisi variabel mendukung efisiensi bahan bakar	Efisiensi operasional
Mattetti et al. (2025)	Arsitektur hibrida berdasarkan data operasi nyata	e-PTO dan Plug-in P4 menunjukkan potensi penghematan bahan bakar dan emisi	Teknologi hibrida
Yu et al. (2025)	Sistem penggerak	Sistem penggerak dan strategi	Manajemen

Peneliti	Fokus penelitian	Temuan utama	Dimensi kontribusi
	dan manajemen energi traktor listrik	manajemen energi menjadi komponen penting elektrifikasi	energi

Sumber: Sintesis penulis berdasarkan penelitian terdahulu.

Sintesis pada Tabel 4 memperlihatkan bahwa perkembangan teknologi mesin pertanian tidak berlangsung melalui satu pendekatan tunggal. Optimalisasi mesin konvensional tetap relevan karena dapat meningkatkan efisiensi tanpa selalu membutuhkan penggantian keseluruhan sistem mesin. Pada saat yang sama, elektrifikasi dan sistem hibrida memperluas alternatif sumber tenaga, sedangkan teknologi digital mendukung pengelolaan mesin secara lebih adaptif. Temuan tersebut memperkuat pandangan bahwa pengembangan mesin pertanian hemat energi sebaiknya mempertimbangkan integrasi teknologi penggerak, karakteristik pekerjaan, manajemen energi, dan kebutuhan operasional. Artinya, teknologi terbaik tidak selalu merupakan teknologi paling baru, tetapi teknologi yang mampu memberikan keseimbangan antara konsumsi energi, kapasitas kerja, biaya, dan dampak lingkungan pada kondisi pertanian tertentu.

Inovasi Teknologi Mesin Pertanian Hemat Energi

Inovasi teknologi mesin pertanian hemat energi dapat dianalisis melalui tiga pendekatan utama, yaitu optimalisasi mesin konvensional, elektrifikasi, dan sistem penggerak hibrida. Pertama, optimalisasi mesin konvensional. Pendekatan ini menekankan peningkatan efisiensi penggunaan bahan bakar melalui penyesuaian daya mesin terhadap kebutuhan beban kerja. Penggunaan transmisi variabel, pengaturan kecepatan mesin, dan pemilihan implement yang sesuai dapat mengurangi penggunaan energi yang tidak diperlukan. Jensen et al. (2025) mengidentifikasi pencocokan daya dan beban (power/load matching) serta penerapan transmisi variabel sebagai strategi untuk mengurangi konsumsi bahan bakar traktor. Pendekatan ini memiliki keunggulan karena dapat diterapkan pada mesin yang telah tersedia tanpa selalu membutuhkan investasi elektrifikasi secara menyeluruh.

Kedua, elektrifikasi mesin pertanian. Penggunaan motor listrik memungkinkan pengaturan tenaga penggerak secara lebih fleksibel dan mengurangi emisi langsung dari pembakaran bahan bakar pada lokasi pengoperasian. Scolaro et al. (2021) mengidentifikasi elektrifikasi sebagai alternatif pengembangan mesin pertanian, terutama melalui penerapan motor listrik pada traktor dan implement. Perkembangan sistem penggerak traktor listrik juga mencakup konfigurasi motor, konverter daya, penyimpanan energi, dan strategi pengendalian yang disesuaikan dengan kebutuhan kerja. Yu et al. (2025) mengelompokkan sistem penggerak traktor listrik ke dalam sistem energi tunggal, sistem hibrida diesel-listrik, dan sistem penyimpanan energi hibrida. Pilihan konfigurasi tersebut memengaruhi kapasitas energi, kemampuan penggerak, adaptasi beban, dan kebutuhan pengelolaan daya.

Ketiga, pengembangan sistem penggerak hibrida. Teknologi hibrida menggabungkan keunggulan mesin pembakaran internal dan motor listrik. Mesin diesel dapat menyediakan tenaga untuk pekerjaan dengan kebutuhan daya relatif tinggi, sedangkan motor listrik membantu memenuhi kebutuhan tenaga tambahan dan mengoptimalkan operasi pada kondisi tertentu. Penelitian Ozturk et al. (2024) menggunakan strategi *Equivalent Consumption Minimization Strategy* (ECMS) untuk mengelola distribusi energi pada traktor hibrida. Hasil simulasi memperlihatkan penurunan konsumsi bahan bakar dari 1.880,1 menjadi 1.712,5 g/km dan pengurangan emisi CO_2 sebesar 8,93% dibandingkan konfigurasi konvensional dalam skenario penelitian. Sementara itu, Mattetti et al. (2025) menunjukkan bahwa konfigurasi *electric power take-off* (e-PTO) berpotensi menghemat bahan bakar hingga 16% pada operasi dengan kebutuhan daya rendah. Konfigurasi *Plug-in* P4 dalam penelitian tersebut juga menunjukkan potensi pengurangan CO_2 sebesar 7,2% dan biaya sebesar 9,5%.

Tabel 5. Perbandingan Pendekatan Teknologi Mesin Pertanian Hemat Energi

Pendekatan	Prinsip teknologi	Potensi manfaat	Keterbatasan
Optimalisasi mesin konvensional	Pencocokan daya dan beban, pengaturan transmisi	Mengurangi konsumsi bahan bakar tanpa mengganti seluruh mesin	Bergantung pada kondisi mesin dan keterampilan pengoperasian
Mesin listrik	Motor listrik dan baterai	Mengurangi emisi langsung dan memungkinkan kendali tenaga yang fleksibel	Kapasitas baterai, durasi kerja, dan kebutuhan pengisian
Mesin hibrida	Integrasi mesin diesel dan motor listrik	Fleksibilitas sumber tenaga dan pengelolaan beban	Kompleksitas sistem serta biaya investasi
Mesin berbasis digital	Sensor, AI, dan sistem kendali	Pemantauan dan optimasi parameter operasi	Kebutuhan sensor, data, konektivitas, dan kompetensi teknis

Sumber: Disusun oleh penulis.

Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa setiap pendekatan mempunyai karakteristik dan kebutuhan penerapan yang berbeda. Optimalisasi mesin konvensional relatif mudah diterapkan pada usaha tani yang telah memiliki peralatan, sedangkan elektrifikasi dan sistem hibrida menawarkan peluang perubahan teknologi penggerak dalam jangka panjang. Teknologi digital berfungsi sebagai pendekatan pendukung yang meningkatkan kualitas pengambilan keputusan operasional. Oleh sebab itu, integrasi beberapa pendekatan dapat menjadi arah pengembangan yang lebih adaptif dibandingkan hanya mengandalkan satu jenis inovasi.

Efisiensi Energi dan Kinerja Operasional Mesin Pertanian

Efisiensi energi merupakan salah satu indikator utama dalam mengevaluasi kemampuan mesin pertanian menggunakan sumber daya secara optimal. Penilaiannya tidak cukup hanya berdasarkan jumlah bahan bakar atau energi yang dikonsumsi, tetapi perlu dikaitkan dengan luas lahan yang dikerjakan, kapasitas lapangan, kebutuhan daya, dan kualitas pekerjaan. Lampridi et al. (2020) menjelaskan bahwa estimasi kebutuhan energi operasi pertanian perlu memperhitungkan karakteristik mesin dan parameter kegiatan operasional. Hal ini menunjukkan bahwa mesin dengan konsumsi bahan bakar rendah belum tentu lebih efisien apabila kapasitas kerja dan kualitas hasil operasinya juga rendah.

Faktor kondisi lahan dan pengaturan implement juga menentukan kebutuhan energi. Damanauskas & Janulevičius (2022) menunjukkan bahwa konsumsi bahan bakar pada kegiatan pengolahan tanah dipengaruhi oleh jenis implement, tekstur tanah, kedalaman pengolahan, dan kecepatan maju. Dalam penelitian mereka, konsumsi bahan bakar tercatat pada kisaran 3,4-5,9 liter per hektare, bergantung pada kondisi tanah dan konfigurasi pengoperasian. Temuan ini memperlihatkan bahwa pengurangan kedalaman pengolahan dapat menjadi strategi penghematan bahan bakar, tetapi pengaturan tersebut tetap harus mempertimbangkan kebutuhan kualitas pengolahan dan pengelolaan residu tanaman. Dengan demikian, efisiensi tidak dapat dicapai hanya dengan menurunkan intensitas kerja tanpa memperhatikan tujuan agronomis.

Penggunaan teknologi kecerdasan buatan juga membuka peluang untuk memperbaiki efisiensi melalui prediksi kebutuhan bahan bakar dan rekomendasi parameter operasi. Nagar et al. (2024) mengembangkan model *artificial neural network* (ANN) untuk memprediksi *specific fuel consumption* (SFC) dan *fuel consumption per tilled area* (FCA). Model menggunakan informasi torsi poros belakang, kecepatan maju, konsumsi bahan bakar, posisi throttle, putaran mesin, dan kedalaman pengolahan. Hasil validasi sistem rekomendasi menunjukkan nilai *mean absolute percentage error* (MAPE) untuk prediksi SFC dan FCA masing-masing sebesar 7,56% dan 8,98% pada penggunaan bajak, 11,19% dan 9,36% pada *offset disc harrow*, serta 10,90% dan 10,57% pada *cultivator*. Hasil tersebut menunjukkan potensi AI untuk mendukung penentuan parameter pengoperasian yang lebih tepat, meskipun kinerja model tetap bergantung pada kualitas data dan kesesuaian kondisi penerapannya.

Bukti lain berasal dari pengujian traktor listrik dengan sistem penggerak roda. C.-K. Wen et al. (2024) mengembangkan traktor listrik berdaya 14,7 kW yang dilengkapi sistem penggerak motor listrik, ballast baterai, dan suspensi elektrohidraulik. Pengujian pembajakan menunjukkan bahwa pengendalian distribusi torsi aktif mampu menurunkan selip roda sebesar 14,83% dan meningkatkan efisiensi traksi sebesar 10,28% dibandingkan metode distribusi torsi rata-rata. Pengendalian gabungan traksi dan ballast juga menghasilkan peningkatan efisiensi traksi sebesar 3,7%, penurunan selip sebesar 15,05%, dan pengurangan konsumsi energi motor penggerak sebesar 4,9% dibandingkan pengendalian traksi konvensional. Temuan ini memperlihatkan bahwa desain sistem penggerak perlu disertai pengaturan distribusi torsi dan beban agar energi yang digunakan dapat dikonversi menjadi tenaga tarik secara lebih efektif.

Tabel 6. Indikator Evaluasi Efisiensi Energi dan Kinerja Operasional

Dimensi	Indikator	Satuan pengukuran	Tujuan evaluasi
Konsumsi energi	Konsumsi bahan bakar	L/jam atau L/ha	Mengukur penggunaan bahan bakar
Efisiensi energi	Konsumsi energi spesifik	MJ/ha atau kWh/ha	Mengukur energi per luas pekerjaan
Kinerja mesin	Daya dan torsi	kW dan Nm	Menilai kemampuan sistem penggerak
Kinerja traksi	Efisiensi traksi dan selip roda	%	Menilai efektivitas penyaluran tenaga
Kapasitas kerja	Kapasitas lapangan efektif	ha/jam	Mengukur produktivitas operasional
Kualitas pekerjaan	Kedalaman dan keseragaman pengolahan	cm dan %	Memastikan kualitas hasil kerja
Kinerja lingkungan	Emisi operasional	g CO_2 atau kg CO_2e	Mengevaluasi dampak emisi

Sumber: Disusun berdasarkan Lampridi et al. (2020), Damanauskas & Janulevičius (2022), Nagar et al. (2024), C.-K. Wen et al. (2024), dan Jensen et al. (2025).

Indikator dalam Tabel 6 memperlihatkan bahwa evaluasi mesin pertanian hemat energi perlu menggunakan beberapa ukuran secara bersamaan. Konsumsi bahan bakar per hektare dan energi per luas pekerjaan dapat digunakan untuk membandingkan kebutuhan energi antaroperasi, sedangkan efisiensi traksi dan selip roda menggambarkan efektivitas sistem penggerak. Kapasitas lapangan dan kualitas pekerjaan diperlukan untuk memastikan penghematan energi tidak menyebabkan penurunan produktivitas atau hasil agronomis. Dengan demikian, pengembangan mesin pertanian perlu mengutamakan efisiensi energi yang tetap mempertahankan kemampuan kerja dan kualitas operasional.

Kontribusi Teknologi Hemat Energi terhadap Produktivitas dan Keberlanjutan Pertanian

Produktivitas pertanian tidak hanya ditentukan oleh kapasitas mesin, tetapi juga oleh kemampuan teknologi dalam mengurangi waktu kerja, meningkatkan ketepatan operasi, dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya. Mekanisasi dapat mendukung peningkatan produktivitas tenaga kerja, pengurangan beban pekerjaan manual, dan perbaikan efisiensi proses produksi. Namun, dampak mekanisasi terhadap keberlanjutan tidak selalu positif apabila teknologi yang digunakan meningkatkan konsumsi sumber daya, pemadatan tanah, atau

tekanan terhadap ekosistem. Daum (2023) menjelaskan bahwa manfaat mekanisasi perlu dianalisis secara terpadu melalui dimensi ekonomi, sosial, dan lingkungan.

Dari aspek ekonomi operasional, penghematan bahan bakar dapat mengurangi salah satu komponen biaya produksi usaha tani. Jensen et al. (2025) mengemukakan bahwa biaya energi menyumbang sekitar 15% biaya produksi pertanian pada tingkat usaha tani dalam konteks yang dikaji. Oleh karena itu, optimalisasi penggunaan bahan bakar dan adopsi sumber energi yang lebih efisien memiliki potensi meningkatkan efektivitas biaya operasional. Namun, penghematan biaya energi harus dibandingkan dengan biaya investasi teknologi, pemeliharaan, penggantian baterai, dan kebutuhan infrastruktur agar manfaat ekonomi dapat dinilai secara lebih menyeluruh.

Pada aspek lingkungan, penggunaan mesin listrik dan hibrida dapat mengurangi emisi langsung selama kegiatan operasional, terutama ketika teknologi tersebut menggantikan penggunaan mesin diesel. Ozturk et al. (2024) melaporkan penurunan emisi CO_2 sebesar 8,93% pada skenario traktor hibrida yang dibandingkan dengan traktor konvensional. Mattetti et al. (2025) juga menunjukkan potensi pengurangan emisi CO_2 pada konfigurasi traktor hibrida Plug-in P4. Meskipun demikian, pengurangan emisi operasional tidak serta-merta menunjukkan bahwa seluruh siklus hidup teknologi mempunyai dampak lingkungan lebih rendah. Sumber listrik, proses produksi baterai, umur pakai komponen, dan pengelolaan limbah tetap perlu diperhitungkan. Oleh karena itu, pendekatan *life cycle assessment* (LCA) relevan untuk menilai dampak teknologi mesin secara lebih menyeluruh (Liu et al., 2024).

Hubungan antara mekanisasi dan keberlanjutan juga dipengaruhi oleh tingkat penerapan teknologi serta karakteristik wilayah pertanian. Yan et al. (2024) menemukan hubungan berbentuk U antara mekanisasi pertanian dan efisiensi lingkungan berdasarkan data tingkat rumah tangga dan wilayah di Tiongkok. Pada tingkat mekanisasi di bawah ambang tertentu, peningkatannya berhubungan dengan penurunan efisiensi lingkungan; setelah melewati ambang tersebut, peningkatan mekanisasi berkaitan dengan perbaikan efisiensi lingkungan. Temuan ini mengindikasikan bahwa manfaat mekanisasi tidak bersifat otomatis maupun linear. Tingkat pemanfaatan mesin, efisiensi teknologi, emisi karbon, serta kesesuaian terhadap kondisi wilayah perlu menjadi pertimbangan dalam pengembangan mekanisasi pertanian.

Berdasarkan sintesis tersebut, teknologi hemat energi dapat memberikan kontribusi terhadap produktivitas dan keberlanjutan melalui pengurangan konsumsi bahan bakar, peningkatan efisiensi kerja, optimasi kapasitas mesin, dan pengurangan emisi operasional. Namun, kontribusi tersebut perlu dievaluasi dengan mempertimbangkan keseluruhan biaya dan dampak lingkungan. Mesin yang hemat energi pada tahap operasi belum tentu menjadi pilihan paling berkelanjutan apabila memiliki biaya investasi sangat tinggi, usia pakai baterai terbatas, atau menggunakan sumber listrik dengan intensitas emisi yang tinggi.

Tabel 7. Hubungan Teknologi Mesin Hemat Energi dengan Produktivitas dan Keberlanjutan

Aspek	Mekanisme kontribusi	Indikator keberhasilan	Tantangan
Produktivitas	Mempercepat kegiatan dan meningkatkan kapasitas kerja	ha/jam, waktu kerja, kualitas pekerjaan	Kesesuaian mesin dengan kondisi lahan
Efisiensi ekonomi	Mengurangi konsumsi bahan bakar dan energi	Biaya energi per hektare	Investasi dan biaya pemeliharaan
Efisiensi operasional	Mengoptimalkan daya, torsi, dan parameter kerja	Konsumsi bahan bakar, efisiensi traksi	Variasi beban dan kondisi tanah
Lingkungan	Mengurangi emisi operasional dan penggunaan energi fosil	Emisi CO_2e, energi terbarukan	Sumber listrik dan dampak baterai
Keberlanjutan sistem	Mengintegrasikan kinerja ekonomi, sosial, dan lingkungan	Efisiensi sumber daya dan kelayakan penerapan	Akses teknologi dan kesenjangan adopsi

Sumber: Sintesis penulis berdasarkan Daum (2023), Jensen et al. (2025), Ozturk et al. (2024), Liu et al. (2024), dan Yan et al. (2024).

Tantangan dan Peluang Pengembangan Mesin Pertanian Hemat Energi

Meskipun inovasi mesin pertanian hemat energi menunjukkan perkembangan yang positif, implementasinya masih menghadapi sejumlah tantangan. Tantangan pertama adalah biaya investasi dan kompleksitas teknologi. Mesin listrik dan hibrida membutuhkan komponen tambahan, seperti baterai, motor listrik, sistem kontrol elektronik, dan perangkat manajemen energi. Kondisi tersebut dapat meningkatkan kebutuhan investasi awal serta memerlukan kompetensi teknis untuk pemeliharaan. Yu et al. (2025) mengidentifikasi bahwa pengembangan sistem penggerak dan strategi manajemen energi merupakan aspek penting dalam meningkatkan efisiensi, kemampuan adaptasi, dan keandalan traktor listrik.

Tantangan kedua berkaitan dengan kapasitas penyimpanan energi dan keberlanjutan operasi. Kegiatan pertanian tertentu membutuhkan tenaga besar dan berlangsung dalam durasi panjang, sehingga kapasitas baterai dan ketersediaan fasilitas pengisian menjadi faktor penting. Penggunaan energi listrik juga perlu mempertimbangkan sumber pembangkitnya agar pengurangan emisi operasional tidak diikuti perpindahan beban lingkungan ke sektor penyediaan energi. Scolaro et al. (2021) dan Liu et al. (2024) menunjukkan pentingnya memperhatikan aspek teknis elektrifikasi dan penilaian energi serta lingkungan secara lebih luas.

Tantangan ketiga adalah kesesuaian teknologi dengan karakteristik usaha tani. Perbedaan jenis tanah, luas lahan, pola tanam, kapasitas ekonomi petani, dan intensitas penggunaan mesin dapat memengaruhi kelayakan penerapan teknologi. Mesin dengan spesifikasi tinggi tidak selalu menjadi pilihan paling tepat apabila kapasitasnya tidak sesuai dengan kebutuhan operasional. Daum (2023) menegaskan bahwa mekanisasi perlu disertai solusi teknologi dan kelembagaan yang mempertimbangkan karakteristik sistem pertanian agar manfaat sosial-ekonomi dapat dicapai tanpa meningkatkan risiko lingkungan.

Di sisi lain, perkembangan teknologi memberikan peluang melalui penggunaan sistem hibrida, energi terbarukan, kecerdasan buatan, sensor, dan sistem pemantauan digital. Teknologi tersebut dapat mendukung pengoperasian mesin yang lebih adaptif terhadap kondisi lahan dan kebutuhan daya. Pengembangan berikutnya perlu mengarah pada desain modular, sistem manajemen energi yang cerdas, penggunaan komponen yang mudah dipelihara, dan integrasi sumber energi terbarukan yang sesuai dengan kondisi wilayah.

Tabel 8. Tantangan dan Peluang Pengembangan Mesin Pertanian Hemat Energi

Aspek	Tantangan	Peluang pengembangan
Teknologi	Kompleksitas sistem penggerak dan kendali	Desain modular dan sistem kendali cerdas
Energi	Kapasitas baterai dan keterbatasan pengisian	Integrasi energi surya dan sistem hibrida
Ekonomi	Investasi awal dan biaya pemeliharaan	Teknologi terjangkau dan skema penggunaan bersama
Operasional	Variasi kondisi tanah dan beban kerja	Sensor dan penyesuaian parameter otomatis
Lingkungan	Dampak produksi baterai dan sumber listrik	Evaluasi daur hidup dan energi rendah karbon
Kelembagaan	Keterbatasan keterampilan dan infrastruktur	Pelatihan, layanan teknis, dan dukungan kebijakan

Sumber: Sintesis penulis berdasarkan Daum (2023), Scolaro et al. (2021), Liu et al. (2024), Jensen et al. (2025), dan Yu et al. (2025).

Hasil sintesis menunjukkan bahwa tantangan pengembangan tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga berkaitan dengan aspek ekonomi, lingkungan, dan kelembagaan. Karena itu, pengembangan mesin pertanian hemat energi perlu menerapkan pendekatan yang adaptif dan mempertimbangkan kapasitas pengguna. Dalam konteks pertanian skala kecil, teknologi sederhana yang mudah dipelihara dan mempunyai efisiensi operasional memadai dapat menjadi alternatif yang lebih realistis dibandingkan mesin berteknologi tinggi dengan biaya investasi besar.

Kerangka Konseptual Pengembangan Mesin Pertanian Hemat Energi

Berdasarkan hasil analisis dan sintesis literatur, penelitian ini mengembangkan kerangka konseptual yang mengintegrasikan empat dimensi utama, yaitu inovasi teknologi mesin, optimalisasi energi, kinerja operasional dan produktivitas, serta keberlanjutan lingkungan. Kerangka ini dibangun berdasarkan pemahaman bahwa pengembangan mesin pertanian hemat energi merupakan proses terpadu yang melibatkan pemilihan teknologi, pengelolaan penggunaan energi, pencapaian kinerja operasional, dan evaluasi dampak lingkungan. Dimensi pertama adalah inovasi teknologi mesin pertanian, yang mencakup pengembangan sistem penggerak konvensional yang dioptimalkan, elektrifikasi, sistem hibrida, serta penerapan teknologi digital dan pengendalian cerdas. Inovasi tersebut menyediakan alternatif teknologi yang dapat disesuaikan dengan karakteristik pekerjaan dan kapasitas usaha tani (Scolaro et al., 2021; Yu et al., 2025).

Dimensi kedua adalah optimalisasi konsumsi energi, yang mencakup pencocokan daya dengan beban kerja, pengaturan transmisi, pengelolaan distribusi energi, dan pengendalian konsumsi bahan bakar. Pendekatan tersebut bertujuan memastikan penggunaan energi sesuai dengan kebutuhan operasional mesin (Jensen et al., 2025; Ozturk et al., 2024). Dimensi ketiga adalah kinerja operasional dan produktivitas, yang mencakup kapasitas lapangan, efisiensi traksi, konsumsi energi per luas lahan, kualitas pekerjaan, serta waktu operasional. Pengukuran dimensi ini diperlukan untuk memastikan bahwa penghematan energi tidak mengurangi efektivitas penggunaan mesin. Hasil penelitian C.-K. Wen et al. (2024) dan Nagar et al. (2024) memperlihatkan bahwa pengendalian traksi dan rekomendasi parameter berbasis kecerdasan buatan dapat mendukung peningkatan kinerja operasional.

Dimensi keempat adalah keberlanjutan lingkungan, yang mencakup pengurangan emisi, efisiensi sumber daya, pemanfaatan energi terbarukan, dan evaluasi dampak lingkungan sepanjang siklus hidup teknologi. Penilaian dimensi ini penting karena peningkatan mekanisasi dapat memberikan manfaat produktivitas sekaligus menimbulkan risiko lingkungan apabila tidak disertai pengelolaan yang sesuai (Daum, 2023; Liu et al., 2024). Keempat dimensi tersebut membentuk hubungan konseptual yang saling terkait. Inovasi teknologi menyediakan dasar pengembangan mesin, optimalisasi energi mengarahkan penggunaan sumber daya, kinerja operasional mencerminkan efektivitas penerapan teknologi, sedangkan keberlanjutan lingkungan menjadi pertimbangan dalam mengevaluasi manfaat jangka panjang. Hasil evaluasi operasional dan lingkungan selanjutnya dapat digunakan sebagai umpan balik untuk memperbaiki desain serta strategi pengelolaan energi. Dengan demikian, kerangka ini tidak hanya menggambarkan urutan komponen, tetapi juga menunjukkan perlunya proses evaluasi dan penyempurnaan teknologi secara berkelanjutan.



Gambar 2. Kerangka Konseptual Pengembangan Mesin Pertanian Hemat Energi untuk Mendukung Produktivitas dan Keberlanjutan Pertanian

Kerangka konseptual pada Gambar 2 menunjukkan bahwa keberhasilan pengembangan mesin pertanian hemat energi tidak hanya ditentukan oleh inovasi sistem penggerak, tetapi juga oleh kemampuan teknologi dalam mengoptimalkan energi, mempertahankan kinerja operasional, dan mengurangi dampak lingkungan. Hubungan antardimensi tersebut membentuk proses pengembangan yang bersifat integratif dan berkelanjutan. Evaluasi pada dimensi kinerja operasional dan lingkungan dapat menjadi dasar perbaikan teknologi sehingga pengembangan mesin berikutnya lebih sesuai dengan kebutuhan pertanian.

Kerangka ini juga memberikan implikasi bahwa pemilihan teknologi harus disesuaikan dengan karakteristik penggunaan. Pada usaha tani dengan kebutuhan daya tinggi dan durasi operasi panjang, sistem hibrida dapat dipertimbangkan sebagai alternatif untuk menggabungkan kemampuan mesin diesel dan motor listrik. Sementara itu, optimalisasi mesin konvensional dan penggunaan teknologi digital dapat menjadi pilihan pada usaha tani yang belum memungkinkan melakukan elektrifikasi secara menyeluruh. Dengan demikian, tidak terdapat satu konfigurasi teknologi yang berlaku untuk seluruh kondisi pertanian. Pengembangan mesin perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kebutuhan energi, kemampuan kerja, biaya penerapan, dan dampak lingkungan.

Secara keseluruhan, hasil sintesis memperlihatkan bahwa pengembangan mesin pertanian hemat energi perlu diarahkan pada integrasi inovasi teknologi, efisiensi penggunaan energi, kinerja operasional, dan keberlanjutan lingkungan. Kontribusi utama penelitian ini adalah kerangka konseptual yang dapat menjadi landasan untuk penelitian lanjutan mengenai desain mesin, pemilihan sistem penggerak, pengembangan algoritma manajemen energi, serta evaluasi kinerja dan dampak lingkungan. Namun, karena kerangka ini dikembangkan melalui studi literatur, validasi empiris masih diperlukan untuk mengetahui efektivitas penerapannya pada berbagai jenis mesin dan kondisi pertanian.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi literatur, pengembangan mesin pertanian hemat energi merupakan salah satu pendekatan strategis untuk meningkatkan produktivitas sekaligus mendukung keberlanjutan pertanian. Hasil sintesis menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi energi dapat dilakukan melalui optimalisasi mesin konvensional, penerapan teknologi elektrifikasi dan sistem hibrida, serta pemanfaatan teknologi digital untuk mengendalikan dan memantau kinerja operasional. Efektivitas teknologi tersebut dipengaruhi oleh kesesuaian daya dengan beban kerja, pengelolaan konsumsi energi, kondisi lahan, kapasitas lapangan, dan kualitas pekerjaan. Penelitian ini menghasilkan kerangka konseptual yang mengintegrasikan empat dimensi utama, yaitu inovasi teknologi mesin pertanian, optimalisasi konsumsi energi, kinerja operasional dan produktivitas, serta keberlanjutan lingkungan. Keempat dimensi tersebut menunjukkan bahwa pengembangan mesin pertanian hemat energi perlu dilakukan secara terpadu dengan mempertimbangkan efisiensi teknis, kelayakan operasional, dan dampak lingkungan sepanjang siklus hidup teknologi. Meskipun demikian, kerangka konseptual yang dihasilkan masih didasarkan pada sintesis literatur dan belum divalidasi melalui pengembangan prototipe maupun pengujian lapangan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan dan menguji model teknologi berdasarkan jenis mesin, karakteristik lahan, dan kebutuhan usaha tani yang berbeda, serta melakukan evaluasi teknis, ekonomi, dan lingkungan menggunakan pendekatan life cycle assessment. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi landasan konseptual bagi pengembangan mekanisasi pertanian yang lebih efisien, adaptif, ekonomis, dan berkelanjutan.

DAFTAR PUSTAKA

Byrne, D. (2022). A Worked Example of Braun and Clarke's Approach to Reflexive Thematic Analysis. *Quality & Quantity*, *56*, 1391–1412. https://doi.org/10.1007/s11135-021-01182-y

Damanauskas, V., & Janulevičius, A. (2022). Effect of tillage implement (spring tine cultivator, disc harrow), soil texture, forward speed, and tillage depth on fuel consumption and tillage quality. *Journal of Agricultural Engineering*, *53*(3). https://doi.org/10.4081/jae.2022.1371

Daum, T. (2023). Mechanization and sustainable agri-food system transformation in the Global South: A review. *Agronomy for Sustainable Development*, *43*. https://doi.org/10.1007/s13593-023-00868-x

Jensen, T. A., Antille, D. L., & Tullberg, J. N. (2025). Improving on-farm energy use efficiency by optimizing machinery operations and management: A review. *Agricultural Research*, *14*, 15–33. https://doi.org/10.1007/s40003-024-00824-5

Kim, Y.-S., Kim, W.-S., Baek, S.-Y., Baek, S.-M., Kim, Y.-J., Lee, S.-D., & Kim, Y.-J. (2020). Analysis of tillage depth and gear selection for mechanical load and fuel efficiency of an agricultural tractor using an agricultural field measuring system. *Sensors*, *20*(9). https://doi.org/10.3390/s20092450

Lampridi, M., Kateris, D., Sørensen, C. G., & Bochtis, D. (2020). Energy footprint of mechanized agricultural operations. *Energies*, *13*(3). https://doi.org/10.3390/en13030769

Liu, W., Yang, R., Li, L., Zhao, C., & Li, G. (2024). Energy and environmental evaluation and comparison of a diesel-electric hybrid tractor, a conventional tractor, and a hillside mini-tiller using the life cycle assessment method. *Journal of Cleaner Production*, *469*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143232

Mattetti, M., Annesi, G., Intrevado, F. P., & Alberti, L. (2025). Investigating the efficiency of hybrid architectures for agricultural tractors using real-world farming data. *Applied Energy*, *377*. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.124499

Mocera, F., Somà, A., Martelli, S., & Martini, V. (2023). Trends and future perspective of electrification in agricultural tractor-implement applications. *Energies*, *16*(18). https://doi.org/10.3390/en16186601

Nagar, H., Machavaram, R., Kulkarni, P., & Soni, P. (2024). AI-based engine performance prediction cum advisory system to maximise fuel efficiency and field performance of the tractor for optimum tillage. *Systems Science & Control Engineering*, *12*(1). https://doi.org/10.1080/21642583.2024.2347936

Nowell, L. S., Norris, J. M., White, D. E., & Moules, N. J. (2017). Thematic analysis: Striving to meet the trustworthiness criteria. *International Journal of Qualitative Methods*, *16*(1), 1–13. https://doi.org/10.1177/1609406917733847

Onwuegbuzie, A. J., Leech, N. L., & Collins, K. M. T. (2012). Qualitative analysis techniques for the review of the literature. *The Qualitative Report*, *17*(28), 1–28. https://doi.org/10.46743/2160-3715/2012.1754

Ozturk, M., Sandalci, T., Buyuk, C., Guclu, M., & Karagoz, Y. (2024). The effect of converting a conventional tractor into a hybrid drive tractor using the ECMS method on fuel consumption and emissions. *International Journal of Energy Research*, *2024*(1). https://doi.org/10.1155/2024/8832086

Paul, J., & Criado, A. R. (2020). The art of writing literature review: What do we know and what do we need to know? *International Business Review*, *29*(4), 101717. https://doi.org/10.1016/j.ibusrev.2020.101717

Scolaro, E., Beligoj, M., Estevez, M. P., Alberti, L., Renzi, M., & Mattetti, M. (2021). Electrification of agricultural machinery: A review. *IEEE Access*, *9*, 164520–164541. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3135037

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

Torraco, R. J. (2016). Writing integrative literature reviews: Using the past and present to explore the future. *Human Resource Development Review*, *15*(4), 404–428. https://doi.org/10.1177/1534484316671606

Watson, R. T., & Webster, J. (2020). Analysing the past to prepare for the future: Writing a literature review a roadmap for release 2.0. *Journal of Decision Systems*, *29*(3), 129–147. https://doi.org/10.1080/12460125.2020.1798591

Wen, C., Zhao, Z., Song, Z., Yan, X., Yin, Y., Ni, X., Meng, Z., & Xie, B. (2026). Development of a smart IoT-based monitoring system for high-power tractor tillage to evaluate operational efficiency and consumption. *Measurement*. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2026.121574

Wen, C.-K., Ren, W., Zhu, Q.-Z., Zhao, C.-J., Luo, Z.-H., Zhang, S.-L., Xie, B., & Meng, Z.-J. (2024). Reducing operation emissions and improving work efficiency using a pure electric wheel drive tractor. *Engineering*, *37*(6), 230–245. https://doi.org/10.1016/j.eng.2024.01.026

Yan, F., Sun, X., Chen, S., & Dai, G. (2024). Does agricultural mechanization improve agricultural environmental efficiency? *Frontiers in Environmental Science*, *11*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1344903

Yang, Y., Wen, Y., Sun, X., Wang, R., & Dong, Z. (2025). A review of green agriculture and energy management strategies for hybrid tractors. *Energies*, *18*(13). https://doi.org/10.3390/en18133224

Yu, Q., He, X., Liu, L., Tan, Y., Jiang, Z., Pan, X., Zhang, M., Zhang, Z., Xie, B., Wen, C., Fan, R., Chen, J., Shi, F., Li, S., Zhang, X., & Chen, H. (2025). A review on the powertrains and energy management strategies of electric tractors. *The Innovation Energy*, *2*(1). https://doi.org/10.59717/j.xinn-energy.2024.100064

Zhang, C., Li, J., Li, C., Lin, P., Shi, L., & Xiao, B. (2025). Electrification and smartification for modern tractors: A review of algorithms and techniques. *Agriculture*, *15*(18). https://doi.org/10.3390/agriculture15181943

Zhou, K., Bochtis, D., Jensen, A. L., Kateris, D., & Sørensen, C. G. (2020). Introduction of a new index of field operations efficiency. *Applied Sciences*, *10*(1). https://doi.org/10.3390/app10010329