

Keunggulan Operasional melalui Manufaktur Hijau pada Industri Daur Ulang Plastik: Tinjauan Naratif

Samsul Ikhbar¹, Maksalmina^{2*}, Mahdi³, Ulfia⁴, Arsyad⁵, Rahmawati⁶

^{1,5,6}Program Studi Manajemen, Fakultas Ekonomi, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh

^{2,3,4}Program Studi Akuntansi, Fakultas Ekonomi, Universitas Serambi Mekkah, Banda Aceh

*Koresponden email: maksalmina@serambimekkah.ac.id

Diterima: 26 Juli 2026

Diterima: 3 Agustus 2026

Abstract

Green manufacturing has emerged as a strategic approach to improving operational excellence while supporting sustainable development in the plastic recycling industry. However, previous studies have primarily examined production efficiency, waste reduction, or technological innovation separately, providing limited comprehensive understanding of how green manufacturing contributes to operational excellence within a circular economy framework. This study aims to analyze the concept of green manufacturing, examine its implementation in enhancing operational excellence, identify major implementation challenges, and explore future research opportunities in the plastic recycling industry. A qualitative descriptive approach using a narrative literature review was employed by synthesizing publications from Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Taylor & Francis Online, and Google Scholar. The literature was analyzed using narrative and thematic approaches. The findings indicate that green manufacturing implementation is increasingly supported by Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), automation, energy-efficient technologies, Environmental, Social, and Governance (ESG) practices, and Life Cycle Assessment (LCA). Nevertheless, implementation remains constrained by high investment costs, technological limitations, regulatory challenges, and organizational readiness. This study provides a comprehensive synthesis of current knowledge while identifying future research directions to strengthen operational excellence and accelerate the transition toward a more competitive, resource-efficient, and sustainable plastic recycling industry.

Keywords: *green manufacturing, operational excellence, plastic recycling, narrative review*

Abstrak

Manufaktur hijau (green manufacturing) merupakan pendekatan strategis dalam meningkatkan keunggulan operasional sekaligus mendukung keberlanjutan industri daur ulang plastik. Namun, sebagian besar penelitian masih membahas efisiensi produksi, pengurangan limbah, atau inovasi teknologi secara terpisah sehingga belum memberikan gambaran yang komprehensif mengenai kontribusi manufaktur hijau terhadap keunggulan operasional dalam kerangka ekonomi sirkular. Penelitian ini bertujuan menganalisis konsep manufaktur hijau, mengkaji penerapannya dalam meningkatkan keunggulan operasional, mengidentifikasi berbagai tantangan implementasi, serta mengeksplorasi peluang penelitian di masa depan pada industri daur ulang plastik. Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode narrative literature review melalui sintesis publikasi ilmiah dari Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Taylor & Francis Online, dan Google Scholar. Analisis dilakukan secara naratif dan tematik. Hasil kajian menunjukkan bahwa penerapan manufaktur hijau semakin didukung oleh *Artificial Intelligence* (AI), *Internet of Things* (IoT), otomatisasi, teknologi hemat energi, *Environmental, Social, and Governance* (ESG), serta *Life Cycle Assessment* (LCA). Namun demikian, implementasinya masih menghadapi tantangan berupa tingginya biaya investasi, keterbatasan teknologi, regulasi yang belum optimal, dan kesiapan organisasi. Kajian ini memberikan sintesis komprehensif serta mengidentifikasi arah penelitian untuk memperkuat keunggulan operasional menuju industri daur ulang plastik yang lebih efisien, berdaya saing, dan berkelanjutan.

Kata Kunci: *manufaktur hijau; keunggulan operasional; daur ulang plastik; tinjauan naratif*

1. Pendahuluan

Perubahan paradigma pembangunan industri menuju keberlanjutan telah mendorong perusahaan untuk mengintegrasikan aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial dalam seluruh proses operasionalnya. Salah satu pendekatan yang berkembang pesat adalah manufaktur hijau (*green manufacturing*), yaitu sistem produksi yang dirancang untuk meminimalkan dampak lingkungan melalui efisiensi penggunaan sumber

daya, pengurangan limbah dan emisi, serta penerapan teknologi yang lebih ramah lingkungan [1]. Dalam industri daur ulang plastik, konsep manufaktur hijau memiliki peran yang sangat penting karena tidak hanya berorientasi pada pengolahan kembali limbah plastik menjadi produk bernilai tambah, tetapi juga memastikan bahwa seluruh proses produksi berlangsung secara efisien dan berkelanjutan [2], [3]. Peningkatan konsumsi plastik global yang tidak diimbangi dengan pengelolaan limbah yang efektif telah menjadi tantangan besar bagi keberlanjutan industri, sehingga diperlukan transformasi proses manufaktur menuju sistem yang lebih hijau dan efisien [4], [5]. Sejalan dengan itu, konsep ekonomi sirkular semakin menempatkan manufaktur hijau sebagai salah satu strategi utama untuk meningkatkan produktivitas sekaligus mengurangi tekanan terhadap lingkungan [6].

Dalam beberapa tahun terakhir, penerapan manufaktur hijau mengalami perkembangan yang signifikan seiring dengan kemajuan teknologi digital dan meningkatnya tuntutan terhadap praktik industri yang berkelanjutan. Berbagai inovasi seperti *Artificial Intelligence (AI)*, *Internet of Things (IoT)*, otomatisasi proses, sensor cerdas, teknologi hemat energi, serta sistem pemantauan emisi berbasis data telah dimanfaatkan untuk meningkatkan efisiensi penggunaan material dan energi dalam proses produksi [7], [8]. Pada industri daur ulang plastik, penerapan teknologi tersebut memungkinkan perusahaan mengurangi kehilangan material, meningkatkan kualitas produk hasil daur ulang, serta menekan konsumsi energi dan emisi karbon sepanjang proses produksi [9], [10]. Selain itu, meningkatnya implementasi standar *Environmental, Social, and Governance (ESG)* dan *target net-zero emission* mendorong perusahaan untuk menjadikan manufaktur hijau sebagai bagian dari strategi keunggulan operasional dan daya saing jangka panjang [11], [12].

Meskipun manfaat manufaktur hijau telah banyak dilakukan dalam berbagai penelitian, implementasinya pada industri daur ulang plastik masih menghadapi sejumlah tantangan. Tingginya biaya investasi teknologi ramah lingkungan, keterbatasan akses terhadap teknologi modern, kurangnya sumber daya manusia yang kompeten, serta belum optimalnya dukungan kebijakan dan infrastruktur menjadi hambatan utama, terutama di negara berkembang [13], [14]. Selain itu, sebagian perusahaan masih menghadapi kesulitan dalam mengintegrasikan aspek efisiensi operasional dengan tujuan keberlanjutan secara bersamaan. Keberhasilan penerapan manufaktur hijau tidak hanya bergantung pada inovasi teknologi, tetapi juga memerlukan perubahan budaya organisasi, komitmen manajemen, serta kolaborasi antara pemerintah, industri, akademisi, dan masyarakat [15], [16]. Oleh karena itu, kajian mengenai hubungan antara manufaktur hijau dan keunggulan operasional menjadi semakin penting untuk memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilannya.

Meskipun penelitian mengenai manufaktur hijau terus berkembang, sebagian besar kajian masih berfokus pada efisiensi produksi, pengurangan limbah, atau inovasi teknologi secara terpisah [1], [17]. Penelitian yang mengintegrasikan konsep manufaktur hijau, keunggulan operasional, ekonomi sirkular, dan karakteristik industri daur ulang plastik dalam satu kerangka analisis masih relatif terbatas, khususnya dalam bentuk tinjauan naratif (*narrative review*). Selain itu, kajian mengenai penerapan manufaktur hijau pada industri daur ulang plastik di negara berkembang, pengembangan indikator kinerja operasional yang berorientasi keberlanjutan, serta implikasi kebijakan terhadap peningkatan daya saing industri masih memerlukan eksplorasi lebih lanjut. Kesenjangan penelitian (*research gap*) ini menunjukkan perlunya sintesis literatur yang mampu menghubungkan berbagai temuan penelitian sehingga memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai arah perkembangan manufaktur hijau dalam industri daur ulang plastik.

Artikel ini mengkaji secara komprehensif konsep manufaktur hijau dalam industri daur ulang plastik, menganalisis penerapannya dalam meningkatkan keunggulan operasional, mengidentifikasi berbagai tantangan implementasi, serta mengeksplorasi peluang penelitian di masa depan melalui pendekatan tinjauan naratif. Kontribusi utama artikel ini adalah menyajikan sintesis literatur terkini yang mengintegrasikan perspektif manajemen operasi, manufaktur hijau, ekonomi sirkular, inovasi teknologi, dan kebijakan publik dalam satu kerangka analisis yang terpadu. Selain mengisi *research gap* mengenai keterkaitan antara manufaktur hijau dan keunggulan operasional pada industri daur ulang plastik, hasil kajian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi akademisi dalam mengembangkan penelitian lanjutan, bagi pelaku industri dalam meningkatkan efisiensi dan daya saing operasional, serta bagi pemerintah dalam merumuskan kebijakan yang mendorong transformasi menuju industri manufaktur yang lebih hijau, berdaya saing, dan berkelanjutan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif dengan metode *review literatur* dan analisis naratif (*narrative literature review*) untuk mengkaji penerapan manufaktur hijau (*green*

manufacturing) dalam meningkatkan keunggulan operasional pada industri daur ulang plastik, khususnya yang berkaitan dengan perkembangan konsep, implementasi, berbagai tantangan, serta prospek penelitian di masa depan. Pendekatan ini dipilih karena mampu menghasilkan sintesis konseptual yang komprehensif terhadap berbagai hasil penelitian terdahulu sekaligus mengintegrasikan perspektif manajemen operasi, manufaktur hijau, ekonomi sirkular, teknologi digital, keberlanjutan, dan kebijakan publik ke dalam satu kerangka analisis yang utuh. Melalui pendekatan naratif, penelitian ini tidak hanya mendeskripsikan perkembangan penerapan manufaktur hijau, tetapi juga mengidentifikasi hubungan antar konsep, tren penelitian, serta berbagai kesenjangan penelitian yang masih memerlukan kajian lebih lanjut.

Pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur terhadap artikel ilmiah, buku, laporan organisasi internasional, serta dokumen penelitian yang diperoleh dari berbagai basis data akademik, seperti Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Wiley Online Library, Taylor & Francis Online, dan Google Scholar. Literatur yang digunakan diprioritaskan pada publikasi bereputasi internasional yang diterbitkan dalam sepuluh tahun terakhir, dengan tetap mempertimbangkan beberapa referensi klasik yang memiliki kontribusi fundamental terhadap pengembangan konsep *green manufacturing*, *plastic recycling*, *operational excellence*, dan *circular economy*. Proses penelusuran literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci, antara lain *green manufacturing*, *plastic recycling*, *operational excellence*, *circular economy*, *clean production*, *resource efficiency*, *energy efficiency*, *Industry 4.0*, *Artificial Intelligence*, *Internet of Things*, *Environmental, Social, and Governance (ESG)*, dan *Life Cycle Assessment (LCA)*.

Selanjutnya, seluruh literatur yang relevan diklasifikasikan ke dalam beberapa tema utama penelitian, yaitu: (a) konsep manufaktur hijau pada industri daur ulang plastik, (b) penerapan manufaktur hijau dalam meningkatkan keunggulan operasional, (c) berbagai tantangan implementasi dari aspek teknologi, ekonomi, organisasi, dan regulasi, (d) prospek penelitian dan arah pengembangan di masa depan, serta (e) implikasi manajerial, kebijakan, dan keberlanjutan terhadap pengembangan sistem manufaktur hijau pada industri daur ulang plastik. Pengelompokan tematik tersebut bertujuan mempermudah proses sintesis literatur sekaligus membangun hubungan konseptual antarhasil penelitian.

Analisis data dilakukan secara naratif dan tematik (*thematic narrative analysis*) dengan membandingkan, mengintegrasikan, serta menginterpretasikan berbagai temuan penelitian terdahulu untuk mengidentifikasi pola perkembangan, persamaan hasil penelitian, perbedaan pendekatan, serta peluang penelitian lanjutan. Selain itu, penelitian ini menggunakan tabel sintesis literatur untuk memperlihatkan kontribusi masing-masing referensi terhadap pengembangan konsep *green manufacturing* dan *operational excellence*, sehingga menghasilkan kerangka analisis yang lebih sistematis mengenai implementasi, tantangan, dan prospek pengembangan manufaktur hijau pada industri daur ulang plastik. Pendekatan ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai transformasi sistem produksi menuju model manufaktur yang lebih efisien, ramah lingkungan, berdaya saing, dan berkelanjutan.

Tabel 1. Sumber Literatur dan Kontribusi dalam Penelitian

Sumber Literatur	Tahun	Kontribusi dalam Penelitian
Li et al. <i>Green Production and Green Technology for Sustainability</i>	2023	Menjelaskan konsep dasar manufaktur hijau, efisiensi sumber daya, dan pengurangan limbah dalam sistem produksi berkelanjutan.
OECD. <i>Improving Plastics Management</i>	2022	Memberikan landasan kebijakan pengelolaan plastik dan keterkaitannya dengan ekonomi sirkular.
King & Locock. <i>A Circular Economy Framework for Plastics</i>	2022	Menjelaskan hubungan manufaktur hijau dengan ekonomi sirkular pada industri plastik.
Abubakr et al. <i>Sustainable and Smart Manufacturing</i>	2020	Menjadi dasar konseptual integrasi manufaktur berkelanjutan dan teknologi cerdas.
Sartal et al. <i>The Sustainable Manufacturing Concept</i>	2020	Menguraikan evolusi konsep manufaktur hijau dan peluang implementasi pada Industry 4.0.
Jiang & Bateer. <i>A Systematic Review of Plastic Recycling</i>	2025	Menjelaskan penerapan teknologi daur ulang plastik serta dampaknya terhadap efisiensi operasional.
Skoczkowski et al. <i>Carbon-Neutral Supply Chains</i>	2025	Menggambarkan efisiensi energi dan dekarbonisasi dalam sistem manufaktur.
Sharma et al. <i>Supply Chain Decarbonisation and ESG</i>	2023	Menjelaskan keterkaitan ESG, keberlanjutan, dan keunggulan operasional.
Hughes et al. <i>Future of Manufacturing within Industry 4.0</i>	2022	Menjelaskan peran AI, IoT, otomatisasi, dan transformasi digital dalam manufaktur modern.

Sumber Literatur	Tahun	Kontribusi dalam Penelitian
Zhou et al. <i>Circular Economy in Plastic Manufacturing Industry</i>	2025	Mengidentifikasi arah pengembangan manufaktur hijau dan peluang penelitian pada industri plastik.

3. Konsep Manufaktur Hijau dalam Industri Daur Ulang Plastik

Manufaktur hijau (*green manufacturing*) merupakan pendekatan sistem produksi yang bertujuan meminimalkan dampak lingkungan melalui penggunaan sumber daya secara efisien, pengurangan limbah dan emisi, serta pemanfaatan teknologi yang ramah lingkungan [1], [18]. Berbeda dengan sistem manufaktur konvensional yang berorientasi pada produktivitas dan biaya, manufaktur hijau mengintegrasikan aspek ekonomi, lingkungan, dan sosial dalam setiap tahapan proses produksi [18], [19]. Dalam industri daur ulang plastik, konsep ini berperan penting karena tidak hanya mengolah limbah menjadi produk bernilai tambah, tetapi juga memastikan bahwa proses produksi berlangsung secara hemat energi, efisien dalam penggunaan material, dan menghasilkan emisi seminimal mungkin [20]. Manufaktur hijau merupakan salah satu pilar utama ekonomi sirkular karena mampu memperpanjang siklus hidup material sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya [4].

Penerapan manufaktur hijau didasarkan pada beberapa prinsip utama, yaitu efisiensi penggunaan material dan energi, pengurangan limbah (*waste minimization*), penggunaan energi terbarukan, pengendalian emisi, penerapan teknologi bersih (*clean technology*), serta pendekatan *life cycle thinking* dalam pengelolaan produk [21]. Pada industri daur ulang plastik, prinsip-prinsip tersebut diwujudkan melalui optimalisasi proses *mechanical recycling* dan *chemical recycling*, penggunaan mesin hemat energi, otomatisasi proses produksi, serta pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) dan *Internet of Things* (IoT) untuk meningkatkan efisiensi operasional. Digitalisasi proses manufaktur mampu meningkatkan produktivitas sekaligus menurunkan konsumsi energi dan emisi karbon, sehingga mendukung implementasi industri yang lebih berkelanjutan.

Tabel 2. Konsep dan Peran Manufaktur Hijau pada Industri Daur Ulang Plastik

Aspek Manufaktur Hijau	Penerapan pada Industri Daur Ulang Plastik	Kontribusi terhadap Keunggulan Operasional
Efisiensi material	Optimalisasi penggunaan bahan baku daur ulang	Menurunkan biaya produksi
Efisiensi energi	Mesin hemat energi, energi terbarukan	Mengurangi konsumsi energi dan biaya operasional
Pengurangan limbah	Mechanical recycling, chemical recycling, pemanfaatan limbah proses	Meningkatkan efisiensi sumber daya
Teknologi hijau	AI, IoT, otomatisasi, sensor cerdas	Meningkatkan produktivitas dan kualitas produk
Keberlanjutan	Pengurangan emisi, kepatuhan regulasi, pendekatan LCA	Meningkatkan daya saing dan keberlanjutan perusahaan

Sumber: Diadaptasi dari [4], [18], [19], [21]

Hubungan antara manufaktur hijau dan keunggulan operasional terlihat dari kemampuannya meningkatkan efisiensi biaya, kualitas produk, fleksibilitas proses, dan keberlanjutan perusahaan. Efisiensi penggunaan material serta pengurangan limbah dapat menurunkan biaya produksi, sedangkan penerapan teknologi modern meningkatkan produktivitas dan konsistensi kualitas produk hasil daur ulang. Selain itu, penerapan manufaktur hijau memperkuat citra perusahaan, meningkatkan kepatuhan terhadap regulasi lingkungan, serta menciptakan keunggulan kompetitif jangka panjang. Integrasi manufaktur hijau dengan strategi operasional tidak hanya menghasilkan manfaat ekonomi, tetapi juga meningkatkan kinerja lingkungan dan sosial, sehingga menjadi fondasi penting dalam mewujudkan industri daur ulang plastik yang berkelanjutan.

3. Penerapan Manufaktur Hijau pada Industri Daur Ulang Plastik

Penerapan manufaktur hijau (*green manufacturing*) pada industri daur ulang plastik berfokus pada peningkatan efisiensi penggunaan material dan energi sepanjang proses produksi [22]. Perusahaan berupaya mengoptimalkan pemanfaatan bahan baku hasil daur ulang, mengurangi kehilangan material selama proses produksi, serta menggunakan peralatan dengan konsumsi energi yang lebih rendah [23], [24]. Efisiensi sumber daya merupakan salah satu indikator utama keberhasilan implementasi manufaktur hijau dalam mendukung ekonomi sirkular dan meningkatkan daya saing industri [4].

Selain efisiensi material dan energi, manufaktur hijau juga menekankan upaya pengurangan limbah dan emisi melalui penerapan proses produksi yang lebih bersih (*clean production*) [1], [25]. Dalam industri daur ulang plastik, strategi tersebut diwujudkan melalui optimalisasi proses *mechanical recycling* dan *chemical recycling*, penggunaan kembali limbah proses (*reuse*), pengendalian emisi gas rumah kaca, serta pengurangan penggunaan bahan kimia berbahaya. Penerapan teknologi produksi yang lebih bersih mampu meningkatkan kualitas produk daur ulang sekaligus menurunkan emisi karbon dan volume limbah yang dihasilkan. Dengan demikian, perusahaan dapat mencapai efisiensi operasional sekaligus memenuhi tuntutan regulasi lingkungan yang semakin ketat.

Tabel 3. Penerapan Manufaktur Hijau pada Industri Daur Ulang Plastik

Aspek Penerapan	Implementasi pada Industri	Dampak terhadap Keunggulan Operasional
Efisiensi material	Optimalisasi penggunaan bahan baku daur ulang	Menurunkan biaya produksi dan meningkatkan produktivitas
Efisiensi energi	Mesin hemat energi, energi terbarukan, pemantauan konsumsi energi	Mengurangi konsumsi energi dan biaya operasional
Pengurangan limbah dan emisi	<i>Mechanical recycling</i> , <i>chemical recycling</i> , <i>clean production</i> , pengendalian emisi	Mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan efisiensi proses
Inovasi teknologi	AI, IoT, otomatisasi, sensor cerdas, analitik data	Meningkatkan kualitas produk dan efisiensi operasional
Keberlanjutan operasional	Integrasi LCA, ESG, dan kepatuhan regulasi	Memperkuat daya saing dan keberlanjutan perusahaan

Sumber: Diadaptasi dari [1], [4], [23], [25]

Perkembangan inovasi teknologi turut mempercepat implementasi manufaktur hijau pada industri daur ulang plastik. Teknologi seperti *Artificial Intelligence* (AI), *Internet of Things* (IoT), otomatisasi proses, sensor cerdas, serta sistem analitik berbasis data memungkinkan pemantauan proses produksi secara lebih akurat dan efisien. Inovasi tersebut membantu meningkatkan produktivitas, mengurangi *downtime*, mengoptimalkan penggunaan sumber daya, serta memperbaiki kualitas produk secara berkelanjutan [26]. Integrasi teknologi digital dengan praktik manufaktur hijau merupakan salah satu strategi utama dalam menciptakan keunggulan operasional yang berkelanjutan dan meningkatkan daya saing industri daur ulang plastik.

4. Tantangan dalam Penerapan Manufaktur Hijau

Implementasi manufaktur hijau pada industri daur ulang plastik masih menghadapi berbagai tantangan teknologi. Meskipun inovasi seperti *Artificial Intelligence* (AI), *Internet of Things* (IoT), otomatisasi, dan *smart manufacturing* mampu meningkatkan efisiensi produksi, adopsinya masih terbatas karena tingginya biaya investasi, keterbatasan infrastruktur digital, serta rendahnya kapasitas teknologi pada sebagian besar industri, khususnya usaha kecil dan menengah [27]. Selain itu, teknologi *mechanical recycling* dan *chemical recycling* masih menghadapi kendala dalam menghasilkan material daur ulang berkualitas tinggi akibat kontaminasi limbah plastik dan kompleksitas proses pemilahan [28], [29]. Modernisasi teknologi merupakan faktor penting dalam meningkatkan kualitas produk daur ulang, tetapi memerlukan investasi dan pengembangan kapasitas yang berkelanjutan [30], [31].

Selain tantangan teknologi, aspek ekonomi juga menjadi hambatan utama dalam penerapan manufaktur hijau [32]. Perusahaan harus menanggung biaya investasi yang tinggi untuk pengadaan mesin hemat energi, sistem pengendalian emisi, serta teknologi produksi yang lebih ramah lingkungan [33]. Di sisi lain, fluktuasi harga plastik daur ulang, persaingan dengan plastik berbahan baku primer yang relatif lebih murah, dan belum berkembangnya pasar produk ramah lingkungan menyebabkan tingkat pengembalian investasi menjadi kurang menarik [34]. Insentif ekonomi dan dukungan pembiayaan menjadi faktor penting dalam mempercepat transformasi industri menuju manufaktur hijau yang berkelanjutan [4].

Tabel 4. Tantangan dalam Penerapan Manufaktur Hijau pada Industri Daur Ulang Plastik

Aspek Tantangan	Permasalahan Utama	Dampak terhadap Implementasi
Teknologi	Keterbatasan AI, IoT, otomatisasi, kualitas mechanical dan chemical recycling, investasi teknologi tinggi	Menurunkan efisiensi proses dan kualitas produk daur ulang
Ekonomi	Investasi awal tinggi, biaya operasional besar, harga plastik daur ulang tidak stabil	Mengurangi daya saing dan minat investasi
Regulasi	Implementasi kebijakan lingkungan belum optimal, insentif terbatas, koordinasi antarlembaga lemah	Memperlambat adopsi manufaktur hijau
Organisasi	Kompetensi SDM terbatas, budaya keberlanjutan belum kuat, resistensi terhadap perubahan	Implementasi sistem belum berjalan secara optimal
Kolaborasi	Sinergi pemerintah, industri, akademisi, dan masyarakat belum efektif	Menghambat percepatan transformasi menuju industri hijau

Sumber: Diadaptasi dari [4], [27], [28], [32]

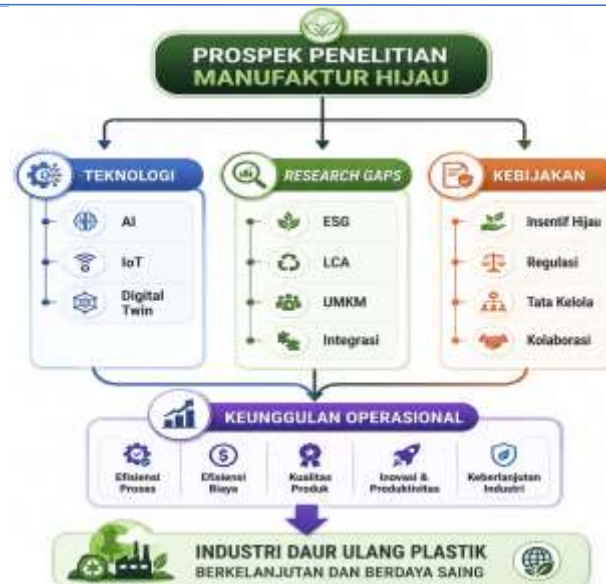
Tantangan lainnya berkaitan dengan regulasi dan organisasi, terutama belum optimalnya implementasi kebijakan lingkungan, koordinasi antarinstansi, serta kesiapan organisasi dalam menerapkan budaya keberlanjutan. Banyak perusahaan masih memandang manufaktur hijau sebagai kewajiban regulatif, bukan sebagai strategi peningkatan daya saing jangka panjang. Selain itu, keterbatasan kompetensi sumber daya manusia, kurangnya pelatihan, serta lemahnya kolaborasi antara pemerintah, industri, akademisi, dan masyarakat turut menghambat implementasi manufaktur hijau secara menyeluruh. Keberhasilan manufaktur hijau memerlukan sinergi kebijakan, inovasi teknologi, tata kelola organisasi, serta partisipasi seluruh pemangku kepentingan untuk menciptakan sistem industri yang lebih efisien dan berkelanjutan.

5. Prospek Penelitian

Perkembangan manufaktur hijau (green manufacturing) menunjukkan tren yang semakin kuat seiring dengan meningkatnya perhatian terhadap ekonomi sirkular, digitalisasi industri, dan target pembangunan berkelanjutan [35]. Penelitian terkini tidak lagi hanya berfokus pada efisiensi energi dan pengurangan limbah, tetapi juga mengintegrasikan teknologi *Artificial Intelligence* (AI), *Internet of Things* (IoT), *digital twin*, *blockchain*, serta *Life Cycle*. Selain itu, konsep Industri 4.0 dan Industry 5.0 mulai dikombinasikan dengan prinsip manufaktur hijau guna menciptakan sistem produksi yang lebih adaptif, rendah karbon, dan berkelanjutan. Integrasi teknologi digital menjadi arah utama pengembangan manufaktur hijau dalam industri daur ulang plastik [36].

Sebagian besar penelitian masih berfokus pada aspek teknis atau lingkungan secara terpisah, sedangkan kajian yang mengintegrasikan dimensi teknologi, ekonomi, sosial, tata kelola organisasi, dan kebijakan publik masih relatif terbatas [37], [38]. Selain itu, penelitian mengenai implementasi manufaktur hijau pada industri daur ulang plastik di negara berkembang, khususnya pada usaha kecil dan menengah (UMKM), masih belum banyak dilakukan [39], [40]. Pengembangan indikator keunggulan operasional, pengukuran kinerja berbasis *Environmental, Social, and Governance* (ESG), serta evaluasi manfaat ekonomi jangka panjang juga masih menjadi ruang penelitian yang terbuka [41], [42]. Perlunya pendekatan multidisiplin dalam mengembangkan model manufaktur hijau yang sesuai dengan karakteristik industri di negara berkembang [4].

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian selanjutnya diarahkan pada pengembangan model manufaktur hijau yang mengintegrasikan inovasi teknologi, kebijakan pemerintah, strategi manajemen operasi, dan kolaborasi multipemangku kepentingan. Penelitian empiris mengenai pengaruh AI, IoT, otomatisasi, energi terbarukan, serta indikator keberlanjutan terhadap keunggulan operasional industri daur ulang plastik juga perlu diperluas. Selain itu, evaluasi efektivitas kebijakan insentif hijau, implementasi ESG, dan pendekatan ekonomi sirkular di berbagai konteks industri memberikan kontribusi yang lebih komprehensif bagi pengembangan teori maupun praktik manufaktur hijau. Dengan demikian, penelitian mendatang diharapkan mampu menghasilkan strategi implementasi yang lebih efektif dalam mendukung transformasi industri menuju sistem produksi yang berkelanjutan dan berdaya saing.



Gambar 1. Arah Pengembangan Penelitian Manufaktur Hijau pada Industri Daur Ulang Plastik
Sumber: [4], [36], [41], [42]

6. Kesimpulan

Kajian naratif ini menunjukkan bahwa manufaktur hijau (green manufacturing) merupakan salah satu pendekatan strategis yang mampu meningkatkan keunggulan operasional sekaligus mendukung terciptanya industri daur ulang plastik yang lebih berkelanjutan. Konsep manufaktur hijau mengintegrasikan efisiensi penggunaan material dan energi, pengurangan limbah dan emisi, penerapan teknologi ramah lingkungan, serta kepatuhan terhadap prinsip ekonomi sirkular dalam seluruh proses produksi. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa penerapan manufaktur hijau tidak hanya mampu meningkatkan efisiensi operasional, kualitas produk, dan produktivitas perusahaan, tetapi juga memperkuat daya saing industri melalui pengurangan biaya produksi, optimalisasi penggunaan sumber daya, serta peningkatan kinerja lingkungan. Dengan demikian, manufaktur hijau menjadi salah satu pilar penting dalam transformasi industri menuju sistem produksi yang lebih efisien, rendah karbon, dan berorientasi pada keberlanjutan.

Berdasarkan hasil kajian, prospek penelitian mengenai manufaktur hijau masih terbuka luas, terutama pada integrasi teknologi Artificial Intelligence (AI), Internet of Things (IoT), digital twin, Life Cycle Assessment (LCA), dan indikator Environmental, Social, and Governance (ESG) dalam meningkatkan keunggulan operasional industri daur ulang plastik. Penelitian mendatang juga perlu mengembangkan model implementasi manufaktur hijau yang lebih komprehensif dengan mempertimbangkan aspek teknologi, ekonomi, kebijakan, organisasi, dan karakteristik industri di negara berkembang, khususnya pada usaha mikro, kecil, dan menengah (UMKM). Dengan demikian, kajian ini memberikan kontribusi konseptual sebagai sintesis literatur mengenai hubungan antara manufaktur hijau dan keunggulan operasional, sekaligus menjadi referensi bagi akademisi, pelaku industri, dan pembuat kebijakan dalam merancang strategi transformasi menuju industri daur ulang plastik yang lebih berdaya saing, inovatif, dan berkelanjutan.

Referensi

- [1] C. Li *et al.*, "Green production and green technology for sustainability: The mediating role of waste reduction and energy use," *Heliyon*, vol. 9, no. 12, 2023.
- [2] S. Yana, C. Rusmina, M. Maksalmina, M. Maryam, R. Nengsih, and A. Nurfiqi, "Model Rekayasa Sistem Pembiayaan Industri Alternatif dalam Mendukung Industri Pengolahan Limbah Plastik," *J. Serambi Eng.*, vol. 11, no. 1, 2026.
- [3] C. Hamdiah, M. Marlina, Z. Zainuddin, R. Rahmi, and S. Nabila, "Inovasi Teknologi Daur Ulang Plastik untuk Meningkatkan Efisiensi dan Profitabilitas Usaha Mikro," *J. Serambi Eng.*, vol. 11, no. 1, 2026.
- [4] OECD, *Improving Plastics Management: Trends, Policy Responses, and the Role of International Co-operation and Trade*, vol. 60, no. 1. 2022.
- [5] S. Yana, D. Mulyati, B. Badaruddin, and H. Halimatussakdiah, "Sistem Pengelolaan Limbah Plastik

- di Kota Lhokseumawe-Provinsi Aceh,” *J. Serambi Eng.*, vol. 4, no. 1, pp. 400–405, 2019.
- [6] S. King and K. E. S. Locock, “A circular economy framework for plastics: A semi-systematic review,” *J. Clean. Prod.*, vol. 364, p. 132503, 2022.
- [7] T. Skoczkowski, S. Bielecki, M. Wołowicz, and A. Węglarz, “Redefining energy management for carbon-neutral supply chains in energy-intensive industries: An EU perspective,” *Energies*, vol. 18, no. 15, p. 3932, 2025.
- [8] H. Yang, S. Kumara, S. T. S. Bukkapatnam, and F. Tsung, “The internet of things for smart manufacturing: A review,” *IISE Trans.*, vol. 51, no. 11, pp. 1190–1216, 2019.
- [9] X. Jiang and B. Bateer, “A systematic review of plastic recycling: technology, environmental impact and economic evaluation,” *Waste Manag. Res.*, vol. 43, no. 8, pp. 1159–1178, 2025.
- [10] M. Mahdi, J. Surya, R. Rahmi, I. Fahmi, and N. Shakira, “Integrasi Inovasi Digital dalam Manajemen Keuangan dan Rantai Pasok Industri Daur Ulang Plastik,” *J. Serambi Eng.*, vol. 10, no. 3, 2025.
- [11] M. Sharma, J. K. Shah, and S. Joshi, “Modeling enablers of supply chain decarbonisation to achieve zero carbon emissions: an environment, social and governance (ESG) perspective,” *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 31, pp. 76718–76734, 2023.
- [12] N. Zhu, K. Wang, A. Osei, and J. O. Amoah, “Strategic Pathways to Decarbonization Through ESG Innovation in High-Pollution Industries: Synergizing Digital Transformation and Sustainable Governance for Net-Zero Goals,” *Bus. Strateg. Environ.*, 2026.
- [13] M. Ikram and J. Es-sadki, “Assessing Barriers to the Adoption of Green Technologies in Developing Countries by Using an Integrated Decision-Making System,” *Sustain. Dev.*, vol. 34, no. 3, pp. 4309–4333, 2026.
- [14] C. Rusmina, Z. Zainuddin, J. Juwita, M. Marlina, and A. Jelita, “Risiko Investasi pada Inovasi Teknologi Ramah Lingkungan dalam Pengolahan Limbah Plastik,” *J. Serambi Eng.*, vol. 10, no. 2, 2025.
- [15] C.-H. Wang, “How organizational green culture influences green performance and competitive advantage: The mediating role of green innovation,” *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 30, no. 4, pp. 666–683, 2019.
- [16] N. Suchek, C. I. Fernandes, S. Kraus, M. Filser, and H. Sjögrén, “Innovation and the circular economy: A systematic literature review,” *Bus. Strateg. Environ.*, vol. 30, no. 8, pp. 3686–3702, 2021.
- [17] A. B. L. de Sousa Jabbour, C. J. C. Jabbour, C. Foropon, and M. Godinho Filho, “When titans meet—Can industry 4.0 revolutionise the environmentally-sustainable manufacturing wave? The role of critical success factors,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 132, pp. 18–25, 2018.
- [18] M. Abubakr, A. T. Abbas, I. Tomaz, M. S. Soliman, M. Luqman, and H. Hegab, “Sustainable and smart manufacturing: an integrated approach,” *Sustainability*, vol. 12, no. 6, p. 2280, 2020.
- [19] A. Sartal, R. Bellas, A. M. Mejías, and A. García-Collado, “The sustainable manufacturing concept, evolution and opportunities within Industry 4.0: A literature review,” *Adv. Mech. Eng.*, vol. 12, no. 5, p. 1687814020925232, 2020.
- [20] R. Radhiana, M. Mukhdasir, J. Surya, N. Syamsuddin, M. Maryam, and A. Syafitri, “Pengaruh Sistem Produksi Lean terhadap Pengurangan Biaya Produksi dan Peningkatan Profitabilitas di Industri Pengolahan Limbah Plastik,” *J. Serambi Eng.*, vol. 10, no. 1, 2025.
- [21] P. Glavič, “Evolution and current challenges of sustainable consumption and production,” *Sustainability*, vol. 13, no. 16, p. 9379, 2021.
- [22] J. Maldonado-Romo *et al.*, “Advancing sustainable manufacturing: a case study on plastic recycling,” *Prod. Manuf. Res.*, vol. 12, no. 1, p. 2425672, 2024.
- [23] G. Gaustad, M. Krystofik, M. Bustamante, and K. Badami, “Circular economy strategies for mitigating critical material supply issues,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 135, pp. 24–33, 2018.
- [24] S. Ikhbar, R. Yulianti, M. Maksalmina, U. Ulfia, and S. Malisi, “Strategi Inovatif dalam Mengelola Risiko Pasokan Bahan Baku Limbah Plastik,” *J. Serambi Eng.*, vol. 11, no. 1, 2026.
- [25] K. Mostaghimi and J. Behnamian, “Waste minimization towards waste management and cleaner production strategies: a literature review: K. Mostaghimi, J. Behnamian,” *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 25, no. 11, pp. 12119–12166, 2023.
- [26] R. Yulianti, R. Nengsih, and R. Alifia, “Pengaruh Inovasi Produk Terhadap Kinerja Keuangan dan Profitabilitas Industri Plastik Daur Ulang,” *J. Serambi Eng.*, vol. 10, no. 2, 2025.
- [27] L. Hughes, Y. K. Dwivedi, N. P. Rana, M. D. Williams, and V. Raghavan, “Perspectives on the future of manufacturing within the Industry 4.0 era,” *Prod. Plan. Control*, vol. 33, no. 2–3, pp. 138–

- 158, 2022.
- [28] J.-P. Lange, "Managing plastic waste— sorting, recycling, disposal, and product redesign," *ACS Sustain. Chem. Eng.*, vol. 9, no. 47, pp. 15722–15738, 2021.
- [29] S. Yana and B. Badaruddin, "Pengelolaan Limbah Plastik Sebagai Upaya Pengurangan Pencemaran Lingkungan Melalui Transformasi Yang Memiliki Nilai Tambah Ekonomi," *J. Serambi Eng.*, vol. 2, no. 4, pp. 157–164, 2017.
- [30] B. Tansel, "Increasing gaps between materials demand and materials recycling rates: A historical perspective for evolution of consumer products and waste quantities," *J. Environ. Manage.*, vol. 276, p. 111196, 2020.
- [31] M. Maksimovic, "Greening the future: Green Internet of Things (G-IoT) as a key technological enabler of sustainable development," in *Internet of things and big data analytics toward next-generation intelligence*, Springer, 2017, pp. 283–313.
- [32] K. Mathiyazhagan, S. Sengupta, and D. Mathivathanan, "Challenges for implementing green concept in sustainable manufacturing: a systematic review," *Opsearch*, vol. 56, no. 1, pp. 32–72, 2019.
- [33] Y. Yin and Y. Yang, "Sustainable transition of the global semiconductor industry: Challenges, strategies, and future directions," *Sustainability*, vol. 17, no. 7, p. 3160, 2025.
- [34] U. Ulfia, R. Rahmi, Z. Yusuf, R. Radhiana, M. Mukhdasir, and A. Humaira, "Strategi Pemilihan Bahan Baku Daur Ulang untuk Meningkatkan Profitabilitas di Industri Pengolahan Limbah Plastik," *J. Serambi Eng.*, vol. 10, no. 1, 2025.
- [35] S. Bag and J. H. C. Pretorius, "Relationships between industry 4.0, sustainable manufacturing and circular economy: proposal of a research framework," *Int. J. Organ. Anal.*, vol. 30, no. 4, pp. 864–898, 2022.
- [36] Y. Zhou, Q. Dong, H. M. Som, J. Dai, T. Ciano, and N. I. Arshad, "Sustainable environmental design using circular economy in the plastic manufacturing industry for decarbonization," *Comput. Ind. Eng.*, p. 111764, 2025.
- [37] J. Sarkis and Q. Zhu, "Environmental sustainability and production: taking the road less travelled," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 56, no. 1–2, pp. 743–759, 2018.
- [38] R. Pang and X. Zhang, "Achieving environmental sustainability in manufacture: A 28-year bibliometric cartography of green manufacturing research," *J. Clean. Prod.*, vol. 233, pp. 84–99, 2019.
- [39] P. Choudhary, N. K. Jain, and A. Panda, "Making small and medium enterprises circular economy compliant by reducing the single use plastic consumption," *J. Bus. Res.*, vol. 149, pp. 448–462, 2022.
- [40] M. Sumant and A. Negi, "Review of lean-green manufacturing practices in SMEs for sustainable framework," *Int. J. Bus. Innov. Res.*, vol. 17, no. 1, pp. 38–64, 2018.
- [41] F. Carneiro, H. Nóvoa, A. M. Carvalho, and F. Lamilla, "Optimising ESG-enhanced performance: a literature review of lean, six sigma, and other continuous improvement methodologies," *Total Qual. Manag. Bus. Excell.*, vol. 36, no. 1–2, pp. 146–178, 2025.
- [42] D. Anelli, P. Morano, F. Fariello, and E. Sabatelli, "Environmental, social and governance (ESG) assessment with a two-phase goal-programming-based optimization model: a comparative study of Envipark and Kalundborg eco-industrial parks," *Front. Built Environ.*, vol. 12, p. 1731282, 2026.