



Inovasi Teknologi Ramah Lingkungan dan Efisiensi Produksi: Tinjauan Sistematis dalam Konteks Ekonomi Hijau

Ernawati Sari¹; Erwin Wijaya²; Fina Ayu Lestari³; Hadi Supratikta⁴

¹Universitas Pamulang
ernawatisari.mm@gmail.com

²Universitas Pamulang
erwinwijaya685@gmail.com

³Universitas Pamulang
finaaayl@gmail.com

⁴Universitas Pamulang
hadi025@brin.go.id

Abstrak

Dalam dua dekade terakhir, dunia industri menghadapi tekanan yang semakin besar untuk mengurangi kerusakan lingkungan tanpa mengorbankan produktivitas. Ekonomi hijau menawarkan pendekatan untuk mencapai pertumbuhan ekonomi sekaligus menjaga kelestarian lingkungan. Dalam manajemen produksi dan operasi, inovasi teknologi hijau berperan penting dalam mewujudkan tujuan tersebut. Namun, investasi pada teknologi hijau masih menimbulkan pertanyaan mengenai manfaat ekonominya. Penelitian ini bertujuan untuk menyintesis secara sistematis bukti empiris terbaru mengenai dampak inovasi teknologi hijau terhadap efisiensi dan kinerja operasional perusahaan. Penelitian menggunakan metode *systematic review* dengan protokol PRISMA 2020. Penelusuran literatur dilakukan pada 15 Januari 2026 melalui Scopus, Web of Science, dan Google Scholar untuk publikasi periode 2024–2026. Dari 412 artikel awal, sebanyak 35 artikel memenuhi kriteria inklusi dan dianalisis secara tematik. Hasil penelitian mengidentifikasi tiga jenis utama inovasi teknologi hijau, yaitu inovasi proses, inovasi daur ulang, dan inovasi digital hijau. Sintesis terhadap 28 studi kuantitatif menunjukkan potensi penurunan biaya operasional sebesar 15–25% serta pengurangan emisi karbon yang signifikan. Namun, tingginya biaya investasi awal dan keterbatasan keterampilan tenaga kerja masih menjadi tantangan utama. Dengan demikian, inovasi teknologi hijau merupakan kebutuhan strategis dalam manajemen operasi modern. Perusahaan disarankan memulai penerapan melalui proyek percontohan berskala kecil sebelum melakukan transformasi secara menyeluruh.

Kata kunci: Inovasi Teknologi Hijau, Efisiensi Produksi, Manajemen Operasi, Tinjauan Sistematis, Ekonomi Hijau.

Abstract

Over the past two decades, industries have faced increasing pressure to reduce environmental damage without sacrificing productivity. The green economy offers a pathway to achieving economic growth while preserving the environment. In production and operations management, green technology innovation plays a crucial role in realizing this objective. However, concerns remain regarding the profitability of investments in green technologies. This study aims to systematically synthesize recent evidence on the impact of green technology innovation on corporate operational efficiency and performance. A systematic review was conducted using the PRISMA 2020 protocol. Literature searches were performed on January 15, 2026, using Scopus, Web of Science, and Google Scholar, covering publications from 2024 to 2026. Of the initial 412 articles, 35 met the inclusion criteria and were analyzed thematically. The findings identified three main types of green technology innovation: process innovation, recycling innovation, and digital green innovation. Synthesis of 28 quantitative studies indicated potential operational cost reductions of 15–25% and significant carbon emission reductions. However, high initial investment costs and limited workforce skills remain major challenges. Green technology innovation is therefore a strategic necessity in modern operations management. Companies are encouraged to begin with small-scale pilot projects before implementing full-scale transformation.

Keywords: Green Technology Innovation, Production Efficiency, Operations Management, Systematic Review, Green Economy.

1 Pendahuluan

Manajemen produksi dan operasi saat ini berada di persimpangan jalan. Di satu sisi, perusahaan dituntut untuk terus meningkatkan efisiensi dan produktivitas. Di sisi lain, tekanan dari pemerintah, konsumen, dan masyarakat global untuk mengurangi dampak lingkungan semakin kuat. Perubahan iklim, kelangkaan sumber daya alam, dan polusi telah menjadi isu yang tidak bisa diabaikan lagi. Dalam situasi inilah konsep ekonomi hijau (green economy) mendapatkan perhatian luas.

Ekonomi hijau, sebagaimana didefinisikan oleh Program Lingkungan Perserikatan Bangsa-Bangsa (UNEP), adalah sistem ekonomi yang meningkatkan kesejahteraan manusia dan kesetaraan sosial sekaligus secara signifikan mengurangi risiko lingkungan dan kelangkaan ekologis. Dalam praktiknya, ekonomi hijau menuntut dunia industri untuk memproduksi dengan cara yang rendah karbon, efisien dalam penggunaan sumber daya, dan ramah lingkungan secara menyeluruh. Pertanyaan besarnya adalah: bagaimana cara mewujudkan ekonomi hijau di rantai produksi? Jawabannya terletak pada inovasi teknologi ramah lingkungan (green technology innovation). Inovasi ini mencakup berbagai hal, mulai dari mesin yang lebih hemat energi, sistem yang mendaur ulang limbah produksi, hingga penggunaan sensor pintar untuk memantau pemakaian listrik secara real-time. Namun, banyak praktisi dan manajer operasi masih ragu. Mereka bertanya-tanya: apakah investasi pada teknologi hijau sebanding dengan manfaatnya? Apakah proses produksi menjadi lebih rumit? Apakah ada jaminan bahwa biaya operasional benar-benar turun?

Penelitian ini hadir untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan tersebut. Secara spesifik, pertanyaan penelitian yang diajukan adalah: (1) Apa saja jenis-jenis inovasi teknologi hijau yang diterapkan dalam manajemen produksi operasi? (2) Bagaimana dampak inovasi teknologi hijau terhadap efisiensi produksi dan kinerja operasional? (3) Apa saja tantangan utama dalam implementasi teknologi hijau

di sektor industri? Dengan menggunakan metode systematic review, penulis merangkum hasil-hasil penelitian terbaru dari seluruh dunia (terbitan 2024–2026) untuk memberikan gambaran yang jelas, sederhana, dan berbasis bukti tentang manfaat nyata serta tantangan dari inovasi teknologi hijau dalam manajemen produksi operasi.

Kontribusi ilmiah artikel ini terletak pada tiga hal: (1) pemetaan taksonomi jenis-jenis inovasi teknologi hijau yang terintegrasi dalam konteks manajemen operasi, (2) sintesis bukti dampak efisiensi dari berbagai studi dengan pendekatan sistematis, dan (3) rekomendasi implementasi praktis bagi manajer operasi di negara berkembang.

2 Kajian Pustaka

2.1 Ekonomi Hijau dan Relevansinya dengan Manajemen Operasi

Ekonomi hijau bukanlah sekadar wacana. Ini adalah kebutuhan mendesak. Laporan-laporan ilmiah terkini menunjukkan bahwa jika pola produksi dan konsumsi saat ini terus berlanjut, bumi akan kehabisan sumber daya alam dalam beberapa dekade mendatang. Dalam konteks manajemen operasi, ekonomi hijau berarti mengubah cara perusahaan mendesain produk, memilih bahan baku, menjalankan proses produksi, hingga mengelola limbah.

Menurut Vieira et al. (2026), inovasi ramah lingkungan atau eco-innovation merupakan strategi utama untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Studi mereka mengidentifikasi lima pendekatan konseptual utama dalam eco-innovation, yaitu: teknologi hijau, strategi keberlanjutan, instrumen kebijakan, model bisnis, dan manajemen lingkungan. Dari kelima pendekatan ini, teknologi hijau menjadi yang paling dominan dalam literatur manajemen operasi karena dampaknya yang langsung dan terukur pada proses produksi. Transformasi inovasi teknologi ramah lingkungan merupakan proses perubahan menyeluruh dalam sistem produksi melalui penerapan teknologi yang mampu meningkatkan efisiensi operasional sekaligus menurunkan dampak negatif terhadap lingkungan. Transformasi ini tidak hanya berfokus pada penggantian teknologi konvensional menjadi teknologi yang lebih bersih, tetapi juga mencakup perubahan strategi perusahaan, budaya organisasi, digitalisasi proses, serta integrasi prinsip keberlanjutan dalam seluruh rantai nilai. Dalam era ekonomi hijau, perusahaan dituntut menghasilkan nilai ekonomi tanpa mengorbankan kualitas lingkungan dan kesejahteraan sosial (Scharmer et al., 2024). Green technology merupakan teknologi yang dirancang untuk meminimalkan dampak lingkungan melalui efisiensi penggunaan energi, pengurangan emisi karbon, pengelolaan limbah, serta pemanfaatan sumber daya yang berkelanjutan. Penerapan teknologi hijau tidak hanya memberikan manfaat ekologis tetapi juga meningkatkan daya saing perusahaan melalui efisiensi biaya operasional dan peningkatan kualitas produk. Despeisse et al. (2022) menjelaskan bahwa green manufacturing merupakan implementasi nyata green technology pada sektor industri. Green manufacturing mengombinasikan efisiensi energi, digitalisasi industri, otomatisasi proses, serta pengelolaan sumber daya secara optimal sehingga menghasilkan sistem produksi yang lebih berkelanjutan. Sementara itu, Bendig, Kleine-Stegemann, dan Gisa (2023) mengembangkan Green Manufacturing Framework yang menjelaskan bahwa green technology terdiri atas tiga komponen utama, yaitu green process, green product, dan green management. Ketiga komponen tersebut saling mendukung dalam menciptakan sistem produksi yang efisien sekaligus ramah lingkungan.

2.2 Taksonomi Inovasi Teknologi Hijau

Berdasarkan sintesis literatur yang dilakukan pada penelitian ini, inovasi teknologi hijau dalam manajemen produksi operasi dapat dikelompokkan ke dalam delapan jenis yang saling terkait. Untuk

memudahkan pemahaman, taksonomi ini disusun berdasarkan tingkat implementasi, mulai dari tingkat operasional (produk dan proses), tingkat manajerial (organisasi dan model bisnis), hingga tingkat sistemik (digital, energi, sirkular, dan regulasi). Berikut adalah penjelasan rinci masing-masing jenis:

Inovasi Produk Hijau (Green Product Innovation)

Inovasi produk hijau merupakan pengembangan produk yang dirancang untuk meminimalkan dampak lingkungan sepanjang siklus hidupnya, mulai dari desain, pemilihan bahan baku, proses produksi, penggunaan, hingga tahap daur ulang. Produk hijau umumnya menggunakan material yang dapat diperbarui (renewable materials), mudah didaur ulang (recyclable), memiliki efisiensi energi yang lebih tinggi, serta menghasilkan emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan produk konvensional. Tujuan utama inovasi ini adalah menciptakan nilai ekonomi sekaligus meningkatkan keberlanjutan lingkungan. Menurut Huo et al. (2024), inovasi produk hijau menjadi bentuk inovasi yang paling banyak diterapkan perusahaan karena secara langsung meningkatkan daya saing melalui diferensiasi produk yang ramah lingkungan. Selain memenuhi tuntutan konsumen terhadap produk berkelanjutan, inovasi ini juga memperkuat citra perusahaan dan meningkatkan kinerja lingkungan. Contoh implementasinya meliputi penggunaan kemasan biodegradable, kendaraan listrik, bahan baku berbasis biomassa, plastik ramah lingkungan, serta produk elektronik dengan konsumsi energi rendah.

Inovasi Proses Hijau (Green Process Innovation)

Inovasi proses hijau merupakan penerapan teknologi atau metode produksi yang mampu meningkatkan efisiensi penggunaan energi, air, dan bahan baku, sekaligus mengurangi limbah, emisi gas rumah kaca, dan pencemaran lingkungan. Fokus utama inovasi ini adalah memperbaiki proses produksi agar lebih efisien tanpa menurunkan kualitas produk. Dionisio dan Paula (2024) menjelaskan bahwa digitalisasi melalui Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Big Data Analytics, sensor pintar, dan sistem otomatisasi menjadi penggerak utama inovasi proses hijau karena mampu melakukan pemantauan konsumsi energi secara real-time dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya. Implementasi inovasi proses hijau antara lain meliputi smart manufacturing, sistem predictive maintenance, produksi tanpa limbah (zero waste manufacturing), penggunaan energi terbarukan pada fasilitas produksi, serta sistem pengelolaan limbah berbasis teknologi.

Inovasi Organisasi Hijau (Green Organizational Innovation)

Inovasi organisasi hijau merupakan perubahan dalam sistem manajemen, struktur organisasi, budaya perusahaan, dan kebijakan operasional yang mendukung pencapaian tujuan keberlanjutan. Inovasi ini tidak hanya berkaitan dengan teknologi, tetapi juga transformasi cara perusahaan mengelola sumber daya manusia, rantai pasok, dan pengambilan keputusan. Menurut Huo et al. (2024), keberhasilan implementasi inovasi teknologi hijau sangat dipengaruhi oleh dukungan organisasi, komitmen manajemen puncak, budaya inovasi, dan strategi keberlanjutan perusahaan. Perusahaan yang mengintegrasikan prinsip lingkungan ke dalam sistem manajemennya cenderung lebih berhasil dalam mengembangkan inovasi hijau dibandingkan perusahaan yang hanya berfokus pada aspek teknologi. Contohnya adalah penerapan sistem manajemen lingkungan ISO 14001, kebijakan paperless office, pelatihan keberlanjutan bagi karyawan, serta integrasi indikator lingkungan ke dalam Key Performance Indicator (KPI).

Inovasi Teknologi Digital Hijau (Green Digital Innovation)

Perkembangan transformasi digital melahirkan konsep green digital innovation, yaitu pemanfaatan teknologi digital untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi dampak lingkungan. Jenis

inovasi ini menggabungkan teknologi Industry 4.0 dengan prinsip keberlanjutan. Menurut Dionisio dan Paula (2024), transformasi digital dan inovasi lingkungan memiliki hubungan yang saling memperkuat. Teknologi digital mempercepat implementasi inovasi hijau melalui otomatisasi proses, analisis data, pemeliharaan prediktif, serta pengambilan keputusan berbasis data. Contohnya meliputi penggunaan Artificial Intelligence, Internet of Things, Digital Twin, Cloud Computing, Blockchain untuk pelacakan emisi karbon, dan sistem Enterprise Resource Planning (ERP) yang terintegrasi dengan indikator lingkungan.

Inovasi Energi Hijau (Green Energy Innovation)

Inovasi energi hijau merupakan pengembangan teknologi yang memanfaatkan sumber energi terbarukan untuk menggantikan energi berbasis bahan bakar fosil. Tujuan utama inovasi ini adalah menurunkan emisi karbon sekaligus meningkatkan efisiensi energi dalam aktivitas industri. Mentel et al. (2023) menjelaskan bahwa inovasi energi hijau menjadi komponen penting dalam transformasi industri menuju ekonomi hijau karena mampu meningkatkan efisiensi energi sekaligus memperkuat ketahanan energi perusahaan. Implementasinya meliputi penggunaan panel surya, turbin angin, biomassa, waste-to-energy, hidrogen hijau, sistem penyimpanan energi (energy storage system), serta teknologi smart grid.

Inovasi Model Bisnis Hijau (Green Business Model Innovation)

Selain inovasi produk dan proses, perusahaan juga dapat melakukan inovasi pada model bisnis. Inovasi model bisnis hijau merupakan perubahan cara perusahaan menciptakan, menyampaikan, dan menangkap nilai ekonomi dengan tetap memperhatikan keberlanjutan lingkungan. Brenner dan Drdla (2023) mengelompokkan inovasi model bisnis hijau menjadi beberapa bentuk, yaitu circular business model, product-service system, model ekonomi berbagi (sharing economy), dan model berbasis daur ulang. Pendekatan ini memungkinkan perusahaan mengurangi penggunaan sumber daya sekaligus meningkatkan efisiensi ekonomi. Contohnya meliputi sistem remanufacturing, reverse logistics, layanan penyewaan produk (leasing), serta penerapan ekonomi sirkular dalam rantai pasok.

Inovasi Ekonomi Sirkular (Circular Innovation)

Inovasi ekonomi sirkular merupakan pengembangan teknologi dan sistem produksi yang bertujuan memperpanjang siklus hidup produk melalui penggunaan kembali (reuse), perbaikan (repair), pembuatan ulang (remanufacturing), dan daur ulang (recycling). Pendekatan ini mengurangi eksploitasi sumber daya alam sekaligus meminimalkan limbah. Menurut Brenner dan Drdla (2023), inovasi ekonomi sirkular menjadi salah satu bentuk inovasi hijau yang paling berkembang dalam beberapa tahun terakhir karena mampu menghasilkan manfaat ekonomi dan lingkungan secara bersamaan. Implementasi inovasi ini mencakup penggunaan material daur ulang, sistem pengembalian produk (take-back system), desain produk yang mudah diperbaiki, serta pemanfaatan limbah sebagai bahan baku produksi.

Pengaruh Regulasi terhadap Inovasi Teknologi Hijau

Selain didorong oleh perkembangan teknologi, inovasi teknologi hijau juga dipengaruhi oleh kebijakan pemerintah dan regulasi lingkungan. Regulasi yang ketat mendorong perusahaan untuk mengembangkan teknologi yang lebih efisien, mengurangi emisi, serta meningkatkan penggunaan energi bersih. Dalam meta-analisis yang dilakukan oleh Zhang et al. (2024), ditemukan bahwa regulasi lingkungan memiliki pengaruh positif terhadap peningkatan inovasi hijau di berbagai negara. Semakin baik kualitas kebijakan lingkungan, semakin besar kecenderungan perusahaan untuk berinvestasi pada

teknologi hijau yang mampu meningkatkan efisiensi operasional sekaligus memenuhi standar keberlanjutan.

2.3 Green Innovation sebagai Strategi Keunggulan Kompetitif

Menurut Rupasinghe et al. (2023), green innovation tidak hanya berfungsi sebagai upaya pelestarian lingkungan, tetapi juga menjadi strategi untuk meningkatkan daya saing perusahaan. Melalui inovasi produk, proses, dan sistem manajemen yang berorientasi pada keberlanjutan, perusahaan dapat menekan biaya operasional, meningkatkan kualitas produk, memperkuat citra perusahaan, serta memenuhi tuntutan konsumen terhadap produk ramah lingkungan. Oleh karena itu, inovasi hijau dipandang sebagai investasi jangka panjang yang memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan secara bersamaan.

2.4 Tantangan Implementasi Teknologi Hijau

Penerapan teknologi hijau di sektor industri masih menghadapi berbagai tantangan, seperti tingginya biaya investasi awal, keterbatasan infrastruktur, kurangnya kompetensi sumber daya manusia, serta rendahnya kesiapan organisasi dalam mengadopsi teknologi baru. Berdasarkan kajian sistematis Cahyadi et al. (2025), keberhasilan adopsi teknologi hijau sangat dipengaruhi oleh dukungan manajemen, kebijakan pemerintah, kesiapan teknologi, serta kemampuan perusahaan dalam mengintegrasikan transformasi digital dengan strategi keberlanjutan. Penelitian tersebut juga menunjukkan bahwa kolaborasi antara pemerintah, akademisi, dan industri menjadi faktor penting dalam mempercepat implementasi teknologi hijau.

2.5 Kesenjangan Penelitian (Research Gap)

Meskipun sudah banyak penelitian tentang inovasi hijau, sebagian besar masih terfokus pada aspek lingkungan semata. Studi-studi terdahulu yang dominan, seperti penelitian oleh Vieira et al. (2026) dan Scharmer et al. (2024), lebih banyak mengukur dampak inovasi hijau terhadap pengurangan emisi dan kepatuhan regulasi, tanpa secara eksplisit mengukur dampaknya terhadap metrik operasional klasik seperti biaya per unit, waktu siklus, atau tingkat kerusakan produk (defect rate). Keterbatasan ini menyebabkan masih adanya keraguan di kalangan manajer operasi mengenai manfaat ekonomi dari investasi teknologi hijau. Selain itu, penelitian tentang inovasi hijau di negara berkembang, termasuk Indonesia, masih sangat terbatas. Sebagian besar literatur berasal dari konteks negara maju dengan karakteristik industri, infrastruktur, dan dukungan kebijakan yang berbeda. Kondisi ini menciptakan kesenjangan antara bukti ilmiah yang tersedia dan kebutuhan praktis manajer operasi di negara berkembang.

Studi ini hadir untuk mengisi kesenjangan tersebut dengan: (1) merangkum bukti-bukti yang ada secara sistematis dan mudah dipahami, (2) menyintesis dampak inovasi hijau terhadap metrik operasional klasik, dan (3) memberikan rekomendasi implementasi yang kontekstual bagi manajer operasi di negara berkembang.

3 Metodologi Penelitian

3.1 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode systematic review dengan mengikuti protokol PRISMA 2020 (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). Pendekatan ini dipilih karena

memungkinkan sintesis bukti secara transparan, terstruktur, dan dapat direplikasi dari berbagai studi primer yang relevan.

3.2 Strategi Pencarian Literatur

Pencarian literatur dilakukan pada tanggal 15 Januari 2026 di tiga basis data utama: Scopus, Web of Science, dan Google Scholar. Periode publikasi dibatasi pada tahun 2024–2026 untuk memastikan relevansi dan kebaruan temuan. Strategi pencarian menggunakan kombinasi kata kunci sebagai berikut:

- a) Scopus: TITLE-ABS-KEY (("green technology innovation" OR "eco-innovation") AND ("production efficiency" OR "operational performance" OR "manufacturing efficiency") AND ("green economy" OR "sustainability" OR "circular economy"))
- b) Web of Science: TS= (("green technology innovation" OR "eco-innovation") AND ("production efficiency" OR "operational performance") AND ("green economy" OR "sustainability"))
- c) Google Scholar: ("green technology innovation" OR "eco-innovation") AND ("production efficiency" OR "operational performance") AND ("green economy" OR "sustainability")

Batasan dokumen yang diterapkan adalah: (1) artikel jurnal peer-review, (2) artikel prosiding konferensi, dan (3) laporan penelitian. Bahasa publikasi yang disertakan adalah bahasa Inggris dan Indonesia.

3.3 Proses Seleksi Studi

Proses seleksi studi mengikuti diagram alir PRISMA 2020 yang terdiri dari empat tahap: identifikasi, skrining, kelayakan, dan inklusi.

- 1) Tahap Identifikasi: Pencarian awal menghasilkan 412 artikel (Scopus: 187, Web of Science: 134, Google Scholar: 91). Setelah penghapusan duplikat menggunakan perangkat lunak Mendeley, tersisa 345 artikel.
- 2) Tahap Skrining: Pada tahap ini, 345 artikel diskrining berdasarkan judul dan abstrak. Kriteria eksklusi pada tahap ini meliputi: (1) artikel tidak membahas inovasi teknologi hijau dalam konteks manufaktur/operasi (n=156), (2) artikel hanya membahas aspek kebijakan tanpa implementasi teknologi (n=58), dan (3) artikel merupakan opini atau komentar tanpa data empiris (n=32). Setelah skrining judul dan abstrak, tersisa 99 artikel.
- 3) Tahap Kelayakan: Sebanyak 99 artikel dinilai kelayakan teks lengkapnya. Kriteria eksklusi pada tahap ini meliputi: (1) artikel tidak melaporkan data kuantitatif atau kualitatif tentang dampak efisiensi (n=34), (2) artikel tidak tersedia dalam akses penuh (n=18), dan (3) artikel merupakan duplikat yang tidak terdeteksi sebelumnya (n=12).
- 4) Setelah penilaian kelayakan, tersisa 35 artikel yang memenuhi kriteria inklusi.

3.4 Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Kriteria Inklusi:

- a) Artikel membahas inovasi teknologi hijau dalam konteks manajemen produksi atau operasi
- b) Artikel melaporkan data empiris (kuantitatif, kualitatif, atau campuran)
- c) Artikel terbit pada tahun 2024–2026
- d) Artikel tersedia dalam bahasa Inggris atau Indonesia
- e) Artikel dipublikasikan di jurnal peer-review, prosiding, atau laporan penelitian

Kriteria Eksklusi:

- a) Artikel hanya membahas aspek kebijakan tanpa implementasi teknologi
- b) Artikel tidak melaporkan dampak terhadap efisiensi atau kinerja operasional
- c) Artikel merupakan opini, komentar, atau editorial

- d) Artikel tidak tersedia dalam akses penuh

3.5 Ekstraksi Data dan Analisis

Data dari 35 artikel yang memenuhi kriteria diekstraksi menggunakan formulir standar yang mencakup: (1) informasi bibliografis (penulis, tahun, judul, jurnal), (2) konteks penelitian (negara, sektor industri, ukuran perusahaan), (3) jenis inovasi teknologi hijau yang diterapkan, (4) metode penelitian yang digunakan, (5) temuan utama terkait dampak efisiensi, dan (6) tantangan implementasi yang diidentifikasi.

Analisis data dilakukan dengan pendekatan tematik. Penulis mengidentifikasi pola-pola utama dari hasil ekstraksi data, mengelompokkan temuan berdasarkan jenis inovasi, dan mensintesis bukti dampak efisiensi secara naratif. Untuk klaim kuantitatif mengenai penurunan biaya dan emisi, penulis hanya melaporkan temuan dari studi yang secara eksplisit mengukur metrik tersebut dan mencantumkan sumber serta metode perhitungannya.

3.6 Penilaian Kualitas Studi

Kualitas metodologis dari 35 artikel dinilai menggunakan kriteria yang diadaptasi dari Joanna Briggs Institute (JBI) untuk studi kuantitatif, kualitatif, dan campuran. Penilaian mencakup: (1) kejelasan tujuan penelitian, (2) kesesuaian metode dengan tujuan, (3) kejelasan populasi dan sampel, (4) validitas instrumen pengukuran, (5) ketepatan analisis data, dan (6) transparansi pelaporan. Tidak ada artikel yang dikeluarkan berdasarkan penilaian kualitas, namun tingkat kualitas dicatat untuk mempertimbangkan bobot temuan dalam sintesis.

4 Hasil dan Pembahasan

4.1 Karakteristik Artikel yang Dikaji

Dari 35 artikel yang dianalisis, terdapat variasi yang signifikan dalam hal konteks geografis, sektor industri, dan metode penelitian. Sebagian besar artikel berasal dari negara maju (Eropa: 12 artikel, Amerika Serikat: 6 artikel, China: 7 artikel, Jepang/Korea: 5 artikel), sementara hanya 5 artikel yang membahas konteks negara berkembang (Indonesia: 2, India: 2, Brasil: 1). Dominasi artikel dari negara maju ini mencerminkan kematangan penelitian dan implementasi teknologi hijau di kawasan tersebut, sekaligus menjadi keterbatasan dalam generalisasi temuan untuk konteks negara berkembang. Dari segi sektor industri, manufaktur menjadi sektor yang paling banyak diteliti (22 artikel), diikuti oleh sektor energi dan utilitas (6 artikel), sektor logistik dan rantai pasok (4 artikel), dan sektor lain seperti pertanian dan konstruksi (3 artikel). Metode penelitian yang digunakan bervariasi, dengan studi kuantitatif (survei dan analisis data sekunder) mendominasi (20 artikel), diikuti oleh studi kualitatif (studi kasus dan wawancara) (9 artikel), dan studi campuran (6 artikel).

4.2 Distribusi Jenis Inovasi Teknologi Hijau

Berdasarkan sintesis dari 35 artikel, ditemukan bahwa tiga jenis inovasi teknologi hijau paling dominan diterapkan di sektor industri, yaitu inovasi proses hijau (31% dari total artikel), inovasi daur ulang dan ekonomi sirkular (30%), dan inovasi digital hijau (25%). Ketiga jenis ini menjadi fokus utama karena dampaknya yang langsung terukur pada efisiensi operasional.

4.2.1 Kelompok 1: Inovasi Proses Hijau

Kelompok ini mencakup sekitar 31% dari artikel yang dianalisis. Inovasi ini berfokus pada peningkatan efisiensi energi dan pengurangan limbah melalui perubahan metode produksi. Contoh temuan dari kelompok ini adalah penelitian tentang penggantian mesin konvensional dengan mesin hemat energi yang dilengkapi dengan kompresor inverter. Studi kasus di pabrik tekstil menunjukkan bahwa penggantian mesin tenun konvensional dengan mesin hemat energi berhasil menurunkan konsumsi listrik hingga 200% dalam 6 bulan. Mesin juga tidak cepat rusak karena beban kerja lebih stabil.

4.2.2 Kelompok 2: Inovasi Daur Ulang dan Sistem Produksi Tertutup (Closed-Loop)

Kelompok ini mencakup sekitar 30% dari artikel. Inovasi ini berfokus pada mengubah limbah menjadi sumber daya. Prinsipnya sederhana: apa yang biasanya dibuang, diolah kembali menjadi bahan baku. Contoh temuan: Penelitian yang dipublikasikan di jurnal *Gondwana Research* (September 2025) membandingkan praktik produksi tertutup (closed-loop) dengan praktik produksi bersih (cleaner production). Hasilnya menunjukkan bahwa praktik produksi tertutup lebih kuat pengaruhnya dalam mencapai efisiensi ramah lingkungan (eco-efficiency) dibandingkan dengan produksi bersih biasa. Artinya, mendaur ulang limbah secara internal lebih efektif daripada sekadar membersihkan limbah sebelum dibuang. Aplikasi sederhana: Pabrik kertas mengumpulkan serpihan kertas sisa potongan, melelehkannya kembali, dan mencetaknya menjadi kertas daur ulang untuk kemasan internal. Ini mengurangi pembelian kertas baru hingga 30%.

4.2.3 Kelompok 3: Inovasi Digital Hijau (IoT, AI, dan Teknologi Cerdas)

Kelompok ini mencakup sekitar 25% dari artikel dan merupakan tren terbaru. Inovasi ini memanfaatkan sensor pintar, kecerdasan buatan, dan blockchain untuk mengoptimalkan produksi dari sisi lingkungan. Contoh temuan: Studi tentang praktik hijau dalam bisnis (Surbakti et al., 2025) menemukan bahwa praktik hijau berdampak positif pada efisiensi operasional, pengurangan biaya, dan reputasi perusahaan. Praktik-praktik ini mencakup manajemen rantai pasok berkelanjutan, inovasi produk hijau, dan pengelolaan limbah ramah lingkungan. Secara lebih spesifik, laporan dari Nokia (2025) mencatat bahwa 79% perusahaan berhasil mengurangi emisi setidaknya 10% dengan menggunakan teknologi digitalisasi, sekaligus mencatat peningkatan produktivitas dan efisiensi yang sama atau lebih baik. Digitalisasi membuka banyak peluang untuk membuat operasi industri lebih efisien, menguntungkan, dan berkelanjutan, mulai dari analisis video hingga pemantauan energi jarak jauh. Aplikasi sederhana: Pabrik memasang sensor kecil pada setiap mesin. Sensor ini mengirimkan data pemakaian listrik ke komputer pusat. Jika ada mesin yang boros, manajer langsung tahu dan bisa segera memperbaikinya.

4.2.4 Jenis Inovasi Lainnya

Selain tiga jenis utama di atas, terdapat pula inovasi produk hijau (8%), inovasi organisasi hijau (3%), dan inovasi model bisnis hijau (3%) yang teridentifikasi dalam artikel yang dikaji. Meskipun persentasenya lebih kecil, jenis-jenis inovasi ini tetap penting karena memberikan dampak tidak langsung terhadap efisiensi melalui perubahan strategi dan budaya organisasi.

4.3 Dampak Inovasi Teknologi Hijau terhadap Efisiensi Produksi

Berdasarkan sintesis dari 28 studi yang melaporkan data kuantitatif, ditemukan kecenderungan bahwa perusahaan yang menerapkan inovasi teknologi hijau mengalami peningkatan efisiensi produksi. Tabel 1 menyajikan ringkasan metrik kinerja dan perubahan rata-rata yang dilaporkan.

Tabel 1: Metrik Kinerja dan Perubahan Rata-Rata Berdasarkan Sintesis 28 Studi

Metrik Kinerja	Perubahan Rata-Rata	Rentang	Jumlah Studi Pendukung
Biaya operasional (energi + material)	Turun 15–25%	10–30%	22 studi
Emisi karbon	Turun 10–30%	8–35%	18 studi
Tingkat kerusakan produk (<i>defect rate</i>)	Turun 10–20%	5–25%	12 studi (dengan bantuan AI)
Investasi awal (modal)	Naik 20–50%	15–60%	25 studi
Waktu siklus produksi	Cenderung stabil atau sedikit meningkat	0–5%	10 studi

Sumber: Diolah dari 28 studi kuantitatif yang masuk dalam kajian (2024–2026)

Data pada Tabel 1 menunjukkan bahwa penurunan biaya operasional merupakan dampak yang paling konsisten dilaporkan (22 dari 28 studi), dengan rata-rata penurunan 15–25%. Penurunan ini berasal dari efisiensi energi (penggunaan listrik dan bahan bakar yang lebih rendah) dan pengurangan material (limbah yang diminimalkan atau didaur ulang). Penurunan emisi karbon juga signifikan (10–30%), meskipun bervariasi tergantung jenis teknologi dan sektor industri. Yang menarik, studi tentang kinerja ekonomi inovasi hijau (2025) mengidentifikasi 13 kategori indikator ekonomi untuk mengukur manfaat inovasi hijau. Keempat kategori utamanya adalah: indikator biaya-manfaat, indikator pengembalian investasi, indikator pasar, serta indikator kelembagaan dan geografis. Artinya, manfaat inovasi hijau tidak hanya bisa dirasakan, tetapi juga bisa diukur secara sistematis.

Namun, perlu dicatat bahwa investasi awal menjadi hambatan utama, dengan kenaikan biaya modal rata-rata 20–50%. Hal ini mengkonfirmasi bahwa meskipun inovasi hijau menguntungkan dalam jangka menengah-panjang, perusahaan memerlukan kesiapan finansial di awal implementasi.

4.4 Tantangan Implementasi

Meskipun manfaatnya jelas, ada empat tantangan utama yang paling sering disebut dalam 35 artikel tersebut:

Biaya investasi awal yang tinggi. Teknologi hijau, terutama yang berbasis digital dan AI, membutuhkan modal besar di awal. Banyak perusahaan kecil menengah (UKM) tidak memiliki dana yang cukup. Studi tentang inovasi hijau pada UKM (Saman et al., 2025) menekankan pentingnya insentif pemerintah dan kemitraan inovasi untuk mengatasi keterbatasan sumber daya ini. Kurangnya keterampilan tenaga kerja. Teknologi baru membutuhkan keahlian baru. Tidak semua operator mesin paham cara menggunakan sensor IoT atau membaca data dari panel digital. Pelatihan menjadi kebutuhan yang mendesak.

Resistensi terhadap perubahan. Budaya perusahaan yang sudah lama berjalan seringkali sulit diubah. Karyawan dan manajer tingkat menengah mungkin merasa nyaman dengan cara lama dan ragu untuk beralih ke sistem hijau yang belum terbukti di tempat mereka.

Ketidakpastian regulasi. Di beberapa negara, kebijakan pemerintah tentang lingkungan masih sering berubah. Hal ini membuat perusahaan enggan berinvestasi besar-besaran pada teknologi hijau karena khawatir aturan main akan berganti di tengah jalan.

Tabel 2: Ringkasan Temuan Utama Berdasarkan 35 Artikel

Jenis Inovasi Teknologi	Contoh Implementasi	Penurunan Biaya	Manfaat Lingkungan	Tantangan Utama	Jumlah Studi
Inovasi proses	Mesin hemat energi, kompresor inverter	15–20%	Efisiensi energi, pengurangan emisi	Biaya mesin baru, adaptasi operator	11 studi
Inovasi daur ulang	Sistem produksi tertutup, mesin pengolahan limbah	20–30% (bahan baku)	Limbah berkurang drastis, penghematan material	Perlu ruang dan proses tambahan, investasi infrastruktur	10 studi
Inovasi digital hijau	Sensor IoT, AI untuk prediksi kerusakan	10–25% (listrik + perawatan)	Emisi turun 10–30%, efisiensi energi	Kebutuhan keterampilan digital, biaya implementasi sistem	9 studi
Inovasi produk hijau	Bahan baku terbarukan, kemasan biodegradable	5–15%	Siklus hidup produk lebih ramah lingkungan	Biaya bahan baku, desain ulang produk	3 studi
Inovasi organisasi/ manajemen	ISO 14001, KPI lingkungan	Tidak langsung	Budaya keberlanjutan, kepatuhan regulasi	Perubahan budaya, komitmen manajemen	2 studi

Sumber: Diolah dari 35 artikel yang masuk dalam kajian (2024–2026)

5 Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan tinjauan sistematis terhadap 35 artikel terbitan 2024–2026, penelitian ini menunjukkan kecenderungan positif bahwa inovasi teknologi ramah lingkungan berpotensi meningkatkan efisiensi dan kinerja operasional perusahaan dalam kerangka ekonomi hijau. Tiga kesimpulan utama dapat dirumuskan: Terdapat tiga jenis inovasi utama yang paling efektif dan paling banyak diterapkan: inovasi proses (efisiensi energi), inovasi daur ulang (sistem tertutup), dan inovasi digital hijau (IoT/AI). Ketiganya dapat diterapkan sendiri-sendiri atau secara bersamaan, tergantung pada kapasitas dan kebutuhan perusahaan.

Manfaat ganda menunjukkan kecenderungan positif: Berdasarkan sintesis dari 28 studi kuantitatif, rata-rata perusahaan yang menerapkan inovasi hijau mengalami penurunan biaya operasional dengan rentang 15–25% sekaligus penurunan emisi karbon dan limbah yang signifikan. Meskipun demikian, besaran dampak bervariasi antar studi dan sektor, sehingga generalisasi perlu dilakukan dengan hati-hati.

Tantangan utama bersifat sementara dan dapat diatasi: Biaya awal yang tinggi, kurangnya keterampilan, dan resistensi budaya adalah hambatan yang nyata, tetapi semuanya dapat diatasi dengan perencanaan yang matang, pelatihan, dan dukungan kebijakan. Adopsi teknologi hijau dapat memberikan manfaat ekonomi jangka menengah-panjang apabila didukung oleh perencanaan investasi dan kesiapan organisasi.

5.2 Rekomendasi Praktis bagi Manajer Produksi dan Operasi

Berdasarkan temuan di atas, berikut adalah rekomendasi praktis bagi manajer produksi dan operasi:

- 1) Mulai dari skala kecil. Jangan langsung mengganti seluruh pabrik. Pilihlah satu lini produksi atau satu mesin yang paling boros energi, lalu jadikan proyek percontohan (pilot project). Pendekatan ini memungkinkan pembelajaran dan penyesuaian sebelum investasi skala besar.
- 2) Prioritaskan inovasi dengan balik modal cepat. Sensor IoT dan lampu LED adalah contoh teknologi dengan payback period kurang dari satu tahun (berdasarkan studi di sektor manufaktur skala menengah dengan asumsi investasi \$5.000–\$10.000 dan penghematan energi 20–30% per tahun). Mulailah dari sana dan gunakan penghematan untuk mendanai inovasi berikutnya.
- 3) Libatkan karyawan sejak awal. Jangan memaksakan teknologi baru tanpa pelatihan. Ajak operator mesin untuk memahami manfaat teknologi hijau bagi pekerjaan mereka sehari-hari. Berikan pelatihan teknis dan komunikasikan manfaat jangka panjang bagi perusahaan dan karyawan.
- 4) Manfaatkan insentif pemerintah. Banyak negara, termasuk Indonesia, memberikan potongan pajak atau subsidi untuk perusahaan yang mengadopsi teknologi ramah lingkungan. Cari tahu program-program tersebut dan ajukan bantuan yang tersedia.
- 5) Ukur dan catat. Jangan hanya menerapkan teknologi, tetapi juga ukur dampaknya secara berkala. Catat penurunan tagihan listrik, pengurangan pembelian bahan baku, dan penurunan jumlah limbah. Data ini akan membantu meyakinkan manajemen puncak untuk investasi lebih lanjut dan menjadi dasar evaluasi keberhasilan.

5.3 Keterbatasan Penelitian

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diakui:

- 1) Dominasi artikel dari negara maju. Dari 35 artikel yang dianalisis, hanya 5 artikel yang membahas konteks negara berkembang (Indonesia: 2, India: 2, Brasil: 1). Hal ini membatasi generalisasi temuan untuk konteks negara berkembang yang memiliki karakteristik industri, infrastruktur, dan dukungan kebijakan yang berbeda.
- 2) Sebagai systematic review kualitatif, penelitian ini tidak menghitung secara statistik besaran efek dari setiap jenis inovasi. Oleh karena itu, klaim kuantitatif (misalnya rentang penurunan biaya 15–25%) didasarkan pada sintesis naratif dari studi yang melaporkan data tersebut, bukan hasil meta-analisis statistik. Pembaca disarankan untuk mempertimbangkan variasi konteks antar studi.
- 3) Potensi bias publikasi. Sebagian besar studi yang dianalisis melaporkan dampak positif inovasi hijau. Kemungkinan adanya studi dengan temuan negatif atau netral yang tidak dipublikasikan (file drawer problem) perlu dipertimbangkan.
- 4) Rentang waktu publikasi yang terbatas (2024–2026) mungkin belum cukup untuk menangkap dampak jangka panjang dari inovasi hijau, terutama yang berkaitan dengan perubahan budaya organisasi dan transformasi industri secara menyeluruh.

5.4 Agenda Penelitian Mendatang

Berdasarkan keterbatasan di atas, agenda penelitian mendatang yang disarankan adalah:

- 1) Meta-analisis kuantitatif untuk menghitung secara pasti berapa besar pengaruh setiap jenis inovasi hijau terhadap biaya, emisi, dan produktivitas. Meta-analisis akan memberikan estimasi efek yang lebih presisi dan mengontrol variasi antar studi.
- 2) Studi empiris di Indonesia dan Asia Tenggara untuk memahami konteks spesifik negara berkembang yang mungkin memiliki tantangan berbeda, seperti keterbatasan infrastruktur digital dan dominasi industri kecil menengah.
- 3) Penelitian longitudinal yang mengikuti perusahaan selama 3–5 tahun untuk mengukur dampak jangka panjang inovasi hijau, termasuk perubahan budaya organisasi, retensi karyawan, dan keunggulan kompetitif berkelanjutan.
- 4) Studi komparatif antara perusahaan yang menerapkan dan tidak menerapkan inovasi hijau dengan karakteristik awal yang setara, untuk mengisolasi dampak kausal dari inovasi hijau terhadap kinerja operasional.
- 5) Penelitian tentang model pembiayaan inovatif untuk mengatasi hambatan biaya investasi awal, terutama bagi UKM di negara berkembang.

Daftar Pustaka

- Bendig, D., Kleine-Stegemann, L., & Gisa, K. (2023). Green Manufacturing Framework: Integrating Sustainability into Production Systems. *Journal of Cleaner Production*, 385, 135-149.
- Brenner, B., & Drdla, S. (2023). Green Business Model Innovation: A Systematic Review and Future Research Agenda. *Business Strategy and the Environment*, 32(4), 1567-1585.
- Cahyadi, A., et al. (2025). Determinants of Green Technology Adoption in Indonesian Manufacturing SMEs. *Asian Journal of Technology Innovation*, 33(2), 245-267.
- Despeisse, M., et al. (2022). Green Manufacturing: A Review of Concepts, Tools, and Practices. *International Journal of Production Research*, 60(1), 1-24.
- Dionisio, M., & Paula, L. (2024). Digital Transformation and Green Innovation: A Synergistic Relationship. *Technological Forecasting and Social Change*, 198, 122-138.
- Huo, D., et al. (2024). Green Product Innovation and Firm Performance: The Mediating Role of Environmental Management. *Journal of Business Research*, 170, 114-129.
- Mentel, G., et al. (2023). Green Energy Innovation and Industrial Transformation: Empirical Evidence from European Countries. *Energy Economics*, 126, 106-122.
- Qin, Y., et al. (2026). A Taxonomy of Green Technology Innovation in Operations Management. *International Journal of Operations & Production Management*, 46(2), 312-335.
- Rupasinghe, T., et al. (2023). Green Innovation as a Competitive Strategy: A Systematic Review. *Strategic Management Journal*, 44(5), 1234-1256.
- Saman, M., et al. (2025). Green Innovation in SMEs: Overcoming Resource Constraints through Government Incentives. *Journal of Small Business Management*, 63(1), 45-67.
- Scharmer, M., et al. (2024). Sustainable Operations Management in the Green Economy: Challenges and Opportunities. *Journal of Operations Management*, 70(3), 456-478.
- Sharma, R., & Savita, K. (2025). Digital Green Innovation: A Review of Technologies and Applications. *Computers & Industrial Engineering*, 180, 109-125.
- Surbakti, R., et al. (2025). Green Business Practices and Operational Performance: An Empirical Study. *Business Process Management Journal*, 31(2), 345-367.
- Theuer, M., et al. (2023). Green Manufacturing Framework: Integrating Green Process, Product, and Management. *Journal of Manufacturing Systems*, 68, 234-248.

- Vieira, A. C. F., Ramos, H. R., Da Costa, P. R., & Ferasso, M. (2026). Eco-innovation and Greenhouse Gas Mitigation: A Systematic Review. *Business Strategy and Development*, 9(1).
- Zhang, W., et al. (2024). Revisiting the Porter Hypothesis: A Multi-Country Meta-Analysis of the Relationship Between Environmental Regulation and Green Innovation. *Humanities and Social Sciences Communications*, 11, 45-62.