



Inovasi *Eco-Pallet* Berbahan Carton Sebagai Solusi Pengurangan Limbah dan Efisiensi Biaya Produksi

I Ketut Yogi Swarananda¹, I Gusti Putu Suryawan²

¹Program Studi Teknik Elektro, Universitas Gajah Mada

²Pendidikan Matematika, Universitas Pendidikan Ganesha

E-mail : iketut.swarananda@danone.com¹, igusti.putusuryawan@danone.com²

Article Info

Article history:

Received October 13, 2025

Revised October 16, 2025

Accepted October 19, 2025

Keywords:

Eco-Pallet, Non-B3 Waste, Circular Economy

ABSTRACT

The issue of industrial waste, particularly non-hazardous solid waste (non-B3) generated from single-use wooden pallets, has become a major concern in implementing the concept of sustainable production. The eco-pallet innovation, made from cardboard materials, was developed to replace wooden pallets in the packaging process of production materials. This study aims to evaluate the effectiveness of eco-pallets in reducing waste generation, minimizing production costs, and supporting the principles of the circular economy. The research employed a descriptive quantitative method by comparing empirical data between the use of wooden pallets and cardboard pallets. The results showed that the implementation of eco-pallets successfully reduced non-B3 waste by up to 38 tons per year and achieved cost savings of Rp 85,000,000, with an average pallet weight reduction from 16 kg to 5 kg per unit. This innovation has proven effective in creating a more efficient, environmentally friendly, and economically sustainable production process.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Article Info

Article history:

Received October 13, 2025

Revised October 16, 2025

Accepted October 19, 2025

Kata Kunci:

Eco-Pallet, Limbah Non-B3, Ekonomi Sirkular

ABSTRAK

Permasalahan limbah industri, khususnya limbah padat non-B3 dari penggunaan *pallet* kayu sekali pakai, menjadi isu penting dalam penerapan konsep produksi berkelanjutan. Inovasi *eco-pallet* berbahan dasar karton dikembangkan untuk menggantikan *pallet* kayu dalam proses pengemasan material produksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur efektivitas *eco-pallet* dalam mengurangi limbah, menekan biaya produksi, dan mendukung prinsip ekonomi sirkular. Metode penelitian menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif melalui perbandingan data penggunaan *pallet* kayu dan *pallet* karton. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan *eco-pallet* mampu menurunkan beban limbah Non-B3 hingga 38 ton per tahun dan memberikan penghematan biaya sebesar Rp 85.000.000, dengan penurunan berat rata-rata *pallet* dari 16 kg menjadi 5 kg per unit. Inovasi ini terbukti efektif dalam menciptakan proses produksi yang lebih efisien, ramah lingkungan, dan ekonomis.

This is an open access article under the [CC BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license.



Corresponding Author:



I Ketut Yogi Swarananda
Universitas Gajah Mada
Email: iketut.swarananda@danone.com

PENDAHULUAN

Industri manufaktur memiliki kontribusi signifikan terhadap peningkatan ekonomi nasional, namun juga menjadi penyumbang utama timbunan limbah padat industri. Salah satu sumber limbah yang sering diabaikan adalah material kemasan pendukung logistik seperti pallet kayu. Penggunaan pallet kayu sekali pakai dalam proses distribusi dan penyimpanan produk menyebabkan akumulasi limbah padat karena material tersebut tidak mudah didaur ulang dan memiliki masa pakai yang relatif pendek. Selain itu, kayu sebagai bahan utama memerlukan proses produksi yang intensif energi serta berdampak pada penebangan pohon dalam skala besar, yang pada akhirnya meningkatkan emisi karbon dan degradasi lingkungan (Sitorus, dkk. 2023). Oleh karena itu, diperlukan strategi substitusi material kemasan dengan bahan yang lebih ramah lingkungan dan efisien secara sumber daya. *Pallet* kayu konvensional memiliki berat sekitar 15–20 kg per unit dan hanya digunakan satu kali untuk transportasi barang sebelum menjadi limbah ekonomis. Siklus penggunaan yang pendek ini menimbulkan dua permasalahan utama: pertama, meningkatnya volume limbah kayu yang sulit dikelola; dan kedua, meningkatnya biaya produksi dan disposal yang ditanggung oleh industri. Limbah pallet kayu tergolong limbah non-B3, namun jumlahnya besar dan membutuhkan ruang penyimpanan serta biaya transportasi tambahan untuk pengelolaannya (Wardana, dkk. 2024). Berdasarkan kajian UNEP (2022), industri yang tidak menerapkan sistem kemasan berkelanjutan berpotensi kehilangan hingga 10–15% efisiensi logistik akibat penanganan limbah material sekali pakai.

Kesadaran global terhadap perubahan iklim dan krisis sumber daya mendorong berbagai sektor industri melakukan transformasi menuju sistem produksi hijau (*green manufacturing*) dan produksi berkelanjutan (*sustainable production*). Konsep ini mengintegrasikan prinsip efisiensi sumber daya, pengurangan emisi karbon, dan pencegahan pencemaran lingkungan dalam seluruh rantai nilai produksi (Kemenperin, 2023). Secara global, implementasi *green manufacturing* telah menjadi indikator utama keberlanjutan industri sebagaimana diatur dalam kerangka kerja *United Nations Industrial Development Organization* (UNIDO, 2021) dan *ISO 14001 Environmental Management System*. Studi oleh Li et al. (2021) menunjukkan bahwa penerapan *green design* dan efisiensi material dapat menurunkan jejak karbon hingga 30–40% di sektor manufaktur dibandingkan metode konvensional. Di Indonesia, strategi nasional menuju *Low Carbon Manufacturing Roadmap 2030* juga menegaskan pentingnya efisiensi energi, pengelolaan limbah, serta substitusi material ramah lingkungan sebagai faktor utama daya saing industri berkelanjutan (Kemenperin, 2023). Dengan demikian, transformasi industri ke arah produksi hijau bukan hanya sebuah tren, tetapi kebutuhan strategis untuk mempertahankan keberlanjutan ekonomi dan ekologi.

Konsep *eco-pallet* berbahan karton merupakan bentuk penerapan prinsip *Reduce*, *Reuse*, dan *Recycle* (3R) dalam ekonomi sirkular, di mana bahan yang digunakan dalam proses produksi diupayakan dapat kembali ke siklus industri melalui daur ulang atau pemanfaatan ulang (Rahmawati, 2022). Pallet karton memiliki karakteristik ringan, mudah didaur ulang, dan dapat diproduksi dari bahan kertas bekas, sehingga mengurangi ketergantungan pada bahan kayu. Selain itu, secara karbon, material karton memiliki jejak emisi CO₂ 40% lebih rendah



dibandingkan kayu (Putra et al., 2024). Hal ini menjadikan *eco-pallet* sebagai inovasi strategis yang mendukung efisiensi sumber daya sekaligus pengurangan jejak lingkungan industri manufaktur. Selain memberikan dampak lingkungan positif, penerapan *eco-pallet* juga berimplikasi pada efisiensi biaya operasional melalui bobot rata-rata hanya 5 kg per unit, *pallet* karton mampu mengurangi beban logistik hingga 70% dibandingkan *pallet* kayu. Efisiensi ini berdampak langsung terhadap pengurangan konsumsi energi dalam transportasi, serta biaya produksi dan pengelolaan limbah. Berdasarkan studi oleh Li et al. (2021), penggantian *pallet* kayu ke karton pada industri minuman menghasilkan penghematan biaya total 15–20% per siklus distribusi. Kondisi ini menunjukkan bahwa inovasi ramah lingkungan dapat berjalan selaras dengan efisiensi ekonomi. Berdasarkan uraian di atas, jelas bahwa substitusi *pallet* kayu dengan *eco-pallet* karton memiliki potensi besar dalam menekan timbulan limbah dan meningkatkan efisiensi biaya. Namun, perlu dilakukan analisis empiris yang terukur terhadap besaran penghematan dan dampak lingkungannya dalam konteks industri lokal. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk menilai secara kuantitatif dampak inovasi *eco-pallet* terhadap pengurangan limbah non-B3 dan penghematan biaya produksi di salah satu perusahaan manufaktur nasional. Kajian ini diharapkan dapat memberikan dasar ilmiah bagi penerapan material kemasan berkelanjutan di sektor industri lainnya di Indonesia.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan di PT Tirta Investama Pabrik Mambal, yang berlokasi di Desa Mambal, Kecamatan Abiansemal, Kabupaten Badung, Provinsi Bali. Lokasi penelitian dipilih secara purposif karena perusahaan ini merupakan salah satu unit produksi industri air minum dalam kemasan (AMDK) terbesar di Bali yang telah menerapkan sistem pengelolaan lingkungan berbasis *green manufacturing*. Inovasi *eco-pallet* berbahan karton diterapkan di pabrik ini sebagai bagian dari program efisiensi sumber daya dan pengurangan limbah non-B3. Penelitian berlangsung selama bulan Januari hingga Juli 2025, meliputi tahap pengamatan kondisi awal, penerapan inovasi, hingga evaluasi hasil implementasi.

Jenis data yang digunakan adalah deskriptif kuantitatif dengan pendekatan perbandingan data empiris sebelum dan sesudah penerapan inovasi *eco-pallet*. Pendekatan ini bertujuan memberikan gambaran nyata mengenai efektivitas sistem *eco-pallet* dalam mengurangi timbulan limbah dan menekan biaya produksi di lingkungan industri. Analisis dilakukan secara numerik terhadap data aktual dari aktivitas operasional perusahaan dan dibandingkan dengan kondisi sebelum inovasi diterapkan (Sari, dkk. 2023). Data primer diperoleh dari kegiatan operasional di PT Tirta Investama Pabrik Mambal, meliputi jumlah *pallet* yang digunakan (3.450 pcs per semester), berat rata-rata *pallet* kayu (16 kg/unit) dan *pallet* karton (5 kg/unit), biaya produksi untuk masing-masing jenis *pallet*, serta volume limbah non-B3 yang dihasilkan. Selain itu, data sekunder diperoleh dari literatur ilmiah, laporan keberlanjutan perusahaan, serta kebijakan efisiensi sumber daya dari Kementerian Perindustrian, dan referensi akademik mengenai *green packaging*, *eco-design*, serta *circular economy* (Rahmawati, 2022; UNEP, 2022; Putra et al., 2024). Teknik pengumpulan data dilakukan secara bertahap melalui observasi lapangan terhadap aktivitas penggunaan dan penyimpanan *pallet*, dokumentasi data penggunaan material dan timbulan limbah non-B3, wawancara semi-terstruktur dengan pihak terkait seperti Kepala Produksi, Supervisor Logistik,



dan Tim K3L, serta studi literatur untuk memperkuat analisis teoretis. Keseluruhan proses ini dilakukan secara sistematis dan terintegrasi untuk menghasilkan data yang akurat dan mencerminkan perubahan nyata sebelum dan sesudah penerapan inovasi *eco-pallet*.

Metode analisis data dilakukan menggunakan pendekatan deskriptif komparatif, di mana data hasil observasi sebelum dan sesudah penerapan inovasi dibandingkan secara kuantitatif. Analisis meliputi tiga komponen utama:

1. Efektivitas pengurangan limbah, dihitung dari perbedaan berat total pallet yang digunakan (kg) dan limbah non-B3 yang dihasilkan.

$$\text{Pengurangan Limbah} = (L_{\text{sebelum}} - L_{\text{sesudah}})$$

2. Efisiensi biaya produksi, dihitung dengan membandingkan biaya total pembuatan pallet kayu dan pallet karton per unit, dikalikan dengan total pallet yang digunakan.

$$\text{Penghematan} = (C_{\text{kayu}} - C_{\text{karton}}) \times N$$

Rasio efisiensi material, yaitu perbandingan antara berat pallet karton terhadap pallet kayu untuk menentukan pengurangan konsumsi bahan baku.

$$\text{Efisiensi Material} = \frac{W_{\text{karton}}}{W_{\text{kayu}}} \times 100\%$$

Data hasil analisis ditampilkan dalam bentuk tabel dan grafik untuk memudahkan interpretasi hasil, serta dikaitkan dengan literatur dan teori pendukung mengenai efisiensi energi dan ekonomi sirkular (UNIDO, 2021).

HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Efisiensi Material dalam Penurunan Limbah

Penerapan inovasi *eco-pallet* berbahan karton terbukti memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan efisiensi material dan pengurangan limbah padat di lingkungan industri. Berdasarkan hasil pengukuran di PT Tirta Investama Pabrik Mambal, berat *pallet* kayu konvensional yang sebelumnya mencapai 16 kg per unit dapat dikurangi menjadi hanya 5 kg per unit pada desain *eco-pallet* karton. Perbedaan massa sebesar 11 kg per *pallet* ini, jika dikalikan dengan jumlah total penggunaan 3.450 *pallet* per semester, menghasilkan efisiensi massa mencapai 37.950 kg atau sekitar 38 ton per tahun. Penghematan ini sangat signifikan karena material kayu pada umumnya tergolong *non-reusable*, dan setelah pemakaian satu kali langsung menjadi limbah non-B3. Oleh karena itu, substitusi material ini bukan hanya berdampak pada efisiensi operasional, tetapi juga menjadi strategi mitigasi limbah padat industri, mendukung agenda nasional *zero waste manufacturing* (Santoso, dkk, 2022). Pengurangan bobot material juga memberikan efek berantai terhadap efisiensi energi transportasi dan distribusi logistik. Dalam sistem distribusi barang, berat total pallet berpengaruh langsung terhadap konsumsi bahan bakar kendaraan dan emisi karbon (CO₂) yang dihasilkan. Studi oleh Huang et al. (2023) menunjukkan bahwa setiap penurunan berat kemasan



sebesar 10% dapat menurunkan emisi bahan bakar transportasi hingga 6–8% per kilometer perjalanan. Dengan demikian, penggunaan *eco-pallet* yang lebih ringan tidak hanya mengurangi beban fisik pengangkutan, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap penurunan *carbon footprint* perusahaan dalam rantai pasok logistiknya.

Penerapan *eco-pallet* mendukung implementasi kebijakan “Zero Waste to Landfill”, yaitu upaya sistematis untuk memastikan bahwa semua limbah industri dapat digunakan kembali (*reuse*), didaur ulang (*recycle*), atau dimanfaatkan kembali (*recovery*) sebelum mencapai tahap pembuangan akhir. Berdasarkan pengamatan di lapangan, pengurangan material kayu secara langsung menurunkan frekuensi pengangkutan limbah non-B3 dan biaya pengelolaannya. Studi oleh Santoso, dkk (2022) menegaskan bahwa substitusi bahan non-reusable seperti kayu dapat menekan timbulan limbah hingga 45% serta mengurangi biaya penanganan dan transportasi limbah hingga 30% per siklus produksi. Dalam konteks PT Tirta Investama, hal ini berarti bahwa perusahaan tidak hanya menghemat sumber daya finansial, tetapi juga meningkatkan efisiensi sistem pengelolaan lingkungan yang lebih terukur dan berkelanjutan. Selain menurunkan timbulan limbah, substitusi *pallet* kayu menjadi karton juga memberikan manfaat ekologis jangka panjang melalui konservasi sumber daya alam dan pengurangan emisi karbon dari proses produksi kayu. Setiap *pallet* kayu memerlukan sekitar 0,02 m³ kayu sebagai bahan baku. Dengan mengurangi penggunaan 3.450 *pallet* per semester, maka perusahaan dapat menghemat 69 m³ kayu per tahun, setara dengan penyelamatan sekitar 120 pohon berumur produktif yang seharusnya ditebang untuk memenuhi kebutuhan produksi. Hasil ini selaras dengan penelitian Li et al. (2021) yang menunjukkan bahwa penggantian material berbasis kayu ke material berbasis serat daur ulang mampu menurunkan konsumsi bahan baku hutan hingga 60%, sekaligus mengurangi tekanan terhadap deforestasi di wilayah tropis.

Dalam perspektif siklus hidup material (*life cycle assessment*), proses pembuatan *pallet* karton memiliki jejak karbon (*carbon footprint*) yang jauh lebih rendah dibandingkan dengan *pallet* kayu. Menurut Rahmawati (2022), bahan karton daur ulang menghasilkan rata-rata 0,94 ton CO₂e per ton material, sedangkan produksi kayu menghasilkan 1,5 ton CO₂e per ton material, perbedaan sekitar 37% lebih rendah. Dengan penghematan 38 ton material kayu per tahun, maka potensi pengurangan emisi karbon yang dicapai oleh perusahaan setara dengan sekitar 21 ton CO₂e per tahun. Angka ini menunjukkan kontribusi langsung *eco-pallet* terhadap komitmen Net Zero Emission 2060 yang dicanangkan pemerintah Indonesia, sebagaimana tercantum dalam *Enhanced Nationally Determined Contribution* (NDC) 2022. Dari sisi lingkungan global, penerapan sistem penggantian material ini juga sejalan dengan konsep *Cleaner Production* (CP) yang dikembangkan oleh *United Nations Environment Programme* (UNEP, 2022), di mana efisiensi sumber daya dianggap sebagai strategi utama dalam menekan dampak lingkungan tanpa mengorbankan produktivitas. Pendekatan ini menjadikan *eco-pallet* sebagai inovasi yang tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga strategiskarena mampu mengintegrasikan prinsip efisiensi, konservasi, dan keberlanjutan dalam satu sistem produksi.

Hasil penelitian ini juga memperkuat teori *Green Manufacturing Framework* oleh UNIDO (2021), yang menyebutkan bahwa optimalisasi bahan baku merupakan tahap awal dalam mencapai produksi rendah emisi dan berdaya saing tinggi. Dalam konteks PT Tirta Investama, penerapan *eco-pallet* dapat dikategorikan sebagai *eco-efficiency innovation*, yaitu



inovasi yang menghasilkan nilai ekonomi dan manfaat lingkungan secara bersamaan. Efisiensi material sebesar 38 ton per tahun tidak hanya berarti pengurangan beban limbah, tetapi juga efisiensi rantai pasok, penghematan energi transportasi, dan penurunan biaya pengelolaan limbah. Penerapan *eco-pallet* berbahan karton di PT Tirta Investama menunjukkan bahwa transformasi menuju produksi hijau (*green manufacturing*) dapat dilakukan melalui inovasi sederhana yang terukur dan berorientasi pada dampak. Melalui pendekatan efisiensi material ini, perusahaan tidak hanya mengurangi limbah, tetapi juga memperkuat posisi strategisnya sebagai pelaku industri yang berkomitmen terhadap prinsip circular economy dan tanggung jawab lingkungan jangka panjang. Hal ini menunjukkan bahwa praktik ramah lingkungan bukan sekadar kepatuhan terhadap regulasi, tetapi juga investasi strategis dalam menjaga keberlanjutan sistem produksi dan ekosistem sekitarnya.

2. Penghematan Biaya Produksi

Inovasi *eco-pallet* tidak hanya memberikan manfaat ekologis dalam menurunkan timbulan limbah, tetapi juga menunjukkan efektivitas ekonomi yang nyata dalam konteks efisiensi biaya produksi. Berdasarkan hasil pengamatan dan perbandingan data empiris di PT Tirta Investama Pabrik Mambal, biaya pembuatan satu pallet kayu diketahui lebih tinggi sekitar Rp 25.000 per unit dibandingkan dengan *pallet* karton. Dengan jumlah pemakaian 3.450 pallet per semester, perusahaan berhasil mencapai penghematan langsung sebesar Rp 85.000.000 dalam enam bulan, atau ekuivalen Rp 170.000.000 per tahun. Penghematan ini mencerminkan keberhasilan penerapan inovasi ramah lingkungan yang tidak hanya menurunkan beban lingkungan, tetapi juga memberikan nilai ekonomi terukur bagi perusahaan. Temuan ini sejalan dengan penelitian Wardana, dkk (2024) yang menyatakan bahwa penerapan *green packaging* dan *eco-material substitution* dapat menghemat biaya material hingga 18–22% per periode produksi, dengan peningkatan produktivitas dan efisiensi logistik yang signifikan. Efisiensi biaya yang diperoleh dari substitusi *pallet* kayu ke *pallet* karton menunjukkan korelasi langsung antara inovasi hijau dan keberlanjutan finansial perusahaan. Dalam sistem produksi modern, penghematan biaya bukan sekadar hasil dari penurunan pengeluaran material, tetapi juga dari pengurangan *operational waste* dan peningkatan efisiensi energi di seluruh rantai pasok. Rohman et al. (2023) menegaskan bahwa perusahaan yang menerapkan *eco-innovation strategy* berpotensi menurunkan biaya logistik dan energi hingga 20%, sekaligus memperkuat posisi kompetitif di pasar. Dalam konteks PT Tirta Investama, nilai penghematan Rp 170 juta per tahun dapat dianggap sebagai *economic leverage*, sumber dana internal baru yang dapat diarahkan untuk memperkuat sistem produksi berkelanjutan.

Penghematan finansial tersebut memberikan peluang strategis bagi perusahaan untuk melakukan reinvestasi dalam tiga aspek utama: (1) penelitian dan pengembangan material ramah lingkungan baru, (2) pelatihan sumber daya manusia di bidang keberlanjutan (*sustainability training*), dan (3) digitalisasi sistem logistik untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi rantai pasok. Berdasarkan kerangka *Green Economy Framework* dari UNIDO (2021), investasi dalam inovasi berkelanjutan memiliki rasio efisiensi biaya hingga 1:4, artinya setiap Rp 1 yang diinvestasikan pada inovasi hijau dapat menghasilkan Rp 4 penghematan operasional dalam jangka menengah. Penerapan *eco-pallet* termasuk dalam kategori “*green cost-saving innovation*”, yaitu inovasi yang menurunkan total biaya produksi tanpa mengorbankan kualitas,



melainkan meningkatkan nilai tambah dan keberlanjutan lingkungan. Secara ekonomi, biaya investasi awal *eco-pallet* relatif rendah, karena modifikasi terutama dilakukan pada desain, bahan baku, dan proses produksi, bukan pada infrastruktur besar. Berdasarkan data internal, investasi awal untuk produksi massal pallet karton dapat kembali modal (*payback period*) dalam waktu kurang dari satu tahun berkat efisiensi biaya material dan logistik. Dengan *return on investment (ROI)* yang tinggi, inovasi ini membuktikan bahwa praktik ramah lingkungan tidak identik dengan biaya tambahan, tetapi justru menjadi motor efisiensi korporasi. Hal ini sejalan dengan temuan Darmawan et al. (2022) yang menjelaskan bahwa perusahaan yang berinvestasi pada inovasi hijau mampu menekan biaya operasional sebesar 12–15% dalam dua tahun pertama penerapan dibandingkan perusahaan yang tetap menggunakan sistem konvensional. Selain penghematan biaya langsung, *eco-pallet* juga memberikan efisiensi tidak langsung (*indirect saving*) melalui pengurangan bobot produk yang berdampak pada penurunan biaya transportasi dan konsumsi energi logistik. Dengan berat yang lebih ringan, hanya 5 kg per unit dibandingkan 16 kg pallet kayu, maka setiap pengiriman produk menggunakan kendaraan distribusi mengalami pengurangan berat beban total sekitar 30-40%. Menurut Supriyanto, dkk. (2022), pengurangan berat kemasan sebesar 30% dapat menurunkan konsumsi bahan bakar truk distribusi hingga 15% per perjalanan dan mengurangi emisi CO₂ hingga 0,8 kg per km. Artinya, selain menekan pengeluaran bahan bakar, inovasi ini juga secara tidak langsung mendukung upaya dekarbonisasi transportasi industri.

Dalam konteks operasional di pabrik, pallet karton yang lebih ringan juga memberikan efek efisiensi tenaga kerja dan pemeliharaan peralatan. Aktivitas bongkar muat dan pengangkutan bahan baku atau produk jadi menjadi lebih cepat, sementara tingkat keausan peralatan seperti forklift dan *pallet mover* berkurang secara signifikan. Berdasarkan studi Wardana, dkk (2024), penurunan beban angkut rata-rata 20% dapat memperpanjang umur teknis peralatan angkut hingga 25% lebih lama, sehingga perusahaan dapat menghemat biaya pemeliharaan dan penggantian unit baru dalam jangka panjang. Efek domino ini menunjukkan bahwa efisiensi finansial tidak hanya berasal dari perbedaan harga material, tetapi juga dari peningkatan efisiensi operasional dan umur aset produksi. Secara makroekonomi, penerapan inovasi seperti *eco-pallet* mencerminkan penerapan prinsip ekonomi hijau (*green economy*), yaitu keseimbangan antara pertumbuhan ekonomi, efisiensi sumber daya, dan kelestarian lingkungan. OECD (2022) dalam laporannya menyebutkan bahwa setiap 1% peningkatan efisiensi material dalam industri manufaktur dapat memberikan kontribusi pertumbuhan ekonomi nasional sebesar 0,4% terhadap PDB, karena menurunkan ketergantungan impor bahan baku sekaligus meningkatkan daya saing industri domestik. Oleh karena itu, skala manfaat yang diperoleh PT Tirta Investama bukan hanya bersifat mikro (di tingkat perusahaan), tetapi juga makro (kontribusi terhadap ekonomi berkelanjutan nasional). Penerapan *eco-pallet* berbahan karton memberikan dua lapis manfaat finansial: pertama, penghematan langsung dari selisih biaya material dan logistic. Selanjutnya, efisiensi jangka panjang dari penurunan energi, pemeliharaan alat, dan pengelolaan limbah. Integrasi antara efisiensi biaya dan tanggung jawab lingkungan ini menjadi cerminan nyata penerapan konsep “*eco-efficiency*”, menghasilkan nilai ekonomi lebih besar dengan dampak lingkungan lebih kecil. Dengan demikian, inovasi *eco-pallet* dapat diposisikan sebagai model strategi ekonomi hijau yang layak direplikasi di berbagai



sektor industri manufaktur di Indonesia untuk mendukung transisi menuju sistem produksi rendah emisi dan berdaya saing tinggi.

SEBELUM



SESUDAH



Gambar 1. Inovasi Eco-Pallet Berbahan Carton sebagai Solusi Pengurangan Limbah dan Efisiensi Biaya Produksi PT Tirta Investama Pabrik Mambal

3. Dampak terhadap Ekonomi Sirkular

Inovasi *eco-pallet* berbahan karton di PT Tirta Investama menjadi contoh konkret penerapan konsep ekonomi sirkular (*circular economy*) dalam praktik industri manufaktur. Konsep ini berfokus pada perpanjangan siklus hidup material melalui strategi *reuse*, *recycle*, dan *recover*, menggantikan model ekonomi linear “*take–make–dispose*” yang masih dominan di sebagian besar sektor industri (Rahmawati, 2022). Melalui inovasi ini, bahan karton yang digunakan sebagai pengganti kayu memiliki kemampuan untuk didaur ulang hingga 3–5 kali sebelum menjadi limbah akhir. Artinya, material karton tidak hanya berfungsi sekali pakai, tetapi dapat terus berkontribusi dalam siklus industri tanpa perlu menambah sumber daya primer. Dengan begitu, perusahaan berhasil menciptakan sistem produksi yang lebih tertutup (*closed-loop system*), di mana limbah dari satu tahap dapat menjadi input pada tahap berikutnya (Garcia et al., 2021). Salah satu keunggulan utama *eco-pallet* dibandingkan pallet kayu adalah kemampuannya untuk mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku baru. Dalam sistem produksi tradisional berbasis kayu, setiap *pallet* baru memerlukan penebangan pohon baru dan proses manufaktur intensif energi. Dengan menggantinya menggunakan karton daur ulang, PT Tirta Investama tidak hanya mengurangi kebutuhan material primer tetapi juga menekan energi *embodied* (energi yang tertanam dalam proses produksi) secara signifikan. Penelitian Garcia et al. (2021) dan Rahmawati (2022) menunjukkan bahwa sistem sirkular berbasis material daur ulang mampu menurunkan konsumsi sumber daya primer hingga 35% dan mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 20–25% per ton material dibandingkan sistem linear konvensional. Hal ini menegaskan bahwa desain material sirkular bukan hanya solusi lingkungan, tetapi juga strategi ekonomi yang efisien dan resilien terhadap fluktuasi pasokan bahan baku.



Penerapan *eco-pallet* di PT Tirta Investama merupakan wujud nyata dari implementasi prinsip “*reuse–recycle–recover*”, yaitu tiga pilar utama dalam ekonomi sirkular. Pada tahap *reuse*, pallet karton digunakan berulang kali dalam proses logistik internal sebelum diganti. Pada tahap *recycle*, pallet yang sudah tidak layak pakai dapat diolah kembali menjadi bahan baku kertas daur ulang. Sementara pada tahap *recover*, sisa material yang tidak dapat didaur ulang lagi dapat diubah menjadi bahan bakar padat alternatif (*Refuse Derived Fuel*) atau bahan organik campuran dalam produksi *pulp*. Pendekatan berlapis ini memastikan bahwa setiap unit material memiliki nilai tambah hingga tahap akhir siklusnya, sehingga tidak ada limbah yang benar-benar terbuang percuma. Penerapan prinsip ini membuktikan bahwa *circular thinking* dapat diimplementasikan bahkan melalui inovasi sederhana seperti penggantian desain dan bahan kemasan. Selain memperpanjang umur material, penggunaan *eco-pallet* berbahan karton daur ulang juga secara signifikan menurunkan jejak karbon (*carbon footprint*) perusahaan. Berdasarkan data UNEP (2022), jejak karbon bahan karton daur ulang adalah sekitar 0,94 ton CO_{2e} per ton material, jauh lebih rendah dibandingkan kayu baru yang mencapai 1,5 ton CO_{2e} per ton material. Dengan penghematan 38 ton material kayu per tahun, maka total pengurangan emisi karbon mencapai sekitar 21 ton CO_{2e} per tahun. Secara praktis, ini setara dengan penyerapan karbon tahunan dari 100 pohon dewasa atau pengurangan emisi dari mobil berbahan bakar fosil yang menempuh 90.000 km per tahun (Huang, et al. 2023). Hal ini menunjukkan bahwa inovasi sederhana dalam bahan dan desain dapat memberikan kontribusi nyata terhadap komitmen dekarbonisasi industri dan *Net Zero Emission 2060* yang dicanangkan oleh Pemerintah Indonesia. Pengurangan penggunaan kayu dalam produksi pallet juga memiliki implikasi ekologis yang sangat penting, yaitu pencegahan deforestasi dan perlindungan biodiversitas di sektor hulu. Dalam konteks rantai pasok industri kemasan, permintaan kayu sering kali menjadi salah satu penyebab tingginya tingkat eksploitasi hutan alam. Dengan beralih ke bahan karton, PT Tirta Investama membantu mengurangi tekanan terhadap ekosistem hutan yang rentan. Li, et al. (2021) menjelaskan bahwa substitusi 1 ton bahan kayu dengan bahan berbasis serat daur ulang dapat menghemat hingga 2,5 m³ kayu bulat, sekaligus mencegah pelepasan karbon akibat degradasi hutan sebesar 1,8 ton CO_{2e}. Oleh karena itu, dampak *eco-pallet* tidak hanya terbatas pada tingkat operasional, tetapi juga berkontribusi terhadap keberlanjutan ekosistem alam secara global.

Penerapan *eco-pallet* di PT Tirta Investama mendukung pencapaian *Sustainable Development Goals* (SDG) 12: Responsible Consumption and Production, yang menekankan efisiensi penggunaan sumber daya dan pengurangan limbah di seluruh rantai pasok industri. Penerapan prinsip ini sejalan dengan kebijakan Kementerian Perindustrian (Kemenperin, 2023) melalui *Roadmap Green Industry Indonesia 2030*, yang mendorong setiap sektor manufaktur mengintegrasikan pendekatan ekonomi sirkular dalam proses produksinya. Dengan menekan konsumsi bahan baku baru dan mengoptimalkan daur ulang, inovasi ini memperlihatkan sinergi antara pertumbuhan ekonomi, efisiensi energi, dan pelestarian lingkungan sebagaimana ditekankan pula oleh OECD (2022) dalam *Policy Framework for Circular Economy Transition*. Dari perspektif sosial dan tata kelola lingkungan, implementasi sistem *eco-pallet* juga memperkuat nilai keberlanjutan korporasi (*corporate sustainability values*). Dengan beralih ke material ramah lingkungan, perusahaan meningkatkan citra positifnya sebagai pelaku industri yang peduli terhadap lingkungan dan berkomitmen terhadap tanggung jawab sosial perusahaan.



(*Corporate Social Responsibility*). Menurut Wardana & Prasetyo (2024), perusahaan yang menerapkan inovasi berorientasi sirkular memiliki keunggulan reputasi dan loyalitas konsumen lebih tinggi hingga 25% dibandingkan perusahaan yang masih menggunakan bahan linear. Hal ini menunjukkan bahwa keberlanjutan bukan hanya kewajiban moral, tetapi juga menjadi strategi kompetitif dalam pasar modern yang semakin sadar lingkungan. Penerapan *eco-pallet* menunjukkan bahwa konsep ekonomi sirkular dapat dioperasikan secara nyata di lingkungan industri tanpa memerlukan perubahan besar dalam struktur produksi. Melalui desain ulang material sederhana, perusahaan berhasil menciptakan rantai nilai baru yang efisien, ramah lingkungan, dan berdaya saing. Inovasi ini membuktikan bahwa integrasi aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi dapat diwujudkan secara simultan dalam satu sistem, menjadikan *eco-pallet* sebagai model *best practice* bagi industri manufaktur lainnya. Dengan demikian, inovasi ini tidak hanya relevan dalam konteks internal perusahaan, tetapi juga berkontribusi terhadap transformasi industri nasional menuju ekonomi rendah karbon dan sirkular.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan penelitian, dapat disimpulkan bahwa inovasi *eco-pallet* berbahan karton terbukti efektif dalam meningkatkan efisiensi sumber daya dan mendukung keberlanjutan industri manufaktur. Penerapan *eco-pallet* berhasil mengurangi beban limbah non-B3 hingga mencapai 38 ton per tahun, menggantikan *pallet* kayu konvensional yang sebelumnya hanya digunakan sekali pakai dan menjadi limbah padat industri. Selain itu, inovasi ini memberikan penghematan biaya produksi sebesar Rp 85.000.000 per semester atau sekitar Rp 170.000.000 per tahun melalui selisih harga bahan dan efisiensi logistik akibat bobot pallet yang lebih ringan. Dari aspek lingkungan, penggunaan bahan karton yang dapat didaur ulang hingga beberapa kali pemakaian memperpanjang siklus hidup material serta menekan emisi karbon dan ketergantungan terhadap sumber daya primer seperti kayu. Secara keseluruhan, inovasi ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis desain material sirkular mampu mengintegrasikan efisiensi ekonomi dengan tanggung jawab ekologis, sejalan dengan prinsip *green manufacturing* dan ekonomi sirkular yang menekankan konsep *Reduce, Reuse, Recycle (3R)*, serta mendukung pencapaian *Sustainable Development Goal (SDG) 12* tentang konsumsi dan produksi berkelanjutan di sektor industri.,

SARAN

Beberapa hal yang dapat disarankan dalam penelitian ini antara lain sebagai berikut.

1. Melakukan standarisasi desain dan uji kekuatan *eco-pallet* untuk berbagai jenis material produksi.
2. Mengembangkan sistem *recycle* internal untuk memaksimalkan pemanfaatan kembali karton bekas.
3. Menjalinkan kolaborasi dengan *supplier* bahan ramah lingkungan agar rantai pasok lebih berkelanjutan.



DAFTAR PUSTAKA

- Darmawan, T., & Kusuma, H. (2022). *Economic Evaluation of Green Innovation Investment in Manufacturing Sectors*. *International Journal of Sustainable Business*, 14(2), 65–79.
- Garcia, J. A., & Ortega, L. (2021). *Circular Economy Transition in Manufacturing Packaging Systems: A Life Cycle Assessment Perspective*. *Journal of Environmental Management*, 292, 112–125.
- Huang, Z., & Lin, Y. (2023). *Carbon Emission Reduction through Recycled Fiber-Based Packaging Materials*. *Resources, Conservation & Recycling Advances*, 15(4), 144–158.
- Kementerian Perindustrian Republik Indonesia (Kemenperin). (2023). *Panduan Implementasi Green Manufacturing di Industri Nasional*. Jakarta: Direktorat Jenderal Ketahanan dan Akses Industri Internasional.
- Li, H., Chen, X., & Zhang, J. (2021). *Sustainable Packaging and Logistics Optimization: Case Study of Paper-Based Pallets in Beverage Industry*. *Journal of Cleaner Production*, 324(129), 45–59.
- OECD. (2022). *Policy Framework for Sustainable Manufacturing and Circular Economy Transition*. Paris: OECD Publishing.
- Putra, I. M., & Nugroho, T. (2024). *Green Packaging Innovation in Manufacturing Industry: Toward Sustainable Material Management*. *Journal of Industrial Engineering*, 12(2), 45–58.
- Rahmawati, D. (2022). *Implementasi Konsep Circular Economy dalam Industri Manufaktur di Indonesia*. *Jurnal Ekologi Industri*, 8(1), 33–47.
- Rohman, T., & Dewanto, A. (2023). *Economic Impact of Eco-Design and Green Logistics Implementation in Beverage Industries*. *International Journal of Industrial Sustainability*, 7(2), 54–63.
- Santoso, H., & Nugraha, R. (2022). *Evaluation of Material Substitution for Cleaner Production in Manufacturing*. *Journal of Sustainable Industrial Systems*, 14(3), 67–78.
- Sari, L., & Wibowo, A. (2023). *Strategi Pengelolaan Limbah Non-B3 di Lingkungan Produksi Berkelanjutan*. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 15(3), 121–130.
- Sitorus, M., & Handayani, F. (2023). *Analisis Efisiensi Material Ramah Lingkungan dalam Proses Produksi Industri Otomotif*. *Jurnal Rekayasa Produksi*, 9(4), 201–213.
- UNEP. (2022). *Circular Economy and Sustainable Industrial Design*. United Nations Environment Programme Report.
- UNIDO. (2021). *Green Industry Framework: Pathways Toward Sustainable Production*. Vienna: United Nations Industrial Development Organization.
- Wardana, G., & Prasetyo, R. (2024). *Eco-Design Approach for Cost Efficiency and Waste Reduction in Industrial Packaging*. *Sustainable Manufacturing Journal*, 10(1), 56–69.