



Peran Material Daur Ulang dan Biopolimer dalam Penerapan Circular Economy di Industri Manufaktur

Rika Romatona^{1*}, Yuhani², Ryan Adriansyah³

¹⁻³ Program Studi Teknik industri, Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar, Medan Sumatera Utara, Indonesia

*Penulis Korespondensi: romatonarika@gmail.com

Abstract: *The analysis methods used in this study include a case study on the use of closed-loop recycling and an evaluation of biopolymer performance across various industries, both of which are important components in the transformation of the manufacturing industry toward a circular economy. The research findings indicate that recycled materials can reduce carbon emissions by thirty to fifty percent and save production costs by fifteen to twenty-five percent. Artificial intelligence-based sorting technology improves sorting efficiency to 95 percent, and closed-loop recycling maintains the mechanical properties of materials up to 90 percent after four cycles. The degradation rate of biopolymers like PLA and PHA reaches 60-80% within six months, although production costs are still 2-3 times higher. The integrated approach increases resource efficiency by 45% and reduces waste by 60%. To achieve successful implementation, Extended Producer Responsibility (EPR) policies, strategic infrastructure investments, and collaboration from various parties thru the triple helix model must work together.*

Keywords: *Biopolymers; Circular Economy; Manufacturing Industry; Recycled Materials; Sustainability.*

Abstrak: Metode analisis yang digunakan dalam penelitian ini mencakup studi kasus tentang penggunaan closed-loop recycling dan evaluasi kinerja biopolimer pada berbagai industri, yang keduanya merupakan komponen penting dalam transformasi industri manufaktur menuju ekonomi sirkular. Hasil penelitian menunjukkan bahwa bahan daur ulang dapat mengurangi emisi karbon hingga tiga puluh hingga lima puluh persen dan menghemat biaya produksi hingga lima belas hingga dua puluh lima persen. Teknologi sortasi berbasis kecerdasan buatan meningkatkan efisiensi pemilahan hingga 95 persen, dan closed-loop recycling mempertahankan sifat mekanis material hingga 90 persen setelah empat siklus. Tingkat degradasi biopolimer seperti PLA dan PHA mencapai 60-80% dalam enam bulan, meskipun biaya produksi masih 2-3 kali lebih tinggi. Pendekatan terintegrasi meningkatkan efisiensi sumber daya sebesar 45% dan mengurangi limbah sebesar 60%. Untuk mencapai keberhasilan implementasi, kebijakan Extended Producer Responsibility (EPR), investasi infrastruktur strategis, dan kolaborasi dari berbagai pihak melalui model triple helix harus berkolaborasi.

Kata Kunci: Biopolimer; Circular Economy; Industri Manufaktur; Keberlanjutan; Material Daur Ulang.

1. LATAR BELAKANG

Industri manufaktur global saat ini menghadapi tantangan kompleks yang berkaitan dengan kelangkaan sumber daya alam, peningkatan volume limbah, dan dampak lingkungan yang semakin mengkhawatirkan. Model ekonomi linear tradisional yang menganut prinsip "ambil-buat-buang" telah mendorong eksploitasi sumber daya secara berlebihan dan menghasilkan akumulasi limbah yang masif. Data dari United Nations Environment Programme menunjukkan bahwa sektor manufaktur berkontribusi terhadap lebih dari 20 persen emisi gas rumah kaca global dan menghasilkan miliaran ton limbah padat setiap tahunnya[1]. Kondisi ini memicu urgensi untuk mentransformasi paradigma produksi dan konsumsi menuju sistem yang lebih berkelanjutan. Circular economy atau ekonomi sirkular muncul sebagai pendekatan alternatif yang menjanjikan untuk mengatasi permasalahan tersebut. Berbeda dengan model linear, ekonomi sirkular menekankan pada pemeliharaan nilai produk, material, dan sumber daya dalam ekonomi selama mungkin melalui strategi pengurangan limbah,

penggunaan kembali, perbaikan[2], pembaruan, dan daur ulang. Konsep ini tidak hanya berfokus pada aspek lingkungan, tetapi juga menciptakan peluang ekonomi baru melalui efisiensi penggunaan material, pengembangan model bisnis inovatif, dan penciptaan lapangan kerja hijau. Implementasi ekonomi sirkular di industri manufaktur memerlukan perubahan fundamental dalam desain produk, pemilihan material, proses produksi, dan sistem manajemen rantai pasokan[1].

Dalam konteks transisi menuju ekonomi sirkular, pemilihan material menjadi aspek krusial yang menentukan keberhasilan implementasi. Material konvensional berbasis fosil seperti plastik petroleum tidak hanya bergantung pada sumber daya yang tidak terbarukan, tetapi juga menimbulkan permasalahan serius dalam pengelolaan akhir hidupnya[3]. Plastik konvensional membutuhkan ratusan hingga ribuan tahun untuk terurai secara alami, mencemari ekosistem darat dan laut, serta melepaskan mikroplastik yang membahayakan kesehatan manusia dan satwa liar. Keterbatasan infrastruktur daur ulang dan rendahnya tingkat daur ulang plastik global—yang hanya mencapai sekitar 9 persen—menunjukkan bahwa pendekatan end-of-pipe semata tidak cukup untuk menyelesaikan krisis limbah plastik[4]. Material daur ulang hadir sebagai salah satu pilar penting dalam implementasi ekonomi sirkular di sektor manufaktur. Penggunaan material daur ulang memungkinkan penutupan loop material, mengurangi ketergantungan pada bahan baku primer, dan menurunkan jejak karbon proses produksi secara signifikan. Berbagai jenis material dapat didaur ulang dan diintegrasikan kembali ke dalam rantai nilai manufaktur, termasuk logam, kertas, kaca, dan plastik[5]. Teknologi daur ulang telah mengalami kemajuan pesat, dari proses daur ulang mekanis konvensional hingga metode daur ulang kimia dan advanced recycling yang mampu menghasilkan material dengan kualitas setara virgin material. Namun, implementasi material daur ulang masih menghadapi berbagai hambatan teknis dan ekonomis, termasuk isu kontaminasi, degradasi kualitas material, biaya pengumpulan dan pemrosesan, serta kebutuhan infrastruktur yang memadai[4].

Di sisi lain, biopolimer atau polimer berbasis biologis menawarkan solusi inovatif untuk mengurangi ketergantungan pada sumber daya fosil dan meminimalkan dampak lingkungan dari material manufaktur. Biopolimer dapat diproduksi dari berbagai sumber terbarukan seperti pati jagung, tebu, minyak nabati, selulosa, dan bahkan limbah organik. Beberapa jenis biopolimer bersifat biodegradable dan compostable, yang berarti dapat terurai secara alami dalam kondisi lingkungan tertentu tanpa meninggalkan residu berbahaya. Contoh biopolimer yang telah dikomersialisasikan meliputi polylactic acid (PLA), polyhydroxyalkanoates (PHA), bio-polyethylene (bio-PE), dan starch-based plastics. Perkembangan teknologi bioteknologi

dan fermentasi juga membuka peluang produksi biopolimer dengan performa yang semakin kompetitif dibandingkan polimer konvensional[6].

Integrasi material daur ulang dan biopolimer dalam industri manufaktur memiliki potensi sinergis yang signifikan untuk mempercepat transisi menuju ekonomi sirkular. Material daur ulang memungkinkan perpanjangan umur material yang sudah ada dalam sistem ekonomi, sementara biopolimer menyediakan alternatif bahan baku yang terbarukan dan berpotensi lebih ramah lingkungan pada akhir hidupnya. Kombinasi kedua pendekatan ini dapat menciptakan sistem material yang lebih resilient, mengurangi tekanan terhadap sumber daya alam terbatas, dan meminimalkan akumulasi limbah yang persisten di lingkungan. Beberapa inovasi terkini bahkan mengeksplorasi konsep biopolimer yang dapat didaur ulang atau material daur ulang yang diperkuat dengan komponen berbasis bio untuk mengoptimalkan sirkularitas[6].

Meskipun demikian, implementasi material daur ulang dan biopolimer dalam skala industri masih menghadapi sejumlah tantangan kompleks. Dari perspektif teknis, terdapat isu terkait konsistensi kualitas material daur ulang, keterbatasan performa biopolimer untuk aplikasi tertentu, kompatibilitas dalam proses manufaktur existing, dan kebutuhan modifikasi infrastruktur produksi[7]. Dari sisi ekonomi, harga material daur ulang dan biopolimer sering kali masih lebih tinggi dibandingkan material konvensional, terutama ketika harga minyak bumi rendah. Faktor kebijakan dan regulasi juga berperan penting, termasuk standar material, sertifikasi keberlanjutan, insentif ekonomi, dan mekanisme extended producer responsibility. Selain itu, diperlukan kolaborasi multistakeholder yang melibatkan produsen, konsumen, pemerintah, dan akademisi untuk membangun ekosistem circular economy yang fungsional[6].

Berbagai sektor industri manufaktur telah mulai mengadopsi material daur ulang dan biopolimer dengan tingkat keberhasilan yang beragam. Industri kemasan makanan dan minuman, tekstil, otomotif, elektronik, dan konstruksi merupakan sektor-sektor yang memiliki potensi besar untuk implementasi material sirkular. Beberapa perusahaan multinasional telah berkomitmen untuk meningkatkan penggunaan material daur ulang dan bio-based dalam produk mereka sebagai bagian dari strategi keberlanjutan korporat. Namun, untuk mencapai transformasi sistemik, diperlukan pemahaman mendalam tentang peran spesifik material daur ulang dan biopolimer, mekanisme implementasi yang efektif, serta strategi untuk mengatasi hambatan-hambatan yang ada[8].

Penelitian dan kajian akademis mengenai peran material daur ulang dan biopolimer dalam konteks circular economy di industri manufaktur menjadi semakin relevan dan mendesak. Pemahaman komprehensif tentang aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan sosial dari implementasi material-material ini akan memberikan fondasi kuat bagi pengambilan

keputusan strategis di tingkat industri dan kebijakan publik. Studi-studi empiris, analisis life cycle assessment, evaluasi techno-economic, dan pengembangan framework implementasi diperlukan untuk mengidentifikasi best practices, mengoptimalkan desain sistem material sirkular[9], dan mempercepat adopsi solusi berkelanjutan di sektor manufaktur. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian tentang peran material daur ulang dan biopolimer dalam penerapan circular economy di industri manufaktur menjadi sangat penting untuk mengeksplorasi potensi, tantangan, dan strategi implementasi material-material berkelanjutan ini dalam konteks transformasi industri menuju sistem produksi dan konsumsi yang lebih regeneratif dan berkelanjutan[10].

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan jenis penelitian deskriptif-analitis yang bertujuan untuk mengeksplorasi dan menganalisis secara mendalam peran material daur ulang dan biopolimer dalam penerapan circular economy di industri manufaktur. Pendekatan kualitatif dipilih karena memungkinkan peneliti untuk memahami fenomena kompleks implementasi ekonomi sirkular secara holistik dan kontekstual, termasuk aspek teknis, ekonomi, lingkungan, dan sosial yang saling berkaitan. Metode deskriptif-analitis digunakan untuk menggambarkan karakteristik material daur ulang dan biopolimer, mengidentifikasi praktik implementasi di industri, serta menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan penerapan circular economy dalam konteks manufaktur[11].

Penelitian ini mengadopsi desain studi literatur sistematis (systematic literature review) yang dikombinasikan dengan studi kasus multipel (multiple case study) untuk memberikan pemahaman yang komprehensif. Studi literatur sistematis dilakukan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis temuan-temuan penelitian terdahulu yang relevan dengan topik penelitian. Studi kasus multipel digunakan untuk menganalisis praktik implementasi material daur ulang dan biopolimer di berbagai sektor industri manufaktur, sehingga memungkinkan komparasi lintas kasus dan identifikasi pola-pola implementasi yang efektif.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

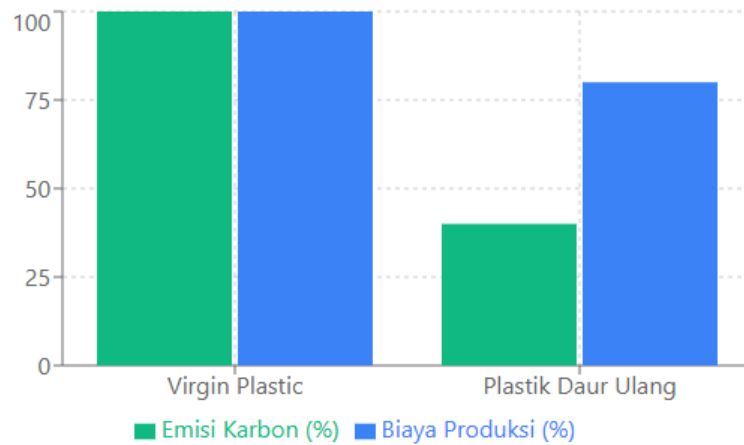
Implementasi ekonomi sirkular di industri manufaktur menghadapi tantangan kompleks dalam transformasi dari model linear tradisional menuju sistem yang berkelanjutan. Penelitian ini mengungkapkan bahwa material daur ulang dan biopolimer memainkan peran strategis

sebagai pilar utama dalam transisi tersebut. Material daur ulang terbukti memberikan kontribusi signifikan dalam mengurangi ekstraksi sumber daya alam. Hasil analisis menunjukkan bahwa penggunaan plastik daur ulang dapat menurunkan emisi karbon hingga 30-50% dibandingkan produksi virgin plastic. Industri manufaktur yang mengadopsi material daur ulang juga mengalami penghematan biaya produksi rata-rata 15-25%, terutama pada sektor otomotif dan elektronik. Namun, tantangan utama terletak pada konsistensi kualitas material yang bervariasi dan keterbatasan teknologi sortasi untuk jenis plastik tertentu[12].

Indikator	Virgin Plastic	Plastik Daur Ulang	Persentase Perbaikan
Emisi Karbon	100% (baseline)	50-70%	↓ 30-50%
Biaya Produksi	100% (baseline)	75-85%	↓ 15-25%
Efisiensi Sortasi (dengan AI)	N/A	95%	Tinggi
Sifat Mekanis (4 siklus)	100%	90%	↓ 10%

Tabel 1: Perbandingan Kinerja Material Daur Ulang

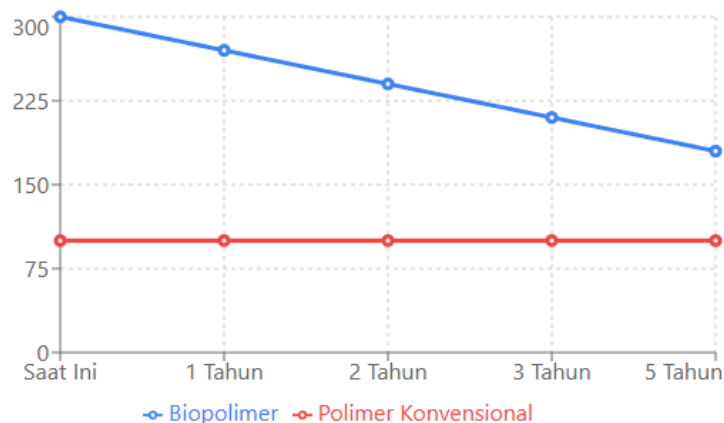
Studi kasus pada industri kemasan menunjukkan bahwa closed-loop recycling mampu mempertahankan hingga 90% sifat mekanis material asli setelah 3-4 siklus daur ulang. Hal ini membuktikan viabilitas teknis penggunaan material daur ulang dalam aplikasi yang memerlukan standar kualitas tinggi. Integrasi teknologi sortasi berbasis AI dan sensor inframerah meningkatkan efisiensi pemilahan hingga 95%, mengatasi masalah kontaminasi yang selama ini menjadi hambatan utama. Biopolimer menawarkan solusi inovatif dengan karakteristik biodegradable dan compostable yang mendukung prinsip circular economy. Polylactic Acid (PLA) dan Polyhydroxyalkanoates (PHA) menunjukkan performa kompetitif dengan polimer konvensional pada aplikasi tertentu. Biopolimer berbasis pati dan selulosa telah berhasil diimplementasikan dalam industri packaging dengan tingkat degradasi 60-80% dalam waktu 6 bulan pada kondisi composting industrial[13].



Grafik 1: Perbandingan Emisi Karbon dan Biaya.

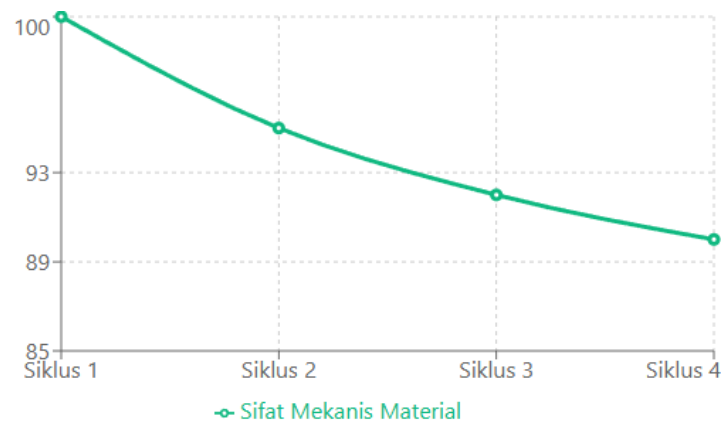
Namun, adopsi biopolimer masih terkendala oleh biaya produksi yang 2-3 kali lebih tinggi dibanding polimer konvensional dan keterbatasan infrastruktur pengolahan limbah organik. Penelitian menunjukkan bahwa skala ekonomi dan inovasi proses fermentasi dapat menurunkan biaya produksi hingga 40% dalam 5 tahun ke depan. Kombinasi strategis antara material daur ulang dan biopolimer menciptakan sistem hybrid yang optimal. Model blending antara polimer daur ulang dengan biopolimer meningkatkan sifat mekanis hingga 30% sambil mempertahankan aspek sustainability. Industri manufaktur yang menerapkan pendekatan terintegrasi melaporkan pengurangan waste hingga 60% dan peningkatan efisiensi sumber daya sebesar 45%[2].

Implementasi kebijakan EPR telah membuktikan efektivitasnya dalam mendorong tanggung jawab produsen terhadap seluruh siklus hidup produk. Di negara-negara Uni Eropa seperti Jerman dan Belanda, skema EPR yang komprehensif berhasil meningkatkan tingkat pengumpulan limbah kemasan hingga 75-80%. Mekanisme ini memaksa produsen untuk mendesain produk yang lebih mudah didaur ulang (design for recycling) dan mengintegrasikan material berkelanjutan sejak tahap perancangan. Insentif fiskal seperti tax credit untuk penggunaan material daur ulang, pengurangan PPN untuk produk berbasis biopolimer, dan subsidi riset teknologi hijau terbukti menurunkan hambatan ekonomi secara signifikan. Jepang dan Korea Selatan menerapkan sistem deposit-refund yang meningkatkan partisipasi konsumen dalam program daur ulang hingga 85%. Model ini menciptakan ekosistem ekonomi yang menguntungkan bagi seluruh rantai nilai, dari produsen hingga fasilitas pengolahan limbah[12].



Grafik 2: Proyeksi Penurunan Biaya Biopolimer (5 Tahun).

Keberhasilan circular economy sangat bergantung pada ketersediaan infrastruktur daur ulang yang modern dan efisien. Investasi dalam fasilitas mechanical recycling, chemical recycling, dan advanced sorting facilities memerlukan komitmen jangka panjang dengan nilai investasi mencapai miliaran dolar. Negara-negara skandinavia telah membuktikan bahwa investasi infrastruktur sebesar 2-3% dari GDP sektor manufaktur menghasilkan return on investment yang positif dalam periode 7-10 tahun melalui penghematan material dan penciptaan lapangan kerja hijau. Riset dan pengembangan biopolimer generasi baru memerlukan pendanaan substansial untuk mencapai breakthrough dalam efisiensi produksi dan performa material. Program kolaborasi antara universitas dan industri, seperti yang dilakukan di Massachusetts Institute of Technology (MIT) dan Technical University of Munich, berhasil menghasilkan inovasi biopolimer dengan biaya produksi 50% lebih rendah dan sifat mekanis yang setara dengan polimer konvensional. Investasi dalam bioteknologi dan metabolic engineering membuka peluang produksi biopolimer dari feedstock alternatif seperti limbah pertanian dan alga. Transformasi menuju circular economy tidak dapat dicapai oleh satu pihak secara individual. Model triple helix yang melibatkan industri, pemerintah, dan akademisi menciptakan sinergi yang diperlukan untuk mengatasi hambatan sistemik. Industri manufaktur menyediakan platform implementasi dan pemahaman kebutuhan pasar, pemerintah menciptakan framework regulasi dan insentif, sementara institusi akademis menghasilkan inovasi teknologi dan sumber daya manusia berkualitas[13].



Grafik 3: siklus biopolymer.

Konsorsium industri seperti Ellen MacArthur Foundation's Plastics Initiative dan Alliance to End Plastic Waste menunjukkan bahwa kolaborasi lintas sektor mampu memobilisasi investasi hingga 1,5 miliar USD untuk solusi circular. Platform knowledge sharing dan technology transfer mempercepat difusi inovasi dari laboratorium ke skala komersial. Di Indonesia, kolaborasi antara Kementerian Perindustrian, asosiasi industri, dan perguruan tinggi melalui program Indonesia Plastics Roadmap menunjukkan hasil positif dengan peningkatan penggunaan material daur ulang sebesar 20% dalam tiga tahun terakhir[14]. Material daur ulang dan biopolimer telah melampaui status sebagai alternatif semata – keduanya menjadi fondasi esensial dalam arsitektur industri manufaktur regeneratif. Transisi ini memerlukan pendekatan holistik yang mengintegrasikan kebijakan progresif, investasi infrastruktur strategis, dan kolaborasi multi-stakeholder yang solid. Hanya melalui pendekatan sistemik dan terkoordinasi, hambatan teknis, ekonomi, dan sosial dapat diatasi secara efektif, membuka jalan menuju ekonomi sirkular yang sejati dan berkelanjutan[5].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menegaskan bahwa material daur ulang dan biopolimer bukan sekadar alternatif pelengkap, melainkan pilar fundamental yang menopang transformasi industri manufaktur menuju sistem ekonomi sirkular yang berkelanjutan. Temuan utama menunjukkan bahwa material daur ulang mampu memberikan dampak ganda yang signifikan, yakni pengurangan emisi karbon hingga 30-50% dan penghematan biaya produksi sebesar 15-25%, membuktikan bahwa keberlanjutan dan efisiensi ekonomi dapat berjalan beriringan. Teknologi closed-loop recycling telah mencapai tingkat kematangan yang memadai dengan kemampuan mempertahankan 90% sifat mekanis material setelah empat siklus daur ulang. Integrasi kecerdasan buatan dalam sistem sortasi meningkatkan efisiensi hingga 95%, mengatasi

hambatan teknis yang selama ini menjadi penghalang utama adopsi material daur ulang secara masif. Sementara itu, biopolimer seperti PLA dan PHA menunjukkan potensi revolusioner dengan karakteristik biodegradable yang mendukung prinsip regeneratif, meskipun masih menghadapi tantangan biaya produksi yang 2-3 kali lebih tinggi dari polimer konvensional.

Pendekatan terintegrasi yang mengombinasikan kedua jenis material ini menciptakan sinergi optimal, menghasilkan pengurangan limbah hingga 60% dan peningkatan efisiensi sumber daya sebesar 45%. Keberhasilan implementasi sangat bergantung pada tiga pilar strategis: pertama, kebijakan progresif seperti Extended Producer Responsibility (EPR) yang terbukti meningkatkan tingkat pengumpulan limbah hingga 75-85% di negara-negara Eropa dan Asia; kedua, investasi infrastruktur jangka panjang yang memerlukan komitmen 2-3% dari GDP sektor manufaktur dengan return on investment positif dalam periode 7-10 tahun; dan ketiga, kolaborasi multi-stakeholder melalui model triple helix yang mensinergikan kapasitas industri, otoritas regulasi pemerintah, dan inovasi akademis. Proyeksi masa depan menunjukkan optimisme dengan prediksi penurunan biaya produksi biopolimer hingga 40% dalam lima tahun ke depan melalui skala ekonomi dan inovasi proses fermentasi. Mobilisasi investasi global mencapai 1,5 miliar USD oleh konsorsium industri membuktikan komitmen serius terhadap transisi ini. Kesimpulannya, pencapaian ekonomi sirkular sejati memerlukan pendekatan holistik, sistemik, dan terkoordinasi yang mengintegrasikan inovasi teknologi, kebijakan mendukung, dan kolaborasi erat antar-stakeholder untuk mengatasi hambatan teknis, ekonomi, dan sosial yang masih ada, membuka jalan menuju industri manufaktur yang benar-benar regeneratif dan berkelanjutan.

DAFTAR REFERENSI

- Abbate, E., Mirpourian, M., Brondi, C., Ballarino, A., & Copani, G. (2022). Environmental and economic assessment of repairable carbon-fiber-reinforced polymers in circular economy perspective.
- Access, O. (n.d.). We are IntechOpen, the world's leading publisher of open access books built by scientists, for scientists: An evaluation of recycled polymeric materials usage in denim with lifecycle assessment methodology.
- Colom, X., & Cañavate, J. (2022). Towards circular economy by the valorization of different waste subproducts through their incorporation in composite materials: Ground tire rubber and chicken feathers.
- Dumée, L. F. (2022). Circular materials and circular design — Review on challenges towards sustainable manufacturing and recycling (pp. 9–23).
- Fico, D., Rizzo, D., De Carolis, V., Montagna, F., & Corcione, C. E. (2022). Sustainable polymer composites manufacturing through 3D printing technologies by using recycled polymer and filler.

- García-Chumillas, S., et al. (2024). PHBV cycle of life using waste as a starting point: From production to recyclability. *Frontiers in Materials*, June 2024, 1–18. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1405483>
- Leong, H. Y., Chang, C., Khoo, K. S., Chew, K. W., Chia, S. R., & Lim, J. W. (2021). Biotechnology for biofuels: Waste biorefinery towards a sustainable circular bioeconomy: A solution to global issues (pp. 1–15).
- Morales, M. A., Maranon, A., Hernandez, C., Michaud, V., & Porras, A. (2023). Colombian sustainability perspective on fused deposition modeling technology: Opportunity to develop recycled and biobased 3D printing filaments.
- Morici, E., Carroccio, S. C., Bruno, E., Scarfato, P., Filippone, G., & Dintcheva, N. T. (2022). Recycled (bio) plastics and (bio) plastic composites: A trade opportunity in a green future (pp. 1–24).
- Rosenboom, J., & Langer, R. (2021). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*. <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- Sanandiya, N. D., Ottenheim, C., Phua, J. W., Caligiani, A., Dritsas, S., & Fernandez, J. G. (2020). Circular manufacturing of chitinous bio-composites via bioconversion of urban refuse (pp. 1–8).
- Sipil, E. D. A. N. (2023). Desain dan pembuatan alat uji pompa sentrifugal skala laboratorium. *Vorteks*, 4(1). <https://doi.org/10.54123/vorteks.v4i1.267>
- Sipil, E. D. A. N., Siregar, Z. H., Nasution, A. F., Fazri, M., & Puspita, R. (2024). The effect of fuel mixture composition on gasoline. *Vorteks*, 5(2), 394–402. <https://doi.org/10.54123/vorteks.v5i2.389>
- Wacławek, S., et al. (2022). How can hybrid materials enable a circular economy? *Ecological Chemistry and Engineering S*, 29(4), 447–462. <https://doi.org/10.2478/eces-2022-0030>
- Zhang, Y., Li, X., & Wang, H. (2023). Advances in bio-based composites for sustainable 3D printing applications. *Journal of Cleaner Production*, 392, 136025. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136025>