

Valorisasi Limbah Biomassa Kelapa Sawit Berbasis Ekonomi Sirkular Untuk Pengembangan Agroindustri Berkelanjutan

Solihin^{1*}, Hesti Widayani²

¹Agribisnis Pengolahan Hasil Pertanian, SMKN Pertanian Pembangunan Batang Hari, Jambi

²Prakarya & Kewirausahaan, MAN Insan Cendikia, Jambi

*Email korespondensi: lr.solihin.gr@gmail.com

Abstrak

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor agroindustri terbesar di dunia sekaligus menjadi salah satu penghasil utama limbah biomassa, seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS), cangkang inti sawit, serat mesokarp, limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS), pelepah kelapa sawit, dan batang kelapa sawit. Dalam sistem produksi linear konvensional, sebagian besar residu tersebut masih belum dimanfaatkan secara optimal sehingga berkontribusi terhadap pencemaran lingkungan, emisi gas rumah kaca, dan inefisiensi sumber daya. Berbagai penelitian sebelumnya telah mengeksplorasi teknologi konversi biomassa dan penerapan energi terbarukan pada industri kelapa sawit. Namun, integrasi prinsip ekonomi sirkular secara komprehensif dalam sistem agroindustri kelapa sawit berkelanjutan masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi penerapan ekonomi sirkular dan jalur valorisasi biomassa dalam mendukung pengembangan agroindustri kelapa sawit yang berkelanjutan. Penelitian ini menggunakan pendekatan systematic literature review (SLR) dengan sumber data berupa artikel ilmiah yang terindeks pada jurnal Scopus Q1 dan Q2, laporan organisasi internasional, serta publikasi keberlanjutan yang diterbitkan pada periode 2020–2026. Seleksi literatur dilakukan menggunakan kriteria inklusi dan eksklusi yang berfokus pada ekonomi sirkular, pemanfaatan biomassa kelapa sawit, sistem energi terbarukan, dan praktik agroindustri berkelanjutan. Data yang terkumpul dianalisis secara kualitatif melalui sintesis tematik, analisis komparatif, dan pengembangan kerangka konseptual. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biomassa kelapa sawit memiliki potensi yang sangat besar untuk dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan, bahan baku biochar, pupuk organik, karbon aktif, bioplastik, dan biomaterial berbasis selulosa. Praktik ekonomi sirkular seperti daur ulang, sistem waste-to-energy, simbiosis industri, dan pengelolaan tanpa limbah (zero-waste management) terbukti mampu meningkatkan efisiensi sumber daya, mengurangi akumulasi limbah industri, menurunkan emisi gas rumah kaca, serta meningkatkan penciptaan nilai ekonomi. Penelitian ini juga mengidentifikasi sejumlah hambatan implementasi, antara lain keterbatasan teknologi, kendala investasi, fragmentasi kebijakan, ketidakmemadaiannya infrastruktur, serta rendahnya kapasitas sumber daya manusia. Selain itu, peluang pengembangan di masa depan yang berkaitan dengan teknologi hijau, pasar karbon, integrasi Industri 4.0, transisi energi terbarukan, dan pembiayaan hijau diperkirakan dapat mempercepat transformasi agroindustri berkelanjutan. Kesimpulannya, valorisasi biomassa berbasis ekonomi sirkular merupakan strategi yang menjanjikan untuk meningkatkan keberlanjutan, ketahanan ekonomi, dan kinerja lingkungan dalam industri kelapa sawit. Kerangka konseptual yang diusulkan menunjukkan pentingnya sistem pengelolaan biomassa yang terintegrasi dalam mendukung pengembangan bioekonomi sirkular jangka panjang dan transformasi agroindustri kelapa sawit berkelanjutan.

Kata kunci: Valorisasi biomassa, Ekonomi sirkular, Agroindustri kelapa sawit, Energi terbarukan, Pembangunan berkelanjutan, Waste-to-energy

Abstract

The palm oil industry is one of the world's largest agroindustrial sectors and simultaneously one of the major generators of biomass waste, including empty fruit bunches (EFB), palm kernel shells (PKS), mesocarp fibers (MF), palm oil mill effluent (POME), oil palm fronds (OPF), and trunks (OPT). In conventional linear production systems, a significant proportion of these residues remains underutilized, contributing to environmental pollution, greenhouse gas emissions, and resource inefficiency. Previous studies have explored biomass conversion technologies and renewable energy applications in palm oil industries; however, comprehensive integration of circular economy principles within sustainable palm oil agroindustry systems remains limited. Therefore, this study aims to analyze the potential of circular economy implementation and biomass valorization pathways to support sustainable palm oil agroindustrial development. This study employed a systematic literature review (SLR) approach using scientific articles indexed in Scopus Q1 and Q2 journals, reports from international organizations, and sustainability publications published between 2020 and 2026. Literature selection was conducted using inclusion and exclusion criteria focusing on circular economy, palm oil biomass utilization, renewable energy systems, and sustainable agroindustrial practices. The collected data were analyzed qualitatively through thematic synthesis, comparative analysis, and conceptual framework development. The findings indicate that palm oil biomass possesses substantial potential for renewable energy production, biochar generation, organic fertilizer development, activated carbon production, bioplastics manufacturing, and cellulose-based biomaterials. Circular economy practices such as recycling, waste-to-energy systems, industrial symbiosis, and zero-waste management significantly improve resource efficiency, reduce industrial waste accumulation, lower greenhouse gas emissions, and enhance economic value creation. The study also identifies several implementation barriers, including technological limitations, investment constraints, policy fragmentation, infrastructure inadequacy, and limited human resource capacity. Furthermore, future opportunities related to green technology, carbon markets, Industry 4.0 integration, renewable energy transition, and green financing are expected to accelerate sustainable agroindustrial transformation. In conclusion, circular economy-based biomass valorization provides a promising strategy for enhancing sustainability, economic resilience, and environmental performance within the palm oil industry. The proposed conceptual framework demonstrates the importance of integrated biomass management systems in supporting long-term circular bioeconomy development and sustainable palm oil agroindustry transformation.

Keywords: Biomass valorization, Circular economy, Palm oil agroindustry, Renewable energy, Sustainable development, Waste-to-energy

PENDAHULUAN

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor agroindustri strategis yang memiliki pengaruh besar terhadap perekonomian global, terutama dalam penyediaan minyak nabati, energi terbarukan, dan bahan baku industri. Dibandingkan dengan tanaman penghasil minyak lainnya seperti kedelai, bunga matahari, dan rapeseed, kelapa sawit memiliki produktivitas minyak per hektare yang jauh lebih tinggi sehingga menjadi komoditas utama dalam perdagangan internasional (Cheah *et al.*, 2023). Pertumbuhan industri ini telah mendorong peningkatan pendapatan ekspor, pembukaan lapangan kerja, serta penguatan ekonomi pedesaan di negara-negara produsen utama seperti Indonesia dan Malaysia. Namun demikian, ekspansi industri kelapa sawit juga memunculkan berbagai persoalan lingkungan global, antara lain deforestasi, degradasi lahan, hilangnya keanekaragaman hayati, peningkatan emisi gas rumah kaca, serta akumulasi limbah biomassa agroindustri (Pulingam *et al.*, 2022). Kondisi tersebut menjadikan isu keberlanjutan industri kelapa sawit sebagai perhatian penting dalam agenda pembangunan berkelanjutan dunia.

Dalam konteks global, meningkatnya tekanan terhadap sektor industri untuk menerapkan prinsip keberlanjutan telah mendorong munculnya paradigma ekonomi sirkular (circular economy/CE). Ekonomi sirkular merupakan pendekatan yang menitikberatkan pada efisiensi penggunaan sumber daya melalui prinsip reduce, reuse, recycle, dan recovery guna meminimalkan limbah serta mempertahankan nilai material dalam siklus produksi selama mungkin (Yeo *et al.*, 2020). Berbeda dengan model ekonomi linear yang berorientasi pada pola “ambil–buat–buang”, ekonomi sirkular menawarkan pendekatan sistemik yang mampu mengintegrasikan aspek lingkungan, ekonomi, dan sosial secara simultan. Dalam sektor agroindustri, penerapan ekonomi sirkular dipandang mampu menciptakan sistem produksi yang lebih efisien, rendah emisi, dan berkelanjutan melalui pemanfaatan kembali limbah biomassa menjadi sumber daya bernilai tambah (Donner *et al.*, 2020). Pendekatan ini juga sejalan dengan agenda Sustainable Development Goals (SDGs), khususnya SDG 7 tentang energi bersih dan terjangkau, SDG 9 tentang industri dan inovasi, SDG 12 tentang konsumsi dan produksi berkelanjutan, serta SDG 13 tentang penanganan perubahan iklim.

Indonesia sebagai produsen minyak sawit terbesar di dunia menghadapi tantangan besar dalam pengelolaan limbah biomassa kelapa sawit. Proses budidaya dan pengolahan tandan buah segar menghasilkan residu biomassa dalam jumlah sangat besar, seperti tandan

kosong kelapa sawit (TKKS), limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS), cangkang inti sawit, serat mesokarp, pelepah, dan batang kelapa sawit. Menurut Jafri *et al.* (2021), sekitar 70–80% biomassa tandan buah segar pada akhirnya menjadi residu limbah selama proses pengolahan berlangsung. Apabila tidak dikelola secara tepat, residu tersebut dapat menimbulkan pencemaran lingkungan melalui emisi metana, peningkatan Biological Oxygen Demand (BOD) pada perairan, serta pencemaran udara akibat pembakaran terbuka (Putro, 2021). Pada sisi lain, biomassa kelapa sawit sesungguhnya memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi dan potensi besar untuk dikembangkan menjadi bioenergi, pupuk organik, biochar, biomaterial, karbon aktif, bioplastik, maupun produk biokimia lainnya (Rajakal *et al.*, 2023). Oleh karena itu, limbah biomassa kelapa sawit tidak lagi dapat dipandang semata-mata sebagai residu produksi, tetapi sebagai sumber daya strategis dalam sistem bioekonomi sirkular.

Perkembangan teknologi modern semakin memperkuat peluang implementasi ekonomi sirkular dalam industri kelapa sawit. Berbagai inovasi seperti pirolisis, gasifikasi, digesti anaerobik, hydrothermal carbonization, serta sistem biorefinery terintegrasi memungkinkan konversi biomassa menjadi produk bernilai ekonomi tinggi (Lam *et al.*, 2021). Selain itu, integrasi teknologi Industri 4.0 seperti artificial intelligence (AI), Internet of Things (IoT), blockchain, dan optimasi sistem digital juga mulai dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi pengelolaan biomassa dan keberlanjutan rantai pasok industri sawit (Ibitoye *et al.*, 2026). Siagian *et al.* (2024) menyatakan bahwa pendekatan ekonomi sirkular mampu meningkatkan profitabilitas industri melalui diversifikasi produk dan pengurangan limbah produksi. Dengan demikian, transformasi menuju agroindustri kelapa sawit berbasis ekonomi sirkular menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung transisi menuju ekonomi rendah karbon dan pembangunan industri berkelanjutan.

Meskipun demikian, implementasi ekonomi sirkular dalam sektor kelapa sawit masih menghadapi berbagai kendala. Sebagian besar industri masih menerapkan model produksi linear sehingga limbah biomassa belum dimanfaatkan secara optimal sebagai sumber daya bernilai tambah. Keterbatasan teknologi, tingginya biaya investasi, lemahnya dukungan kebijakan, kurangnya infrastruktur, serta rendahnya kolaborasi antarpemangku kepentingan menjadi faktor penghambat utama dalam pengembangan sistem agroindustri sirkular (Usapein *et al.*, 2022). Selain itu, berbagai teknologi waste-to-energy dan sistem biorefinery masih belum banyak diadopsi secara luas di negara berkembang yang menjadi pusat produksi kelapa sawit. Kondisi ini menyebabkan transisi menuju sistem agroindustri

berkelanjutan masih berlangsung secara parsial dan belum terintegrasi di sepanjang rantai pasok industri.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa isu valorisasi biomassa dan ekonomi sirkular dalam industri kelapa sawit telah banyak dikaji dari berbagai perspektif. Afshar dan Mofatteh (2024) meneliti potensi biochar untuk sekuestrasi karbon dan perbaikan tanah. Donner *et al.* (2020) mengembangkan model bisnis sirkular untuk valorisasi limbah agroindustri. Sementara itu, Norrrahim *et al.* (2022) mengkaji teknologi baru dalam pemanfaatan biomassa sawit, sedangkan Harjanti *et al.* (2025) menyoroti hubungan ekonomi sirkular dan inovasi hijau dalam transisi biofuel berkelanjutan. Penelitian lain oleh Rendón-Camargo *et al.* (2026) menekankan pentingnya simbiosis industri dalam meningkatkan efisiensi sirkulasi sumber daya. Namun demikian, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada aspek teknis atau jenis biomassa tertentu, seperti LCPKS atau TKKS, tanpa membangun kerangka integratif yang menghubungkan seluruh aliran biomassa dalam sistem agroindustri berkelanjutan.

Selain itu, kajian yang mengintegrasikan perspektif ekonomi sirkular, bioekonomi sirkular, transisi rendah karbon, ekologi industri, dan teknologi Industri 4.0 dalam konteks agroindustri kelapa sawit masih relatif terbatas. Banyak penelitian lebih menitikberatkan pada kelayakan teknologi dibandingkan mekanisme penciptaan nilai tambah, keberlanjutan jangka panjang, dan integrasi sosial-ekonomi dalam sistem agroindustri. Padahal, tantangan keberlanjutan industri sawit saat ini bersifat multidimensional sehingga membutuhkan pendekatan yang lebih holistik dan multidisipliner. Dengan demikian, masih terdapat kesenjangan penelitian terkait pengembangan kerangka konseptual terpadu yang mampu menjelaskan hubungan antara valorisasi biomassa, ekonomi sirkular, inovasi teknologi, dan pengembangan agroindustri berkelanjutan.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini memiliki kebaruan (novelty) dalam bentuk analisis komprehensif mengenai jalur valorisasi biomassa kelapa sawit berbasis ekonomi sirkular melalui pendekatan yang mengintegrasikan aspek lingkungan, ekonomi, teknologi, dan keberlanjutan agroindustri secara terpadu. Penelitian ini tidak hanya membahas pemanfaatan biomassa dari sisi teknis, tetapi juga mengkaji kontribusinya terhadap pengembangan bioekonomi sirkular, efisiensi sumber daya, transisi rendah karbon, dan penguatan sistem agroindustri berkelanjutan. Selain itu, penelitian ini berupaya menyusun kerangka konseptual integratif yang dapat menjadi dasar pengembangan strategi pengelolaan biomassa kelapa sawit yang lebih adaptif, inovatif, dan berkelanjutan.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis peran pendekatan ekonomi sirkular dalam meningkatkan valorisasi limbah biomassa kelapa sawit guna mendukung pengembangan agroindustri berkelanjutan. Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengidentifikasi jenis dan karakteristik limbah biomassa kelapa sawit; (2) mengkaji penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam pengelolaan biomassa; (3) mengevaluasi potensi ekonomi dan lingkungan dari konversi biomassa menjadi produk bernilai tambah; (4) menganalisis tantangan dan peluang implementasi strategi ekonomi sirkular; serta (5) mengusulkan kerangka konseptual terintegrasi bagi pengembangan agroindustri kelapa sawit berkelanjutan berbasis valorisasi biomassa.

MATERI DAN METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan metode *Systematic Literature Review* (SLR) untuk menganalisis secara komprehensif penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam valorisasi biomassa kelapa sawit serta kontribusinya terhadap pengembangan agroindustri berkelanjutan. Pendekatan kualitatif dipilih karena penelitian berfokus pada interpretasi, sintesis, dan pemahaman mendalam terhadap berbagai hasil penelitian terdahulu yang berkaitan dengan ekonomi sirkular, bioekonomi sirkular, pengelolaan limbah biomassa, dan keberlanjutan agroindustri kelapa sawit. Metode SLR digunakan karena mampu menyediakan prosedur penelitian yang sistematis, transparan, terstruktur, dan dapat direplikasi dalam proses identifikasi, evaluasi, serta sintesis literatur ilmiah. Penelitian ini mengadopsi kerangka Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) yang meliputi tahapan identifikasi, penyaringan (screening), penilaian kelayakan (eligibility), dan inklusi akhir artikel. Data penelitian diperoleh dari berbagai basis data ilmiah internasional bereputasi, yaitu Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, Web of Science, dan Google Scholar. Penelusuran literatur dilakukan menggunakan kombinasi kata kunci seperti “circular economy”, “palm oil biomass”, “waste valorization”, “circular bioeconomy”, “bioenergy”, “agroindustrial sustainability”, dan “renewable energy from palm oil waste” dengan bantuan operator Boolean AND, OR, dan NOT untuk meningkatkan relevansi pencarian. Artikel yang dipilih dibatasi pada publikasi ilmiah berbahasa Inggris yang diterbitkan sejak tahun 2020, memiliki keterkaitan langsung dengan topik penelitian, serta dipublikasikan melalui proses peer-review. Sementara itu, artikel yang tidak memiliki metodologi yang jelas, bersifat duplikasi, atau tidak relevan dengan fokus penelitian dikeluarkan dari proses seleksi.

Analisis data dilakukan menggunakan teknik qualitative content analysis dan thematic analysis untuk mengidentifikasi tema-tema utama, hubungan konseptual, tren teknologi, tantangan implementasi, serta peluang pengembangan ekonomi sirkular dalam industri kelapa sawit. Artikel yang terpilih diklasifikasikan berdasarkan fokus penelitian, jenis biomassa, pendekatan teknologi, dimensi keberlanjutan, dan metodologi penelitian, kemudian dilakukan pengodean tematik terhadap isu-isu utama seperti praktik ekonomi sirkular, teknologi valorisasi biomassa, produksi energi terbarukan, strategi pengelolaan limbah, dan integrasi Industri 4.0 dalam agroindustri berkelanjutan. Selanjutnya, dilakukan analisis komparatif untuk membandingkan temuan dari berbagai penelitian guna mengidentifikasi persamaan, perbedaan, tren perkembangan, serta research gap yang masih terbuka. Untuk menjamin keabsahan hasil penelitian, dilakukan triangulasi sumber melalui perbandingan hasil dari berbagai artikel dan basis data ilmiah, serta pengecekan konsistensi temuan antarpelitian yang relevan. Selain itu, proses seleksi dan sintesis artikel dilakukan secara sistematis mengikuti pedoman PRISMA guna meminimalkan bias penelitian dan meningkatkan reliabilitas hasil kajian. Hasil analisis kemudian disintesis secara komprehensif untuk merumuskan kerangka konseptual terintegrasi mengenai kontribusi valorisasi biomassa berbasis ekonomi sirkular terhadap pengembangan agroindustri kelapa sawit berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Limbah Biomassa Kelapa Sawit

Industri kelapa sawit dikenal sebagai salah satu sektor agroindustri terbesar yang menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah sangat besar sepanjang kegiatan budidaya perkebunan dan proses pengolahan di pabrik. Pertumbuhan pesat produksi kelapa sawit global, khususnya di Indonesia dan Malaysia, secara signifikan meningkatkan volume limbah biomassa yang dihasilkan setiap tahunnya. Dalam proses pengolahan kelapa sawit, hanya sebagian kecil tandan buah segar (*fresh fruit bunches/FFB*) yang dikonversi menjadi minyak kelapa sawit mentah (*crude palm oil/CPO*), sedangkan sisanya menjadi produk samping dan residu biomassa seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS), cangkang inti sawit, serat mesokarp, limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS), pelepah kelapa sawit, dan batang kelapa sawit. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sekitar 70–80% biomassa kelapa sawit yang dihasilkan dari aktivitas perkebunan dan pengolahan masih belum dimanfaatkan secara optimal, meskipun memiliki potensi ekonomi dan energi yang sangat besar (Bejarano *et al.*, 2022).

Indonesia sebagai produsen kelapa sawit terbesar di dunia menghasilkan jutaan ton residu biomassa setiap tahun. Di antara berbagai jenis biomassa tersebut, TKKS merupakan salah satu fraksi limbah padat terbesar yang dihasilkan selama proses pengolahan di pabrik, dengan proporsi sekitar 22–24% dari berat tandan buah segar. Demikian pula, LCPKS dihasilkan dalam jumlah besar selama proses sterilisasi dan klarifikasi, dengan kisaran sekitar 0,5–0,75 ton limbah cair per ton tandan buah segar yang diolah. Serat mesokarp dan cangkang inti sawit juga dihasilkan secara kontinu dan umumnya dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler di pabrik kelapa sawit, meskipun tingkat efisiensinya pemanfaatan masih relatif terbatas (Ignatyeva *et al.*, 2022).

Dari perspektif energi, biomassa kelapa sawit memiliki nilai kalor dan potensi energi terbarukan yang tinggi karena kandungan lignoselulosanya. Cangkang inti sawit umumnya memiliki nilai kalor tertinggi di antara residu biomassa padat kelapa sawit, yaitu berkisar antara 16–20 MJ/kg, sehingga sangat potensial untuk dimanfaatkan dalam proses pembakaran, gasifikasi, dan produksi bioenergi. Serat mesokarp juga memiliki nilai kalor yang cukup tinggi dan sering digunakan sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan uap dan listrik bagi operasional pabrik. Sebaliknya, TKKS memiliki kadar air yang tinggi sehingga efisiensi pembakaran langsung menjadi lebih rendah. Namun demikian, TKKS tetap memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan dalam produksi biochar, kompos, pelet biomassa, dan pengembangan biofuel generasi kedua (Hamzah *et al.*, 2019).

Residu biomassa kelapa sawit pada umumnya tersusun atas material lignoselulosa yang mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Komponen kimia tersebut menentukan kesesuaian biomassa terhadap berbagai teknologi valorisasi dan aplikasi industri. Selulosa merupakan bahan baku penting untuk produksi bioetanol, nanoselulosa, pulp kertas, dan kemasan biodegradable. Hemiselulosa berperan dalam pembentukan gula fermentasi, sedangkan lignin memiliki potensi untuk dimanfaatkan dalam produksi biochar, karbon aktif, perekat, dan bahan kimia berbasis hayati. Selain itu, LCPKS mengandung bahan organik, nutrisi, dan substrat mikroba dalam jumlah tinggi yang sangat sesuai untuk proses digesti anaerob dan produksi biogas (Dolah *et al.*, 2021).

Karakteristik fisikokimia biomassa kelapa sawit sangat memengaruhi efisiensi konversi, kinerja lingkungan, dan kelayakan ekonominya dalam sistem ekonomi sirkular. Kadar air, komposisi abu, kandungan zat volatil, kadar karbon, dan struktur serat merupakan parameter penting yang memengaruhi teknologi pengolahan biomassa seperti pirolisis, gasifikasi, fermentasi, dan perlakuan hidrotermal. Oleh karena itu, pemahaman

terhadap karakteristik limbah biomassa kelapa sawit menjadi sangat penting dalam pengembangan strategi valorisasi limbah dan sistem agroindustri berkelanjutan yang efektif (Jaya *et al.*, 2023).

Tabel 2. Jenis Limbah Biomassa Kelapa Sawit dan Potensi Pemanfaatannya

Jenis Limbah Biomassa	Karakteristik Utama	Potensi Energi	Potensi Pemanfaatan
Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)	Kadar air tinggi, kaya selulosa dan lignin	Sedang	Kompos, biochar, pelet biomassa, bioetanol, biokomposit
Cangkang Inti Sawit	Nilai kalor tinggi, kadar air rendah	Tinggi	Bahan bakar boiler, gasifikasi, karbon aktif, pelet biomassa
Serat Mesokarp	Material berserat dengan nilai kalor sedang	Tinggi	Produksi uap, pembangkit listrik, briket
Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (LCPKS)	Kandungan organik dan BOD tinggi	Tinggi (biogas)	Biogas, biometana, pupuk organik
Pelepah Kelapa Sawit	Biomassa lignoselulosa melimpah	Sedang	Pakan ternak, kompos, bahan baku biofuel
Batang Kelapa Sawit	Kaya selulosa dan pati	Sedang	Furnitur, kayu lapis, bioetanol, biokomposit

Sumber: Diolah dari berbagai jurnal

Tabel di atas menunjukkan bahwa residu biomassa kelapa sawit memiliki peluang pemanfaatan yang sangat beragam dalam sistem ekonomi sirkular. Melalui inovasi teknologi yang tepat dan strategi pengelolaan limbah yang terintegrasi, sumber daya biomassa tersebut dapat dikonversi menjadi energi terbarukan, bahan baku industri, dan produk yang ramah lingkungan. Jalur pemanfaatan tersebut tidak hanya mampu mengurangi akumulasi limbah dan pencemaran lingkungan, tetapi juga menciptakan nilai ekonomi tambahan serta memperkuat pengembangan agroindustri berkelanjutan (Yeo *et al.*, 2020).

Praktik Ekonomi Sirkular dalam Industri Kelapa Sawit

Implementasi ekonomi sirkular (*circular economy/CE*) dalam industri kelapa sawit semakin mendapatkan perhatian sebagai pendekatan strategis untuk meningkatkan efisiensi sumber daya, mengurangi dampak lingkungan, dan memperkuat keberlanjutan industri. Berbeda dengan sistem produksi linear konvensional yang menghasilkan limbah dalam jumlah besar, model ekonomi sirkular bertujuan mempertahankan sirkulasi material, energi, dan sumber daya secara berkelanjutan di sepanjang rantai produksi. Dalam sektor

kelapa sawit, praktik ekonomi sirkular terutama diterapkan melalui daur ulang biomassa, sistem *waste-to-energy*, simbiosis industri, dan konsep produksi tanpa limbah (*zero-waste*). Pendekatan-pendekatan tersebut mendukung transisi menuju pengembangan agroindustri berkelanjutan dan sistem bioekonomi sirkular (Aprilianto & Rau, 2025).

Praktik Daur Ulang (*Recycling Practices*)

Daur ulang merupakan salah satu strategi ekonomi sirkular yang paling umum diterapkan dalam agroindustri kelapa sawit. Berbagai residu biomassa yang dihasilkan selama kegiatan perkebunan dan pengolahan dapat didaur ulang menjadi produk sekunder yang memiliki nilai ekonomi. Tandan kosong kelapa sawit (TKKS), misalnya, sering dimanfaatkan sebagai kompos organik dan pembenah tanah untuk meningkatkan kesuburan lahan perkebunan serta mengurangi ketergantungan terhadap pupuk kimia. Demikian pula, pelepah dan batang kelapa sawit dapat diolah menjadi pakan ternak, material serat, dan bahan baku lignoselulosa untuk berbagai aplikasi industri. Kegiatan daur ulang tidak hanya mengurangi akumulasi biomassa, tetapi juga mendukung siklus nutrisi dan pengelolaan sumber daya berkelanjutan dalam ekosistem perkebunan (Ignatyeva *et al.*, 2022).

Selain itu, beberapa pabrik kelapa sawit telah menerapkan sistem daur ulang air dan residu proses untuk meminimalkan konsumsi air bersih serta mengurangi pembuangan limbah ke lingkungan. Limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS), misalnya, dapat diolah dan digunakan kembali untuk irigasi serta pemulihan nutrisi setelah melalui proses pengolahan biologis yang sesuai. Dengan demikian, sistem daur ulang memberikan kontribusi penting dalam meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi jejak lingkungan (*environmental footprint*) pada sistem produksi kelapa sawit (Soumya *et al.*, 2026).

Sistem *Waste-to-Energy*

Teknologi *waste-to-energy* (WtE) merupakan praktik ekonomi sirkular penting lainnya dalam industri kelapa sawit. Limbah biomassa yang dihasilkan selama proses pengolahan memiliki nilai kalor yang tinggi sehingga dapat dikonversi menjadi sumber energi terbarukan. Cangkang inti sawit dan serat mesokarp secara luas dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan uap dan listrik bagi kebutuhan operasional internal pabrik. Praktik ini memungkinkan banyak pabrik kelapa sawit menjadi sebagian mandiri energi sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil (Nura *et al.*, 2022).

Selain itu, proses digesti anaerob pada limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) telah berkembang sebagai strategi yang efektif dalam produksi biogas. LCPKS mengandung konsentrasi senyawa organik biodegradable yang tinggi sehingga sangat sesuai untuk menghasilkan metana melalui proses pengolahan biologis. Biogas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik, pemanas industri, maupun ditingkatkan kualitasnya menjadi biometana sebagai bahan bakar transportasi. Sistem *waste-to-energy* memberikan manfaat lingkungan ganda, yaitu mengurangi emisi gas rumah kaca dari limbah yang tidak terolah sekaligus menghasilkan energi terbarukan (Samuel *et al.*, 2026).

Teknologi termokimia lanjut seperti pirolisis dan gasifikasi juga semakin banyak dikaji untuk mengonversi biomassa kelapa sawit menjadi bio-oil, syngas, biochar, dan bahan bakar padat hayati. Teknologi-teknologi tersebut mendukung pengembangan sistem biorefinery terintegrasi yang mampu memaksimalkan pemanfaatan biomassa dan mendorong transformasi bioekonomi sirkular dalam sektor kelapa sawit (Rendón-Camargo *et al.*, 2026).

Simbiosis Industri (*Industrial Symbiosis*)

Simbiosis industri mengacu pada sistem kolaboratif berbagi sumber daya, di mana limbah atau produk samping dari suatu proses industri dimanfaatkan sebagai input bernilai bagi proses industri lainnya. Dalam industri kelapa sawit, simbiosis industri semakin diakui sebagai mekanisme penting untuk meningkatkan efisiensi sumber daya dan mengurangi timbulan limbah industri. Residu biomassa dari pabrik kelapa sawit dapat disalurkan ke berbagai sektor lain seperti pembangkit bioenergi, fasilitas pengomposan, industri pulp dan kertas, sektor peternakan, serta industri biokomposit (Yeo *et al.*, 2020).

Sebagai contoh, cangkang inti sawit banyak diekspor sebagai bahan bakar biomassa untuk pembangkit listrik energi terbarukan, sedangkan serat TKKS dimanfaatkan dalam produksi material kemasan biodegradable dan komposit konstruksi. Demikian pula, lumpur LCPKS yang telah diolah dapat digunakan sebagai pupuk organik untuk sistem pertanian sehingga menciptakan sirkulasi sumber daya antar sektor. Simbiosis industri mampu meningkatkan efisiensi ekonomi melalui pengurangan konsumsi bahan baku, minimisasi biaya pembuangan limbah, serta penciptaan sumber pendapatan tambahan dari produk samping biomassa (Jaya *et al.*, 2023).

Namun demikian, keberhasilan implementasi simbiosis industri memerlukan koordinasi yang kuat antar industri, dukungan kebijakan pemerintah, infrastruktur

teknologi yang memadai, serta sistem manajemen rantai pasok yang efisien. Oleh karena itu, kolaborasi antar pemangku kepentingan menjadi faktor penting dalam pengembangan ekosistem industri sirkular yang terintegrasi di wilayah penghasil kelapa sawit.

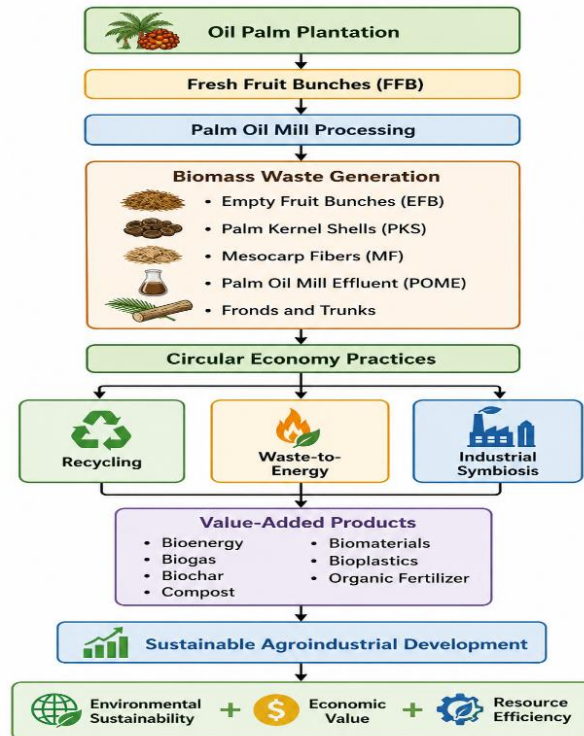
Konsep Zero Waste

Konsep *zero-waste* merupakan strategi ekonomi sirkular tingkat lanjut yang bertujuan menghilangkan timbulan limbah melalui pemanfaatan sumber daya secara menyeluruh dan sirkulasi material yang berkelanjutan. Dalam industri kelapa sawit, sistem *zero-waste* bertujuan memastikan bahwa seluruh residu biomassa yang dihasilkan selama kegiatan perkebunan dan pengolahan dimanfaatkan sepenuhnya untuk tujuan produktif. Dalam pendekatan ini, limbah padat, limbah cair, dan emisi gas diubah menjadi sumber daya bernilai seperti energi terbarukan, pupuk organik, bahan baku industri, dan produk berbasis hayati (Surendra *et al.*, 2022).

Beberapa pabrik kelapa sawit modern mulai menerapkan model produksi *zero-waste* terintegrasi melalui kombinasi teknologi daur ulang biomassa, sistem *waste-to-energy*, pemulihan nutrisi, dan penggunaan ulang air (*water reuse*). Sistem terintegrasi tersebut berkontribusi dalam mengurangi pencemaran lingkungan, menurunkan emisi karbon, dan meningkatkan kinerja keberlanjutan secara keseluruhan. Selain itu, konsep *zero-waste* sangat selaras dengan berbagai inisiatif keberlanjutan global, termasuk mitigasi perubahan iklim, transisi energi terbarukan, dan pengembangan bioekonomi sirkular (Chang & Hung, 2021).

Meskipun memiliki potensi yang menjanjikan, implementasi sistem *zero-waste* dalam sektor kelapa sawit masih menghadapi berbagai tantangan, seperti tingginya kebutuhan investasi, keterbatasan teknologi, infrastruktur yang belum memadai, dan minimnya insentif kebijakan. Oleh sebab itu, pencapaian sistem agroindustri kelapa sawit yang sepenuhnya sirkular dan tanpa limbah memerlukan inovasi berkelanjutan, dukungan kelembagaan, dan komitmen keberlanjutan jangka panjang.

Diagram di bawah menggambarkan bagaimana prinsip ekonomi sirkular memfasilitasi transformasi limbah biomassa kelapa sawit menjadi produk bernilai dan sumber daya terbarukan melalui sistem daur ulang terintegrasi, pemulihan energi, dan kolaborasi industri. Jalur sirkular tersebut memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan agroindustri berkelanjutan melalui peningkatan efisiensi pemanfaatan sumber daya, pengurangan timbulan limbah, dan peningkatan keberlanjutan lingkungan dalam industri kelapa sawit.



Gambar 1. Alur ekonomi sirkular dalam industri kelapa sawit

Jalur Valorisasi Biomassa Kelapa Sawit

Valorisasi biomassa kelapa sawit telah menjadi komponen strategis dalam implementasi ekonomi sirkular di industri kelapa sawit. Residu biomassa yang dihasilkan selama kegiatan perkebunan dan pengolahan mengandung material organik dan lignoselulosa dalam jumlah besar yang dapat dikonversi menjadi energi terbarukan, produk berbasis hayati, dan material industri yang ramah lingkungan. Melalui inovasi teknologi yang tepat, biomassa kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya bernilai untuk mendukung sistem bioekonomi sirkular, mengurangi pencemaran lingkungan, dan meningkatkan daya saing agroindustri. Berbagai penelitian terbaru menunjukkan bahwa valorisasi biomassa memberikan kontribusi signifikan terhadap pengurangan limbah, produksi energi terbarukan, mitigasi emisi karbon, dan pemanfaatan sumber daya secara berkelanjutan (Jaya *et al.*, 2023).

Produksi Bioenergi

Biogas

Produksi biogas dari biomassa kelapa sawit, khususnya limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS), merupakan salah satu jalur energi terbarukan yang paling banyak

diterapkan dalam industri kelapa sawit. LCPKS mengandung konsentrasi bahan organik biodegradable yang tinggi sehingga sangat sesuai untuk proses digesti anaerob. Dalam proses tersebut, mikroorganisme menguraikan senyawa organik pada kondisi tanpa oksigen untuk menghasilkan biogas kaya metana yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik, pemanas industri, maupun bahan bakar terbarukan (Kar *et al.*, 2024).

Implementasi sistem biogas memberikan manfaat lingkungan yang signifikan karena LCPKS yang tidak diolah akan melepaskan gas metana langsung ke atmosfer dan berkontribusi besar terhadap emisi gas rumah kaca. Teknologi penangkapan metana tidak hanya mampu menurunkan emisi karbon, tetapi juga meningkatkan kemandirian energi pada pabrik kelapa sawit. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa fasilitas biogas terintegrasi dapat memasok sebagian besar kebutuhan listrik industri sekaligus menekan biaya pengolahan limbah. Selain itu, teknologi peningkatan kualitas biogas (*biogas upgrading*) memungkinkan konversi biogas mentah menjadi biometana yang layak digunakan sebagai bahan bakar transportasi maupun injeksi ke jaringan gas (*gas grid*) (Samuel *et al.*, 2026).

Biodiesel

Biomassa kelapa sawit juga berkontribusi secara tidak langsung terhadap produksi biodiesel melalui pemanfaatan turunan minyak sawit mentah dan minyak limbah sebagai bahan baku energi terbarukan. Biodiesel berbasis kelapa sawit telah menjadi salah satu produk biofuel yang paling berkembang secara komersial di dunia karena produktivitas minyaknya yang tinggi dan karakteristik bahan bakarnya yang baik. Selain itu, residu minyak dan fraksi minyak sawit berkualitas rendah yang dihasilkan selama proses pengolahan dapat dimanfaatkan lebih lanjut untuk meningkatkan efisiensi produksi biofuel dalam sistem ekonomi sirkular (Gambier, 2022).

Pengembangan industri biodiesel mendukung transisi energi terbarukan dan mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Penggunaan biodiesel juga berkontribusi pada penurunan emisi sulfur dan peningkatan karakteristik pembakaran dibandingkan bahan bakar diesel konvensional. Namun demikian, isu keberlanjutan terkait perubahan penggunaan lahan, deforestasi, dan emisi karbon tidak langsung masih menjadi tantangan utama dalam pengembangan biodiesel. Oleh karena itu, integrasi bahan baku berbasis limbah dan sistem produksi sirkular menjadi semakin penting untuk meningkatkan kinerja keberlanjutan biodiesel (Zheng & Cho, 2025).

Pelet Biomassa

Pelet biomassa yang diproduksi dari cangkang inti sawit, tandan kosong kelapa sawit (TKKS), dan serat mesokarp semakin mendapatkan perhatian sebagai bahan bakar padat terbarukan. Proses peletisasi mengubah residu biomassa yang bersifat longgar menjadi bahan bakar padat yang lebih padat, seragam, dan memiliki efisiensi penanganan, transportasi, penyimpanan, serta pembakaran yang lebih baik. Pelet biomassa kelapa sawit memiliki nilai kalor yang relatif tinggi dan kandungan sulfur yang rendah sehingga menjadi alternatif yang menarik untuk menggantikan batu bara dalam boiler industri dan sistem pembangkit listrik (Kerdsuwan *et al.*, 2011).

Meningkatnya permintaan global terhadap energi terbarukan turut meningkatkan potensi ekspor pelet biomassa kelapa sawit, terutama ke negara-negara yang sedang menjalankan target dekarbonisasi dan transisi energi bersih. Produksi pelet biomassa juga berkontribusi dalam mengurangi praktik pembakaran terbuka dan penumpukan limbah di wilayah penghasil kelapa sawit. Meskipun demikian, tantangan terkait konsistensi bahan baku, kadar air, dan logistik rantai pasok masih memengaruhi komersialisasi skala besar dan kelayakan ekonomi jangka panjang.

Biochar dan Pupuk Organik

Perbaikan Tanah (*Soil Improvement*)

Produksi biochar dari biomassa kelapa sawit berkembang sebagai strategi yang menjanjikan untuk pengelolaan tanah berkelanjutan dan pertanian sirkular. Biochar merupakan material kaya karbon yang dihasilkan melalui proses pirolisis pada kondisi oksigen terbatas. Residu biomassa kelapa sawit seperti TKKS, cangkang inti sawit, dan pelepah kelapa sawit banyak dimanfaatkan sebagai bahan baku biochar karena kandungan lignoselulosanya yang tinggi (Ignatyeva *et al.*, 2022).

Aplikasi biochar pada lahan pertanian memberikan berbagai manfaat agronomis, antara lain memperbaiki struktur tanah, meningkatkan kapasitas retensi air, meningkatkan ketersediaan unsur hara, dan memperbesar aktivitas mikroba tanah. Biochar juga membantu menurunkan tingkat keasaman tanah dan mengurangi pencucian unsur hara (*nutrient leaching*) sehingga mampu meningkatkan kesuburan tanah dan produktivitas tanaman dalam jangka panjang. Sejumlah penelitian melaporkan bahwa integrasi biochar dengan pupuk organik dapat meningkatkan keberlanjutan perkebunan secara signifikan sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap pupuk sintetis (Shubh *et al.*, 2023).

Selain biochar, kompos dan pupuk organik yang berasal dari TKKS dan lumpur LCPKS yang telah diolah juga banyak dimanfaatkan di perkebunan kelapa sawit. Bahan

organik tersebut mendukung siklus ulang nutrisi dan memperkuat sistem pengelolaan nutrisi tertutup (*closed-loop nutrient management*) dalam kerangka ekonomi sirkular.

Sekuestrasi Karbon (*Carbon Sequestration*)

Biochar juga memiliki peran penting dalam sekuestrasi karbon dan mitigasi perubahan iklim. Struktur karbon biochar yang stabil memungkinkan karbon tersimpan di dalam tanah dalam jangka waktu yang panjang sehingga dapat membantu mengurangi konsentrasi karbon dioksida di atmosfer. Karakteristik ini menjadikan produksi biochar sebagai salah satu teknologi emisi negatif (*negative-emission technology*) yang penting dalam sistem agroindustri berkelanjutan (Maryam & Saeed, 2024).

Integrasi biochar pada perkebunan kelapa sawit secara simultan mendukung pengurangan limbah, pemanfaatan sumber daya terbarukan, dan strategi pengelolaan karbon. Selain itu, sekuestrasi karbon melalui aplikasi biochar mendukung berbagai inisiatif keberlanjutan global dan kebijakan pembangunan rendah karbon. Seiring berkembangnya pasar karbon internasional, kredit karbon berbasis biochar juga berpotensi menciptakan insentif ekonomi tambahan bagi praktik pengelolaan biomassa berkelanjutan.

Bioproduk dan Biomaterial

Bioplastik

Meningkatnya permintaan terhadap material ramah lingkungan mendorong penelitian mengenai pemanfaatan biomassa kelapa sawit untuk produksi bioplastik. Biomassa lignoselulosa dari TKKS dan residu kelapa sawit lainnya dapat diolah menjadi polimer biodegradable dan material biokomposit melalui teknologi konversi biokimia maupun termokimia. Bioplastik yang berasal dari biomassa terbarukan memiliki keuntungan lingkungan yang penting karena dapat mengurangi ketergantungan terhadap plastik berbasis minyak bumi dan menurunkan emisi karbon (Yeo *et al.*, 2020).

Bioplastik berbasis biomassa kelapa sawit memiliki potensi aplikasi pada kemasan, film pertanian, produk sekali pakai, dan material industri. Selain itu, integrasi produksi bioplastik dalam sistem biorefinery kelapa sawit dapat meningkatkan penciptaan nilai industri dan memperkuat sistem bioekonomi sirkular. Namun demikian, skalabilitas teknologi, biaya produksi, dan performa material masih menjadi faktor utama yang memengaruhi daya saing komersialnya.

Karbon Aktif (*Activated Carbon*)

Cangkang inti sawit dikenal luas sebagai bahan baku berkualitas tinggi untuk produksi karbon aktif karena kandungan karbon dan struktur porinya yang tinggi. Karbon

aktif yang dihasilkan dari biomassa kelapa sawit banyak digunakan dalam pengolahan air, pemurnian udara, sistem adsorpsi, perangkat penyimpanan energi, dan proses filtrasi industri (Lee *et al.*, 2023).

Produksi karbon aktif dari biomassa kelapa sawit mendukung valorisasi limbah dan pemulihan sumber daya sekaligus menghasilkan produk industri bernilai tinggi. Dibandingkan metode pembuangan limbah konvensional, konversi biomassa menjadi karbon aktif mampu meningkatkan nilai ekonomi dan keberlanjutan lingkungan secara signifikan.

Produk Selulosa (*Cellulose Products*)

Residu biomassa kelapa sawit mengandung selulosa dan hemiselulosa dalam jumlah besar yang dapat dimanfaatkan untuk produksi pulp kertas, nanoselulosa, tekstil, kemasan biodegradable, dan biomaterial maju (*advanced biomaterials*). TKKS menjadi salah satu bahan baku yang sangat potensial untuk ekstraksi selulosa karena kandungan seratnya yang tinggi. Nanoselulosa yang berasal dari biomassa kelapa sawit semakin banyak mendapatkan perhatian karena memiliki kekuatan mekanik yang sangat baik, bersifat biodegradable, dan berpotensi diaplikasikan pada kemasan pangan, material biomedis, dan komposit hijau (*green composites*) (Padzil *et al.*, 2020).

Pengembangan biomaterial berbasis selulosa sangat sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular dan manufaktur berkelanjutan karena mendorong pemanfaatan sumber daya terbarukan dan mengurangi ketergantungan terhadap limbah plastik. Oleh sebab itu, produk selulosa berbasis biomassa kelapa sawit merupakan peluang penting untuk meningkatkan diversifikasi industri dan keberlanjutan ekonomi di negara-negara produsen kelapa sawit.

Dampak Ekonomi dan Lingkungan

Implementasi praktik ekonomi sirkular dalam industri kelapa sawit memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan yang signifikan melalui peningkatan pemanfaatan biomassa, efisiensi sumber daya, produksi energi terbarukan, dan minimisasi limbah. Dengan mengubah residu biomassa kelapa sawit menjadi produk bernilai dan sumber daya sekunder, sistem ekonomi sirkular berkontribusi terhadap pengembangan agroindustri berkelanjutan sekaligus menjawab berbagai tantangan keberlanjutan lingkungan. Berbagai penelitian terbaru menunjukkan bahwa valorisasi biomassa berbasis ekonomi sirkular tidak hanya menciptakan nilai ekonomi tambahan, tetapi juga mendukung transformasi industri rendah karbon dan ketahanan sumber daya jangka panjang (Jaya *et al.*, 2023).

Peningkatan Nilai Ekonomi (*Economic Value Enhancement*)

Salah satu keuntungan utama implementasi ekonomi sirkular dalam sektor kelapa sawit adalah peningkatan nilai ekonomi dari pemanfaatan limbah biomassa. Pada sistem linear konvensional, biomassa kelapa sawit dalam jumlah besar hanya diperlakukan sebagai limbah sehingga menimbulkan biaya pembuangan dan hilangnya peluang ekonomi. Sebaliknya, pendekatan ekonomi sirkular mampu mengonversi residu biomassa menjadi energi terbarukan, pupuk organik, biomaterial, karbon aktif, bioplastik, dan berbagai produk bernilai tinggi lainnya yang dapat menciptakan sumber pendapatan tambahan bagi para pelaku agroindustri (Yeo *et al.*, 2020).

Komersialisasi produk berbasis biomassa telah memperluas peluang ekonomi secara signifikan di wilayah penghasil kelapa sawit. Sebagai contoh, cangkang inti sawit dan pelet biomassa telah berkembang menjadi komoditas ekspor penting untuk pasar energi terbarukan, terutama di negara-negara yang sedang menjalankan transisi menuju sistem energi rendah karbon. Demikian pula, biochar, kompos, dan material berbasis selulosa membuka peluang diversifikasi industri dan pengembangan bisnis hijau (*green business*). Pengembangan sistem biorefinery terintegrasi juga meningkatkan penciptaan nilai melalui optimalisasi pemulihan sumber daya dari berbagai aliran biomassa (Firdaus *et al.*, 2024).

Selain itu, implementasi ekonomi sirkular turut berkontribusi terhadap pengurangan biaya operasional melalui kemandirian energi, substitusi pupuk, dan optimalisasi pengolahan limbah. Produksi biogas dari limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS), misalnya, memungkinkan pabrik mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan biaya penggunaan listrik. Dengan demikian, valorisasi biomassa mampu memperkuat daya saing industri sekaligus mendukung pertumbuhan ekonomi berkelanjutan dalam sistem agroindustri.

Efisiensi Sumber Daya (*Resource Efficiency*)

Sistem ekonomi sirkular secara signifikan meningkatkan efisiensi sumber daya melalui perpanjangan siklus pemanfaatan material biomassa dan minimisasi kehilangan sumber daya selama proses produksi. Dalam sistem produksi kelapa sawit konvensional, banyak residu biomassa yang belum dimanfaatkan secara optimal atau dibuang tanpa memperoleh kembali nilai ekonomi dan lingkungannya. Praktik ekonomi sirkular seperti daur ulang, pengomposan, digesti anaerob, dan simbiosis industri memungkinkan terjadinya sirkulasi sumber daya secara berkelanjutan serta mengurangi ketergantungan terhadap bahan baku primer (*virgin raw materials*) (Emmanuel *et al.*, 2026).

Pemanfaatan biomassa secara efisien juga berkontribusi terhadap peningkatan daur ulang nutrisi dalam ekosistem perkebunan. Pupuk organik dan kompos yang berasal dari TKKS dan lumpur LCPKS membantu memulihkan unsur hara tanah dan mengurangi penggunaan pupuk sintetis yang umumnya membutuhkan energi tinggi dan berdampak negatif terhadap lingkungan. Selain itu, sistem daur ulang air terintegrasi mampu menurunkan konsumsi air bersih dan meningkatkan kinerja lingkungan pada pabrik kelapa sawit (Ignatyeva *et al.*, 2022).

Implementasi teknologi efisien sumber daya seperti biorefinery terintegrasi, peletisasi biomassa, dan sistem *waste-to-energy* semakin mendukung produktivitas industri berkelanjutan. Teknologi tersebut memungkinkan optimalisasi efisiensi konversi biomassa sekaligus mengurangi timbulan limbah operasional dan beban lingkungan.

Pengurangan Emisi Karbon (*Carbon Emission Reduction*)

Implementasi ekonomi sirkular dalam agroindustri kelapa sawit memberikan kontribusi besar terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca dan mitigasi perubahan iklim. Praktik pembuangan limbah secara konvensional seperti pembakaran terbuka dan pembuangan LCPKS tanpa pengolahan menghasilkan emisi metana dan karbon dioksida dalam jumlah besar ke atmosfer. Emisi metana dari LCPKS menjadi perhatian utama karena gas metana memiliki potensi pemanasan global yang jauh lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida (Putro, 2021).

Penerapan sistem digesti anaerob memungkinkan penangkapan gas metana dan konversinya menjadi biogas terbarukan sehingga mampu menurunkan emisi gas rumah kaca sekaligus menghasilkan energi yang bermanfaat. Demikian pula, penggantian bahan bakar fosil dengan sumber energi berbasis biomassa seperti cangkang inti sawit dan pelet biomassa berkontribusi terhadap penurunan emisi karbon bersih dan mendukung kebijakan transisi energi terbarukan. Aplikasi biochar juga mendukung sequestrasi karbon jangka panjang melalui penyimpanan karbon stabil di dalam tanah pertanian (Feng & Ros, 2024).

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa sistem ekonomi sirkular yang terintegrasi mampu secara signifikan menurunkan jejak karbon (*carbon footprint*) produksi kelapa sawit melalui peningkatan efisiensi energi, pengurangan limbah, dan pemanfaatan sumber daya terbarukan. Oleh karena itu, pengelolaan biomassa secara sirkular mendukung berbagai komitmen keberlanjutan global, termasuk target netralitas karbon dan aksi mitigasi perubahan iklim.

Pengurangan Limbah Industri (*Industrial Waste Reduction*)

Manfaat lingkungan utama lainnya dari implementasi ekonomi sirkular adalah pengurangan signifikan terhadap akumulasi limbah industri. Proses pengolahan kelapa sawit menghasilkan limbah padat dan cair dalam jumlah besar yang dapat menimbulkan pencemaran lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Praktik ekonomi sirkular mengubah aliran limbah tersebut menjadi sumber daya bernilai sehingga meminimalkan pembuangan ke tempat penimbunan akhir, pembuangan terbuka, dan kontaminasi lingkungan (Chang & Hung, 2021).

Daur ulang dan valorisasi TKKS, LCPKS, serat, cangkang, dan residu perkebunan mampu mengurangi volume limbah yang harus dibuang sekaligus meningkatkan kualitas lingkungan. Sistem *waste-to-energy* juga membantu mengurangi akumulasi biomassa dengan mengonversi residu organik menjadi listrik, panas, dan bahan bakar. Selain itu, simbiosis industri memfasilitasi pertukaran sumber daya antar industri sehingga produk samping dari suatu proses dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku untuk aktivitas industri lainnya (Syufina & Baidurah, 2022).

Sebagai hasilnya, sistem ekonomi sirkular mendorong produksi bersih (*cleaner production*), pencegahan pencemaran (*pollution prevention*), dan pengelolaan limbah berkelanjutan dalam agroindustri kelapa sawit. Perbaikan tersebut tidak hanya meningkatkan keberlanjutan lingkungan, tetapi juga memperkuat ketahanan jangka panjang dan penerimaan sosial terhadap industri kelapa sawit.

Tabel 3. Perbandingan Ekonomi Linear dan Ekonomi Sirkular dalam Industri Kelapa Sawit

Aspek	Ekonomi Linear	Ekonomi Sirkular
Model Produksi	Ambil–buat–buang (<i>take–make–dispose</i>)	Kurangi–gunakan kembali–daur ulang–pulihkan (<i>reduce–reuse–recycle–recover</i>)
Pengelolaan Limbah Biomassa	Pembuangan dan penumpukan limbah terbuka	Valorisasi limbah dan pemulihan sumber daya
Pemanfaatan Sumber Daya	Konsumsi sumber daya sekali pakai	Sirkulasi material secara berkelanjutan
Sistem Energi	Bergantung pada bahan bakar fosil	Energi terbarukan berbasis biomassa
Dampak Lingkungan	Emisi dan pencemaran tinggi	Pengurangan emisi dan beban lingkungan
Nilai Ekonomi	Nilai limbah sangat terbatas	Pendapatan tambahan dari produk samping
Timbulan Limbah	Akumulasi limbah industri tinggi	Minim limbah melalui daur ulang dan penggunaan kembali

Aspek	Ekonomi Linear	Ekonomi Sirkular
Pengelolaan Karbon	Produksi intensif karbon	Pengurangan dan sekuestrasi karbon
Kolaborasi Industri	Sistem produksi terpisah	Simbiosis industri dan sistem terintegrasi
Orientasi Keberlanjutan	Fokus produktivitas jangka pendek	Fokus pembangunan berkelanjutan jangka panjang

Sumber: Diolah dan dianalisis dari berbagai jurnal

Perbandingan di atas menunjukkan bahwa sistem ekonomi sirkular memberikan keuntungan ekonomi dan lingkungan yang lebih luas dibandingkan model produksi linear konvensional. Melalui strategi valorisasi biomassa terintegrasi, pemanfaatan energi terbarukan, dan pemulihan sumber daya, implementasi ekonomi sirkular mendukung transformasi agroindustri berkelanjutan dan meningkatkan kinerja keberlanjutan industri kelapa sawit secara keseluruhan.

Tantangan dan Hambatan

Meskipun implementasi ekonomi sirkular dalam industri kelapa sawit menawarkan manfaat ekonomi dan lingkungan yang signifikan, berbagai tantangan dan hambatan masih menghambat penerapan secara luas serta keberlanjutan jangka panjangnya. Transisi dari sistem produksi linear konvensional menuju model agroindustri sirkular yang terintegrasi memerlukan kemampuan teknologi, investasi finansial, dukungan kelembagaan, kesiapan sumber daya manusia, dan pembangunan infrastruktur yang memadai. Di banyak wilayah penghasil kelapa sawit, khususnya di negara berkembang, tantangan tersebut masih menjadi kendala utama dalam mewujudkan transformasi ekonomi sirkular secara efektif.

Hambatan Teknologi (*Technological Barriers*)

Keterbatasan teknologi merupakan salah satu kendala utama yang memengaruhi valorisasi biomassa dan implementasi ekonomi sirkular dalam sektor kelapa sawit. Meskipun berbagai teknologi konversi biomassa kelapa sawit menjadi energi terbarukan dan produk bernilai tambah telah dikembangkan, banyak di antaranya masih bersifat kompleks, mahal, dan belum sepenuhnya optimal untuk diterapkan pada skala industri besar. Teknologi konversi lanjut seperti pirolisis, gasifikasi, karbonisasi hidrotermal (*hydrothermal carbonization*), dan biorefinery terintegrasi umumnya memerlukan keahlian teknis khusus, sistem operasional yang canggih, serta stabilitas proses yang tinggi (Alqahtani & Afy-Shararah, 2025).

Selain itu, variasi karakteristik biomassa seperti kadar air, komposisi serat, dan nilai kalor dapat memengaruhi efisiensi konversi serta kinerja operasional teknologi

pengolahan. Sebagai contoh, kadar air yang tinggi pada tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dapat menurunkan efisiensi pembakaran dan meningkatkan kebutuhan proses *pre-treatment*. Demikian pula, menjaga kestabilan proses digesti anaerob untuk produksi biogas dari limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS) memerlukan pengawasan proses dan pengelolaan teknis yang ketat. Oleh karena itu, ketidakpastian teknologi dan kompleksitas operasional sering kali membuat pelaku industri ragu untuk mengadopsi teknologi biomassa sirkular.

Tantangan teknologi lainnya berkaitan dengan masih terbatasnya komersialisasi hasil penelitian dan transfer teknologi antara institusi penelitian dan sektor industri. Banyak inovasi konversi biomassa masih berada pada tahap laboratorium atau skala percontohan (*pilot scale*) dan belum berhasil diimplementasikan secara luas pada tingkat industri. Dengan demikian, diperlukan kolaborasi yang lebih kuat antara perguruan tinggi, industri, dan penyedia teknologi untuk mempercepat adaptasi teknologi dan peningkatan skalabilitas industri.

Kendala Investasi dan Finansial (*Investment and Financial Constraints*)

Tingginya kebutuhan investasi menjadi hambatan penting lainnya dalam implementasi ekonomi sirkular pada agroindustri kelapa sawit. Pembangunan fasilitas *waste-to-energy*, biorefinery terintegrasi, instalasi biogas, industri pelet biomassa, dan sistem pengolahan biomassa lanjut membutuhkan pengeluaran modal (*capital expenditure*) yang besar serta komitmen finansial jangka panjang. Produsen kelapa sawit skala kecil dan menengah sering menghadapi keterbatasan akses pembiayaan sehingga sulit untuk mengadopsi teknologi sirkular yang modern (Yeo *et al.*, 2020).

Selain itu, ketidakpastian permintaan pasar terhadap produk berbasis biomassa dan fluktuasi harga energi terbarukan menimbulkan risiko investasi tambahan. Investor cenderung berhati-hati dalam membiayai proyek valorisasi biomassa karena adanya kekhawatiran terkait profitabilitas, stabilitas kebijakan, dan reliabilitas teknologi. Di beberapa negara berkembang, keterbatasan mekanisme pembiayaan hijau (*green financing*) dan minimnya insentif ekonomi semakin melemahkan motivasi industri untuk melakukan transisi menuju ekonomi sirkular.

Kelayakan ekonomi juga sangat dipengaruhi oleh biaya logistik, efisiensi transportasi biomassa, harga energi, dan akses pasar. Residu biomassa umumnya memiliki volume besar dan tersebar secara geografis sehingga meningkatkan biaya pengangkutan dan penanganan. Oleh karena itu, peningkatan daya tarik investasi memerlukan kebijakan

ekonomi yang terintegrasi, sistem dukungan pembiayaan, serta strategi pengembangan pasar bagi industri berbasis biomassa.

Tantangan Kebijakan dan Regulasi (*Policy and Regulatory Challenges*)

Keterbatasan kebijakan dan regulasi masih menjadi hambatan kelembagaan utama dalam pengembangan ekonomi sirkular berkelanjutan di industri kelapa sawit. Meskipun banyak pemerintah telah memperkenalkan kebijakan energi terbarukan dan keberlanjutan, kerangka regulasi yang secara khusus mendukung valorisasi biomassa dan sistem industri sirkular sering kali masih terfragmentasi atau diterapkan secara tidak konsisten. Dalam beberapa kasus, tumpang tindih regulasi, kompleksitas birokrasi, dan lemahnya koordinasi kelembagaan menimbulkan ketidakpastian bagi pelaku industri dan investor (Chang & Hung, 2021).

Selain itu, belum tersedianya standar teknis dan sistem sertifikasi keberlanjutan yang jelas untuk produk berbasis biomassa dapat menghambat penerimaan pasar dan ekspansi industri. Keterbatasan insentif fiskal seperti pengurangan pajak, subsidi energi terbarukan, dan mekanisme kredit karbon juga mengurangi motivasi industri untuk mengadopsi teknologi ekonomi sirkular. Oleh karena itu, dukungan kebijakan yang efektif menjadi faktor penting dalam mempercepat transisi ekonomi sirkular dan memperkuat industri biomassa berkelanjutan.

Tekanan keberlanjutan internasional dan regulasi perdagangan global turut memperumit implementasi kebijakan di sektor kelapa sawit. Isu-isu seperti deforestasi, emisi karbon, dan tata kelola lingkungan terus memengaruhi persepsi pasar global terhadap produk kelapa sawit. Akibatnya, pemerintah dan industri harus mampu menyeimbangkan daya saing ekonomi dengan tuntutan keberlanjutan dan standar lingkungan yang semakin ketat. Roundtable on Sustainable Palm Oil memiliki peran penting dalam mendorong kepatuhan keberlanjutan dan praktik produksi yang bertanggung jawab dalam sektor ini.

Tantangan Sumber Daya Manusia (*Human Resource Challenges*)

Keterbatasan sumber daya manusia juga berpengaruh signifikan terhadap implementasi praktik ekonomi sirkular dalam agroindustri kelapa sawit. Pengoperasian teknologi konversi biomassa dan sistem sirkular terintegrasi memerlukan tenaga kerja terampil, pengetahuan teknis, kemampuan manajerial, serta kesadaran terhadap keberlanjutan. Namun, banyak wilayah penghasil kelapa sawit masih mengalami kekurangan tenaga kerja yang memiliki kompetensi untuk mengelola teknologi pengolahan biomassa tingkat lanjut dan sistem industri berbasis keberlanjutan (Jaya *et al.*, 2023).

Terbatasnya akses pendidikan dan pelatihan terkait ekonomi sirkular, energi terbarukan, ekologi industri, dan agroindustri berkelanjutan semakin membatasi kesiapan tenaga kerja. Selain itu, resistensi terhadap perubahan organisasi dan rendahnya pemahaman mengenai manfaat jangka panjang praktik ekonomi sirkular dapat mengurangi partisipasi pemangku kepentingan dan adopsi inovasi. Oleh karena itu, penguatan kapasitas sumber daya manusia memerlukan program pelatihan berkelanjutan, pendidikan teknis, kolaborasi penelitian lintas disiplin, dan inisiatif berbagi pengetahuan (*knowledge-sharing initiatives*). Integrasi teknologi Industri 4.0 seperti otomatisasi, kecerdasan buatan (*artificial intelligence*), dan sistem pemantauan digital juga menuntut kompetensi teknis baru serta keterampilan tenaga kerja yang adaptif. Dengan demikian, pengembangan modal manusia (*human capital development*) menjadi komponen penting dalam keberhasilan transformasi agroindustri sirkular.

Keterbatasan Infrastruktur (*Infrastructure Limitations*)

Keterbatasan infrastruktur merupakan hambatan signifikan lainnya yang memengaruhi valorisasi biomassa dan implementasi ekonomi sirkular di sektor kelapa sawit. Pemanfaatan biomassa secara efisien memerlukan sistem transportasi yang andal, jaringan distribusi energi, fasilitas penyimpanan, infrastruktur pengolahan, dan sistem logistik industri yang memadai. Namun, banyak kawasan perkebunan kelapa sawit berada di daerah pedesaan terpencil dengan akses transportasi yang terbatas dan infrastruktur industri yang belum memadai.

Kondisi infrastruktur yang kurang baik meningkatkan biaya pengumpulan dan transportasi biomassa sehingga menurunkan kelayakan ekonomi industri berbasis biomassa. Keterbatasan jaringan listrik dan infrastruktur energi juga dapat menghambat integrasi sistem energi terbarukan seperti pembangkit listrik biogas dan fasilitas pembangkit listrik biomassa. Selain itu, keterbatasan infrastruktur pengolahan limbah menghambat pengelolaan limbah yang efektif dan upaya perlindungan lingkungan di wilayah produksi kelapa sawit.

Pengembangan klaster industri terintegrasi dan ekosistem ekonomi sirkular memerlukan perencanaan infrastruktur yang terkoordinasi antara pemerintah, industri, dan masyarakat lokal. Oleh karena itu, investasi pada transportasi, sistem digital, infrastruktur energi terbarukan, dan fasilitas pengolahan industri menjadi sangat penting untuk mendukung implementasi ekonomi sirkular skala besar dalam agroindustri kelapa sawit.

Secara keseluruhan, hambatan teknologi, finansial, kebijakan, sumber daya manusia, dan infrastruktur tersebut menunjukkan bahwa transisi ekonomi sirkular di sektor kelapa sawit memerlukan pendekatan multidimensional dan kolaboratif. Upaya mengatasi tantangan tersebut sangat bergantung pada inovasi teknologi, komitmen kelembagaan, integrasi kebijakan, kolaborasi antar pemangku kepentingan, serta strategi keberlanjutan jangka panjang yang mampu mendukung transformasi agroindustri yang tangguh dan inklusif.

Peluang Masa Depan (*Future Opportunities*)

Meningkatnya perhatian global terhadap keberlanjutan, aksi iklim, dan transformasi industri rendah karbon telah menciptakan peluang masa depan yang besar bagi implementasi ekonomi sirkular dalam industri kelapa sawit. Peningkatan permintaan internasional terhadap energi terbarukan, produk ramah lingkungan, dan rantai pasok berkelanjutan mendorong negara-negara penghasil kelapa sawit untuk mempercepat valorisasi biomassa dan pengembangan agroindustri sirkular. Inovasi teknologi, transformasi digital, mekanisme perdagangan karbon, dan kerangka investasi hijau diperkirakan akan memainkan peran penting dalam memperkuat daya saing dan kinerja keberlanjutan sektor kelapa sawit di masa mendatang (Rincón-Guio *et al.*, 2025).

Pengembangan Teknologi Hijau (*Green Technology Development*)

Teknologi hijau merupakan salah satu peluang paling menjanjikan untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan biomassa dan mengurangi dampak lingkungan dalam industri kelapa sawit. Perkembangan pesat pada sistem energi terbarukan, teknologi biorefinery, proses konversi limbah, dan metode manufaktur berkelanjutan membuka berbagai kemungkinan baru dalam mengubah biomassa kelapa sawit menjadi produk bernilai tinggi dengan dampak lingkungan yang minimal. Teknologi seperti pirolisis, gasifikasi, karbonisasi hidrotermal (*hydrothermal carbonization*), digesti anaerob tingkat lanjut, dan sistem konversi biokimia memungkinkan produksi biofuel, biokimia, biochar, nanoselulosa, serta material biodegradable dari residu biomassa kelapa sawit (Norrrahim, *et al.*, 2022).

Integrasi teknologi hijau dapat secara signifikan meningkatkan produktivitas industri sekaligus mendukung sistem produksi bersih (*cleaner production*) dan strategi minimisasi limbah. Selain itu, teknologi ramah lingkungan berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca, peningkatan efisiensi energi, dan penguatan kepatuhan terhadap standar keberlanjutan internasional. Oleh karena itu, pengembangan teknologi rendah karbon

secara berkelanjutan diperkirakan akan memperkuat implementasi bioekonomi sirkular dan transformasi agroindustri berkelanjutan di negara-negara penghasil kelapa sawit.

Peluang Pasar Karbon (*Carbon Market Opportunities*)

Perluasan pasar karbon global menciptakan peluang ekonomi yang signifikan bagi praktik ekonomi sirkular dalam sektor kelapa sawit. Aktivitas valorisasi biomassa seperti penangkapan gas metana dari limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS), produksi energi terbarukan, pembuatan biochar, dan sekuestrasi karbon secara langsung berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca dan mitigasi perubahan iklim (Vasileiadou, 2024). Aktivitas tersebut berpotensi menghasilkan kredit karbon dalam mekanisme perdagangan karbon internasional maupun pasar karbon sukarela (*voluntary carbon markets*).

Sebagai contoh, aplikasi biochar menawarkan potensi penyimpanan karbon jangka panjang melalui sekuestrasi karbon stabil di dalam tanah pertanian. Demikian pula, penggantian sistem energi berbasis bahan bakar fosil dengan energi terbarukan berbasis biomassa dapat mengurangi emisi karbon bersih dan mendukung target dekarbonisasi. Seiring dengan semakin ketatnya kebijakan iklim global, industri yang menerapkan sistem ekonomi sirkular rendah karbon berpotensi memperoleh keunggulan kompetitif melalui sertifikasi karbon dan kepatuhan lingkungan.

Meningkatnya permintaan terhadap produk netral karbon (*carbon-neutral products*) dan rantai pasok berkelanjutan juga mendorong industri kelapa sawit untuk mengadopsi strategi pengurangan emisi dan berpartisipasi dalam pasar yang berorientasi pada aspek lingkungan, sosial, dan tata kelola (*Environmental, Social, and Governance/ESG*). Oleh karena itu, partisipasi dalam pasar karbon dapat menjadi salah satu pendorong finansial penting untuk mempercepat transisi ekonomi sirkular di sektor agroindustri.

Transisi Energi Terbarukan (*Renewable Energy Transition*)

Transisi global menuju sistem energi terbarukan membuka peluang besar bagi pemanfaatan biomassa kelapa sawit. Residu biomassa seperti cangkang inti sawit (*palm kernel shells/PKS*), serat mesokarp, tandan kosong kelapa sawit (TKKS), dan LCPKS memiliki potensi besar sebagai bahan baku energi terbarukan untuk pembangkit listrik, produksi biogas, pembuatan biofuel, dan industri pelet biomassa. Upaya internasional yang semakin meningkat untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mencapai target emisi nol bersih (*net-zero emission*) terus memperkuat permintaan global terhadap energi terbarukan berbasis biomassa (International Energy Agency, 2021).

Beberapa negara telah meningkatkan program *co-firing* biomassa dan investasi energi listrik terbarukan, sehingga menciptakan peluang ekspor bagi produk bahan bakar biomassa kelapa sawit. Cangkang inti sawit, khususnya, telah menjadi komoditas biomassa penting bagi pembangkit listrik di kawasan Asia Timur dan Eropa. Selain itu, sistem *waste-to-energy* terintegrasi mampu meningkatkan kemandirian energi di pabrik kelapa sawit sekaligus mengurangi pembuangan limbah dan pencemaran lingkungan.

Transisi energi terbarukan juga mendukung strategi ketahanan energi nasional dan pembangunan ekonomi pedesaan di wilayah penghasil kelapa sawit. Melalui sistem energi biomassa yang terintegrasi, sektor agroindustri dapat melakukan diversifikasi sumber energi, mengurangi biaya operasional, dan berkontribusi terhadap pembangunan infrastruktur energi berkelanjutan.

Integrasi Industri 4.0 (*Industry 4.0 Integration*)

Integrasi teknologi Industri 4.0 menawarkan peluang transformasional untuk meningkatkan implementasi ekonomi sirkular dan pengelolaan biomassa berkelanjutan dalam industri kelapa sawit. Teknologi digital seperti kecerdasan buatan (*artificial intelligence/AI*), *Internet of Things* (IoT), analitik *big data*, *blockchain*, otomatisasi, dan sistem pemantauan cerdas (*smart monitoring systems*) dapat secara signifikan meningkatkan efisiensi operasional, optimalisasi sumber daya, dan kinerja keberlanjutan (Chang & Hung, 2021).

Teknologi pemantauan cerdas memungkinkan pelacakan secara real-time terhadap produksi biomassa, konsumsi energi, efisiensi pengelolaan limbah, dan kinerja lingkungan di seluruh aktivitas perkebunan dan pengolahan. Kecerdasan buatan dan analitik prediktif dapat mengoptimalkan proses konversi biomassa, meningkatkan efisiensi energi, dan mengurangi limbah operasional. Sistem *blockchain* juga berpotensi meningkatkan transparansi rantai pasok, ketertelusuran keberlanjutan (*sustainability traceability*), dan kepatuhan sertifikasi dalam industri kelapa sawit.

Integrasi Industri 4.0 mendukung pengembangan ekosistem agroindustri sirkular cerdas yang mampu memaksimalkan produktivitas sekaligus meminimalkan dampak lingkungan. Pada masa mendatang, transformasi digital diperkirakan akan menjadi komponen penting dalam produksi kelapa sawit berkelanjutan dan pengembangan bioekonomi sirkular.

Pembiayaan Hijau dan Investasi Berkelanjutan (*Green Financing and Sustainable Investment*)

Mekanisme pembiayaan hijau (*green financing*) merupakan peluang besar lainnya dalam mendukung transisi ekonomi sirkular pada agroindustri kelapa sawit. Meningkatnya kesadaran global terhadap perubahan iklim dan pembangunan berkelanjutan mendorong lembaga keuangan, investor, dan organisasi internasional untuk memprioritaskan investasi yang bertanggung jawab terhadap lingkungan (Judijanto, 2026). Obligasi hijau (*green bonds*), pinjaman berbasis keberlanjutan (*sustainability-linked loans*), program pembiayaan iklim (*climate finance*), dan kerangka investasi berbasis ESG (*Environmental, Social, and Governance*) menyediakan peluang pendanaan yang penting bagi proyek energi terbarukan, fasilitas valorisasi biomassa, dan infrastruktur industri berkelanjutan (Raihan & Sarker, 2026).

Perusahaan kelapa sawit yang menerapkan praktik ekonomi sirkular dan model bisnis berorientasi keberlanjutan berpotensi memperoleh akses yang lebih baik terhadap pembiayaan internasional dan pasar investasi yang bertanggung jawab (*responsible investment markets*). Insentif finansial seperti kredit karbon, subsidi energi terbarukan, dan kebijakan pajak hijau juga dapat memperkuat kelayakan ekonomi industri berbasis biomassa.

Selain itu, standar keberlanjutan internasional dan persyaratan pelaporan ESG semakin memengaruhi keputusan investasi dan daya saing pasar global. Industri yang mampu menunjukkan kinerja lingkungan yang baik, efisiensi sumber daya, dan integrasi ekonomi sirkular cenderung lebih menarik bagi investor serta memperoleh dukungan finansial jangka panjang.

Secara keseluruhan, peluang masa depan yang berkaitan dengan teknologi hijau, pasar karbon, transisi energi terbarukan, integrasi Industri 4.0, dan pembiayaan hijau menunjukkan bahwa implementasi ekonomi sirkular dalam sektor kelapa sawit memiliki potensi pengembangan jangka panjang yang sangat kuat. Berbagai peluang tersebut dapat memberikan kontribusi signifikan terhadap transformasi agroindustri berkelanjutan, mitigasi perubahan iklim, pengembangan energi terbarukan, dan pembangunan ekonomi inklusif di negara-negara penghasil kelapa sawit.

Kerangka Ekonomi Sirkular yang Diusulkan untuk Agroindustri Kelapa Sawit

Kerangka ekonomi sirkular yang diusulkan untuk agroindustri kelapa sawit dirancang untuk mengintegrasikan pengelolaan sumber daya biomassa, valorisasi limbah, produksi energi terbarukan, dan pembangunan ekonomi berkelanjutan ke dalam suatu

sistem agroindustri terpadu. Kerangka ini menekankan transformasi residu biomassa kelapa sawit dari limbah bernilai rendah menjadi sumber daya ekonomi bernilai tinggi melalui jalur produksi, pengolahan, daur ulang, dan pemulihan yang saling terhubung. Dengan menerapkan prinsip ekonomi sirkular, kerangka ini bertujuan meningkatkan efisiensi sumber daya, mengurangi dampak lingkungan, memperkuat keberlanjutan industri, dan mendukung pengembangan bioekonomi sirkular jangka panjang.

Kerangka konseptual dimulai dari aktivitas perkebunan kelapa sawit yang menghasilkan tandan buah segar (TBS) sebagai bahan baku utama produksi minyak sawit. Selama proses panen, aktivitas perkebunan juga menghasilkan residu biomassa seperti pelepah kelapa sawit (*oil palm fronds/OPF*) dan batang kelapa sawit (*oil palm trunks/OPT*). Residu perkebunan tersebut dapat dimanfaatkan untuk pengomposan, pakan ternak, bahan bakar biomassa, dan biomaterial berbasis selulosa dibandingkan dibuang sebagai limbah. Integrasi daur ulang biomassa pada tingkat perkebunan berkontribusi terhadap pemulihan unsur hara, peningkatan kesuburan tanah, dan praktik pertanian berkelanjutan (Ignatyeva & Dushin, 2022).

Tahap berikutnya melibatkan proses pengolahan di pabrik kelapa sawit, di mana tandan buah segar diolah menjadi minyak sawit mentah (*crude palm oil/CPO*) dan produk inti sawit. Operasi pengolahan menghasilkan biomassa limbah dalam jumlah besar, termasuk tandan kosong kelapa sawit (TKKS), cangkang inti sawit (*palm kernel shells/PKS*), serat mesokarp (*mesocarp fibers/MF*), dan limbah cair pabrik kelapa sawit (LCPKS). Dalam kerangka ekonomi sirkular yang diusulkan, residu biomassa tersebut diarahkan secara sistematis ke berbagai jalur valorisasi, bukan dibuang melalui sistem pengelolaan limbah konvensional (Jaya *et al.*, 2023).

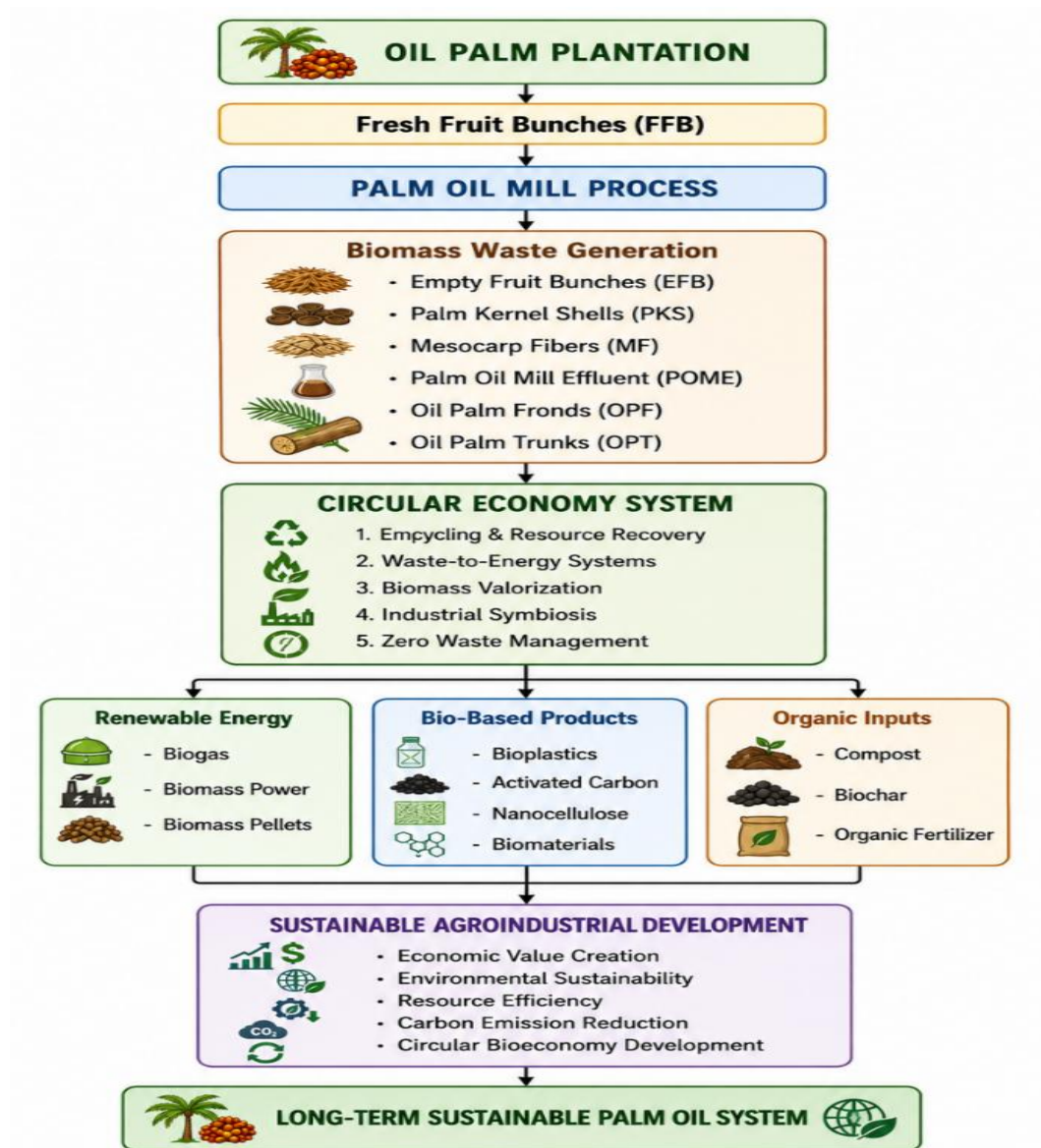
Kerangka ini mengintegrasikan sistem valorisasi limbah yang mampu mengonversi residu biomassa menjadi energi terbarukan, pupuk organik, biomaterial industri, dan produk berbasis hayati (*bio-based products*). Cangkang inti sawit dan serat mesokarp dimanfaatkan untuk pembangkitan uap dan listrik melalui sistem pembakaran biomassa dan gasifikasi. LCPKS diproses melalui digesti anaerob untuk menghasilkan biogas dan biometana, sedangkan TKKS diolah menjadi kompos, biochar, pelet biomassa, dan produk berbasis selulosa. Teknologi biorefinery tingkat lanjut juga mendukung produksi bioplastik, karbon aktif, nanoselulosa, dan produk biokimia dari aliran biomassa lignoselulosa (Awoh *et al.*, 2023).

Komponen penting lainnya dalam kerangka ini adalah integrasi sistem energi terbarukan dan mekanisme simbiosis industri. Energi terbarukan yang dihasilkan dari residu biomassa dapat digunakan kembali secara internal di pabrik kelapa sawit untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan kemandirian energi. Kelebihan energi dan produk turunan biomassa juga dapat disalurkan ke industri lain maupun masyarakat sekitar sehingga menciptakan keterkaitan ekonomi yang lebih luas dan ekosistem industri sirkular. Simbiosis industri memungkinkan produk samping dari suatu proses menjadi input bernilai bagi sektor lain sehingga memaksimalkan sirkulasi sumber daya dan meminimalkan timbulan limbah (Munonye *et al.*, 2025).

Kerangka yang diusulkan juga menekankan integrasi tata kelola keberlanjutan, teknologi digital, dan sistem Industri 4.0 untuk meningkatkan efisiensi operasional dan pemantauan lingkungan. Teknologi cerdas seperti kecerdasan buatan (*artificial intelligence/AI*), *Internet of Things* (IoT), dan analitik *big data* dapat mengoptimalkan pengelolaan biomassa, pemanfaatan energi, pelacakan limbah, dan pemantauan emisi karbon (Ibitoye, S. E., *et al.*, 2026). Teknologi tersebut mendukung pengambilan keputusan secara real-time dan memperkuat kinerja keberlanjutan di seluruh rantai pasok industri kelapa sawit.

Dari sisi ekonomi, kerangka ini menciptakan berbagai peluang nilai tambah melalui diversifikasi pemanfaatan biomassa, komersialisasi energi terbarukan, pembentukan kredit karbon, dan pengembangan produk berkelanjutan. Dari sisi lingkungan, kerangka ini berkontribusi terhadap pengurangan emisi gas rumah kaca, minimisasi limbah, sekuestrasi karbon, dan penerapan sistem produksi bersih. Dari sisi sosial, sistem agroindustri sirkular dapat menciptakan peluang kerja, meningkatkan ketahanan ekonomi pedesaan, dan memperkuat pembangunan masyarakat berkelanjutan di wilayah penghasil kelapa sawit.

Secara keseluruhan, kerangka ekonomi sirkular yang diusulkan menunjukkan bagaimana valorisasi biomassa terintegrasi dan pengelolaan sumber daya secara sirkular dapat mendukung transformasi agroindustri kelapa sawit yang berkelanjutan. Kerangka ini menyediakan landasan strategis untuk mencapai daya saing ekonomi jangka panjang, keberlanjutan lingkungan, dan pengembangan bioekonomi sirkular dalam sektor kelapa sawit.



Gambar 2. Kerangka Ekonomi Sirkular yang Diusulkan untuk Agroindustri Kelapa Sawit Berkelanjutan

Kerangka konseptual di atas menggambarkan hubungan yang saling terintegrasi antara produksi kelapa sawit, pembentukan limbah biomassa, sistem energi terbarukan, jalur valorisasi industri, dan pembangunan ekonomi berkelanjutan dalam model ekonomi sirkular. Kerangka tersebut menunjukkan bagaimana strategi sirkulasi sumber daya dan pemulihan limbah yang terintegrasi mampu mentransformasi industri kelapa sawit menjadi sistem agroindustri yang lebih tangguh, rendah karbon, dan berkelanjutan.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam industri kelapa sawit memberikan peluang yang signifikan untuk meningkatkan efisiensi sumber daya, mengurangi dampak lingkungan, dan mendorong pembangunan agroindustri yang berkelanjutan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah biomassa kelapa sawit, termasuk tandan kosong kelapa sawit (Empty Fruit Bunches/EFB), cangkang inti sawit (Palm Kernel Shells/PKS), serat mesokarp (Mesocarp Fibers/MF), limbah cair pabrik kelapa sawit (Palm Oil Mill Effluent/POME), pelepah kelapa sawit (Oil Palm Fronds/OPF), dan batang kelapa sawit (Oil Palm Trunks/OPT), memiliki potensi ekonomi dan energi terbarukan yang sangat besar apabila dikelola secara tepat melalui sistem sirkular yang terintegrasi. Biomassa tersebut tidak lagi dipandang hanya sebagai limbah industri, tetapi dapat diolah menjadi berbagai produk bernilai tambah seperti bioenergi, biogas, pelet biomassa, biochar, pupuk organik, karbon aktif, bioplastik, nanoselulosa, serta berbagai material industri berbasis hayati lainnya.

Penelitian ini juga menegaskan bahwa valorisasi limbah memegang peranan penting dalam mendukung pengembangan bioekonomi sirkular dan pengelolaan sumber daya berkelanjutan dalam agroindustri kelapa sawit. Melalui praktik daur ulang, sistem waste-to-energy, simbiosis industri, dan strategi produksi tanpa limbah (zero-waste), residu biomassa dapat terus disirkulasikan dalam sistem produksi untuk menghasilkan nilai ekonomi tambahan sekaligus meminimalkan pencemaran lingkungan. Integrasi teknologi valorisasi biomassa tidak hanya berkontribusi terhadap pengurangan limbah, tetapi juga mendukung produksi energi terbarukan, sekuestrasi karbon, daur ulang nutrisi, dan diversifikasi industri. Dengan demikian, valorisasi limbah menjadi mekanisme strategis dalam mentransformasi sistem produksi linear konvensional menjadi model agroindustri yang lebih berkelanjutan dan efisien sumber daya.

Penerapan praktik ekonomi sirkular juga memiliki implikasi yang besar terhadap keberlanjutan lingkungan dan mitigasi perubahan iklim. Sistem sirkular mampu menurunkan emisi gas rumah kaca melalui pengurangan pembuangan limbah terbuka, penangkapan emisi metana dari POME, substitusi bahan bakar fosil dengan energi terbarukan berbasis biomassa, serta penyimpanan karbon jangka panjang melalui aplikasi biochar. Selain itu, pendekatan ekonomi sirkular turut meningkatkan pengelolaan air, mengurangi pencemaran industri, dan mendukung sistem produksi bersih di sepanjang rantai pasok industri kelapa sawit. Manfaat keberlanjutan tersebut sejalan dengan agenda

lingkungan global, termasuk aksi mitigasi perubahan iklim, transisi energi terbarukan, dan pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (Sustainable Development Goals/SDGs).

Dari sisi ekonomi, implementasi ekonomi sirkular menciptakan berbagai peluang untuk meningkatkan daya saing industri dan menghasilkan sumber pendapatan baru melalui komersialisasi biomassa serta inovasi hijau. Pasar energi terbarukan, sistem perdagangan karbon, industri manufaktur berbasis biomassa, dan pengembangan produk berkelanjutan menjadi sektor pertumbuhan potensial bagi negara-negara penghasil kelapa sawit. Selain itu, integrasi teknologi Industri 4.0 seperti kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI), Internet of Things (IoT), otomatisasi, dan sistem pemantauan sumber daya cerdas dapat semakin meningkatkan efisiensi konversi biomassa, keberlanjutan operasional, serta transparansi rantai pasok industri.

Meskipun demikian, transisi menuju sistem agroindustri kelapa sawit yang sepenuhnya sirkular masih menghadapi berbagai tantangan, seperti keterbatasan teknologi, kendala investasi, fragmentasi kebijakan, keterbatasan infrastruktur, dan rendahnya kapasitas sumber daya manusia. Oleh karena itu, keberhasilan implementasi ekonomi sirkular memerlukan kolaborasi yang kuat antara pemerintah, industri, peneliti, lembaga keuangan, dan masyarakat lokal. Kebijakan yang mendukung, mekanisme pembiayaan hijau, inovasi teknologi, serta sistem tata kelola yang berorientasi pada keberlanjutan menjadi faktor penting dalam mempercepat transformasi sirkular skala besar di sektor kelapa sawit.

Secara keseluruhan, penelitian ini menyimpulkan bahwa valorisasi biomassa berbasis ekonomi sirkular merupakan pendekatan yang sangat menjanjikan untuk mendukung pembangunan agroindustri kelapa sawit yang berkelanjutan. Melalui integrasi pemanfaatan sumber daya terbarukan, pemulihan limbah, teknologi rendah karbon, dan strategi bioekonomi sirkular, industri kelapa sawit dapat meningkatkan keberlanjutan jangka panjang, memperkuat ketahanan ekonomi, serta memberikan kontribusi signifikan terhadap tujuan pembangunan berkelanjutan dan perlindungan lingkungan global.

DAFTAR PUSTAKA

- Afshar, M., & Mofatteh, S. (2024). Biochar for a sustainable future: Environmentally friendly production and diverse applications. *Results in Engineering*, 23, 102433. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102433>
- Akuma, S. O., Yazdi, S. K., & Eze, U. (2026). A review of resource recovery from palm oil mill effluent (POME): Recent technological innovations and pathways to circular economy. *Next Sustainability*, 7, 100261. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2026.100261>

- Alqahtani, M. F., & Afy-Shararah, M. (2025). Integrating Circular Economy Practices into Renewable Energy in the Manufacturing Sector: A Systematic Review of the Literature. *Sustainability*, 17(16), 7301. <https://doi.org/10.3390/su17167301>
- Aprilianto, H. C., & Rau, H. (2025). A Multi-Objective Optimization Approach for Generating Energy from Palm Oil Wastes. *Energies*, 18(11), 2947.
- Atofarati, E. O., Osabohien, R., Fitawek, W., Oludoye, O. O., & Enweremadu, C. C. (2026). Balancing bioenergy and food security through circular biomass utilization and fourth industrial revolution (4IR)-driven framework. *Biomass and Bioenergy*, 214, 109497. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2026.109497>
- Awoh, E. T., Kiplagat, J., Kimutai, S. K., & Mecha, A. C. (2023). Current trends in palm oil waste management: A comparative review of Cameroon and Malaysia. *Heliyon*, 9(11).
- Bejarano, P. A. C., Rodriguez-Miranda, J. P., Maldonado-Astudillo, R. I., Maldonado-Astudillo, Y. I., & Salazar, R. (2022). Circular economy indicators for the assessment of waste and by-products from the palm oil sector. *Processes*, 10(5), 903.
- Chang, T.-W., & Hung, C.-Z. (2021). How to Shape the Employees' Organization Sustainable Green Knowledge Sharing: Cross-Level Effect of Green Organizational Identity Effect on Green Management Behavior and Performance of Members. *Sustainability*, 13(2), 626. <https://doi.org/10.3390/su13020626>
- Dolah, R., Karnik, R., & Hamdan, H. (2021). A Comprehensive Review on Biofuels from Oil Palm Empty Bunch (EFB): Current Status, Potential, Barriers and Way Forward. *Sustainability*, 13(18), 10210. <https://doi.org/10.3390/su131810210>
- Donner, M., Gohier, R., & de Vries, H. (2020). A new circular business model typology for creating value from agro-waste. *Science of The Total Environment*, 716, 137065. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137065>
- Feng, Y., & Rosa, L. (2024). Global biomethane and carbon dioxide removal potential through anaerobic digestion of waste biomass. *Environmental Research Letters*, 19(2), 024024.
- Firdaus, H., Hardono, L. W., & Endramanto, V. (2024). Future green energy circular economy for reaching energy transition in Indonesia: Case study biomass & biogas power plant using palm oil plant in PT PLN Riau & Riau Islands. In *2024 International Conference on Technology and Policy in Energy and Electric Power (ICTPEP)* (pp. 503–510). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICT-PEP63827.2024.10733493>
- Gambier, A. (2022). Multiobjective Optimal Control of Wind Turbines: A Survey on Methods and Recommendations for the Implementation. *Energies*, 15(2), 567. <https://doi.org/10.3390/en15020567>

- Hamzah, N., Tokimatsu, K., & Yoshikawa, K. (2019). Solid fuel from oil palm biomass residues and municipal solid waste by hydrothermal treatment for electrical power generation in Malaysia: A review. *Sustainability*, 11(4), 1060.
- Harjanti S, Prabowo H and Rahim RK (2025) Unlocking circular economy and green innovation pathways for sustainable biofuel: a global bibliometric analysis with insights from Indonesia's B40 transition. *Front. Sustain.* 6:1668947. doi: 10.3389/frsus.2025.1668947 <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103050>.
- Ibitoye, S. E., Ball, A. K., Rodriguez, R. V., Olayemi, O. A., Esteva, P., Omoniyi, P. O., ... & Akinlabi, E. T. (2026). Smart waste, smarter world: exploring waste types, trends, and tech-driven valorization through artificial intelligence, internet of things, and blockchain. *Sustainable Development*, 34, 132-153.
- IEA (2021), Net Zero by 2050, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, Licence: CC BY 4.0
- Ignatyeva, M., Yurak, V., & Dushin, A. (2022). Valuating Natural Resources and Ecosystem Services: Systematic Review of Methods in Use. *Sustainability*, 14(3), 1901. <https://doi.org/10.3390/su14031901>
- Jafri, N. H. S., Jimat, D. N., Azmin, N. F. M., Sulaiman, S., & Nor, Y. A. (2021). The potential of biomass waste in Malaysian palm oil industry: A case study of Boustead Plantation Berhad. *In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1192, No. 1, p. 012028). *IOP Publishing*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1192/1/012028>
- Jaya Prasanth Rajakal, J., Hwang, J. Z. H., Hassim, M. H., Andiappan, V., Tan, Q. T., & Ng, D. K. S. (2023). Integration and optimisation of palm oil sector with multiple-industries to achieve circular economy. *Sustainable Production and Consumption*, 40, 318–336. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.06.022>
- Judijanto, Loso. (2026). The Importance of Green Financing to Support Palm Oil Circular Economy Initiatives. *Journal of Banking and Financial Dynamics*. 10. 1-10. 10.55220/2576-6821.v10.842.
- Kan, K. W., Chan, Y. J., Tiong, T. J., & Lim, J. W. (2024). Maximizing biogas yield from palm oil mill effluent (POME) through advanced simulation and optimisation techniques on an industrial scale. *Chemical Engineering Science*, 285, 119644. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.119644>
- Kerdsuwan, Somrat & Laohalidanond, Krongkaew. (2011). Renewable Energy from Palm Oil Empty Fruit Bunch. 10.5772/25888.
- Kurniawan, T. A., Ali, M., Mohyuddin, A., Haider, A., Othman, M. H. D., Anouzla, A., Goh, H. H., Zhang, D., Dai, W., Aziz, F., Khan, M. I., Ali, I., Mahmoud, M., Alkhadher, S. A. A., & Alsultan, G. A. (2025). Innovative transformation of palm oil biomass waste into sustainable biofuel: Technological breakthroughs and future prospects. *Process Safety and Environmental Protection*, 193, 643–664. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.073>

- Lam, S. S., Tsang, Y. F., Quitain, A. T., Hosseini, S. E., & Vo, D. V. N. (2021). Energy and Resource Valorization of Biomass and Waste Toward Sustainable Environment via Thermochemical and Biological Application. *Frontiers in Energy Research*, 8, 632403.
- Lee, Chuan Li & Chin, Kit Ling & Paik San, H'ng & Hafizuddin, Mohd & Khoo, Pui. (2023). Activation temperature and particle size of palm kernel shell vs. the surface properties of activated carbon. *BioResources*, 18. 1714-1730. 10.15376/biores.18.1.1714-1730.
- Manikandan, S. K., Hasnain, M., Zainab, R., Ridouane, F. L., Al Moalla, A., Sheteiwy, M., Abideen, Z., & El-Keblawy, A. (2026). Treating palm oil mill effluent (POME): Opportunities, challenges, and sustainable practices. *Environmental Technology & Innovation*, 42, 104857. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2026.104857>
- McKibbin, B. (2007). Deep economy: The wealth of communities and the durable future. Times Book/Henry Hold and Co.
- Munonye, Williams & Ajonye, George & Akinloye, Obey. (2025). Industrial symbiosis in circular economies through policy and practice for waste to resource innovation. *Discover Sustainability*, 6. 10.1007/s43621-025-02127-3.
- Norrrahim, M. N. F., Farid, M. A. A., Lawal, A. A., Yasim-Anuar, T. A. T., Samsudin, M. H., & Zulkifli, A. A. (2022). Emerging technologies for value-added use of oil palm biomass. *Environmental Science: Advances*, 1(3), 259-275.
- Padzil, F. N. M., Lee, S. H., Ainun, Z. M. A., Lee, C. H., & Abdullah, L. C. (2020). Potential of Oil Palm Empty Fruit Bunch Resources in Nanocellulose Hydrogel Production for Versatile Applications: A Review. *Materials*, 13(5), 1245. <https://doi.org/10.3390/ma13051245>
- Pulingam, T., Lakshmanan, M., Chuah, J.-A., Surendran, A., Zainab-L, I., Foroozandeh, P., Uke, A., Kosugi, A., & Sudesh, K. (2022). Oil palm trunk waste: Environmental impacts and management strategies. *Industrial Crops and Products*, 189, 115827. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2022.115827>
- Putro, I. H. (2021). Emissions of CH₄ and CO₂ from Wastewater of Palm Oil Mills: A Real Contribution to Increase the Greenhouse Gas and Its Potential as Renewable Energy Sources. *Environment and Natural Resources Journal*, 20. 1-12. 10.32526/enrj/20/202100149.
- Raihan, A., & Sarker, T. (2026). Financial mechanisms for advancing environmental sustainability: a comprehensive review. *Green Technology, Resilience, and Sustainability*, 6(1), 4.
- Rendón-Camargo, D., Boom-Cárcamo, E., Buelvas-Gutiérrez, L., & Maya-Gonzalez, A. (2026). Utilization of Oil Palm Residual Biomass Within the Framework of Industrial Symbiosis: A Systematic Review of the Economic Sectors Involved in Its Valorization. *Biomass*, 6(1), 10.
- Rincón-Guio, C., Cantos-Figueroa, M. D. L., Cañarte-Quimis, L. T., Hernández-Ramírez, J., Saray, N., Rincón-Sánchez, A., ... & Chaparro-Hernández, N. (2025). A

Conceptual Model For Sustainable And Resilient Palm Oil Supply Chains: Integrating Digital Innovations, Circular Economy, And Policy Alignment. *Operations and Supply Chain Management: An International Journal*, 19(1), 47-63.

Schreier, M. (2012). Qualitative content analysis in practice. (Vols. 1-0). *SAGE Publications Ltd*, <https://doi.org/10.4135/9781529682571>

Siagian, U. W. R., Wenten, I. G., & Khoiruddin, K. (2024). Circular Economy Approaches in the Palm Oil Industry: Enhancing Profitability through Waste Reduction and Product Diversification. *Journal of Engineering and Technological Sciences*, 56(1), 25–49. <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.1.3>

Suhartini, S., Pratama, A. P. A., Rohma, N. A., Elviliana, E., Setyawan, H. Y., Sunyoto, N. M. S., Suprayogi, Fatriasari, W., Jung, Y. H., Idrus, S., Melville, L., & Ieropoulos, I. A. (2026). Valorization of oil palm mesocarp fiber and acid hydrolyzed residues for sustainable activated carbon production. *South African Journal of Chemical Engineering*, 56, 100866. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2026.100866>

Surendra, K. C., Angelidaki, I., & Khanal, S. K. (2022). Bioconversion of waste-to-resources (BWR-2021): Valorization of industrial and agro-wastes to fuel, feed, fertilizer, and biobased products. *Bioresource technology*, 347, 126739.

Syufina, N., & Baidurah, S. (2022). Bio-valorization of palm oil mill effluent waste for the potential production of renewable biomass fuel pellets. *Malaysian Journal of Microbiology*, 10.21161/mjm.221508.

Usapein, P., Tuntiwiwattanapun, N., Polburee, P., Veerakul, P., Seekao, C., & Chavalparit, O. (2022). Transition pathway palm oil research framework toward a bio-circular-green economy model using SWOT analysis: a case study of Thailand. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 877329.

Vasileiadou, A. (2024). From Organic wastes to Bioenergy, Biofuels, and value-added products for urban sustainability and circular economy: a review. *Urban Science*, 8(3), 121.

Cheah, W. Y., Siti-Dina, R. P., Leng, S. T. K., Er, A. C., & Show, P. L. (2023). Circular bioeconomy in palm oil industry: Current practices and future perspectives. *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103050. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103050>

Wai Yan Cheah, Razman Pahri Siti-Dina, See Too Kay Leng, A.C. Er, Pau Loke Show, Yadav, S. P. S., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, P., Paudel, P., Shrestha, J., & Oli, B. (2023). Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, 100498. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>

Yaro, N. S. A., Sutanto, M. H., Habib, N. Z., Napiah, M., Usman, A., Jagaba, A. H., & Al-Sabaei, A. M. (2022). Application and circular economy prospects of palm oil waste for eco-friendly asphalt pavement industry: A review. *Journal of Road Engineering*, 2(4), 309–331. <https://doi.org/10.1016/j.jreng.2022.10.001>

- Yeo, J. Y. J., How, B. S., Teng, S. Y., Leong, W. D., Ng, W. P. Q., Lim, C. H., Ngan, S. L., Sunarso, J., & Lam, H. L. (2020). Synthesis of Sustainable Circular Economy in Palm Oil Industry Using Graph-Theoretic Method. *Sustainability*, 12(19), 8081. <https://doi.org/10.3390/su12198081>
- Zheng, F., & Cho, H. M. (2025). Study on Biodiesel Production: Feedstock Evolution, Catalyst Selection, and Influencing Factors Analysis. *Energies*, 18(10), 2533. <https://doi.org/10.3390/en18102533>