

**REKOMENDASI IMPLEMENTASI TEKNOLOGI PIROLISIS UNTUK
KONVERSI ENERGI LIMBAH TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT
DI SUMATERA UTARA: STRATEGI PENERAPAN DAN ARAH
PENELITIAN LANJUTAN**

Nur Indah Rivai¹ Rizki Pangidoan Lubis², Zulfan Zulfan³

Universitas Alwashliyah Medan

Universitas Alwashliyah Medan

Universitas Alwashliyah Medan

Email: nurindahrivai11@gmail.com, rizkilubis.mesin@gmail.com,
zulfanmorgan@gmail.com

ABSTRAK

Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) merupakan limbah biomassa utama dari industri kelapa sawit yang memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan. Penelitian ini bertujuan menyusun rekomendasi implementasi teknologi pirolisis untuk konversi energi TKKS di Sumatera Utara serta mengidentifikasi arah penelitian lanjutan yang mendukung penerapan teknologi pada skala industri. Metode yang digunakan adalah kajian literatur pengembangan (development review) dengan menganalisis berbagai penelitian terkait mekanisme pirolisis, desain reaktor, parameter operasi, pemanfaatan produk, serta aspek ekonomi dan lingkungan. Hasil kajian menunjukkan bahwa teknologi pirolisis mampu mengonversi TKKS menjadi bio-oil, syngas, dan bio-char yang memiliki nilai ekonomi dan manfaat lingkungan. Implementasi teknologi direkomendasikan melalui pengembangan reaktor kontinu, optimasi sistem perpindahan panas dan kondensasi, pemanfaatan syngas sebagai sumber energi internal, serta penerapan konsep zero waste processing. Selain itu, diperlukan analisis techno-economic assessment (TEA), life cycle assessment (LCA), dan integrasi teknologi berbasis Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan efisiensi dan kesiapan teknologi menuju skala komersial. Penerapan teknologi pirolisis berpotensi mendukung pengelolaan limbah yang berkelanjutan, meningkatkan nilai tambah biomassa, serta memperkuat transisi energi terbarukan pada industri kelapa sawit di Sumatera Utara.

Kata Kunci: Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS), Pirolisis, Bio-oil, Syngas, Bio-char, Energi Terbarukan, Waste to Energy.

PENDAHULUAN

Indonesia merupakan salah satu negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia dengan perkembangan industri yang terus meningkat. Pertumbuhan industri kelapa sawit memberikan dampak positif terhadap sektor ekonomi, tetapi juga menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah besar. Salah satu limbah utama adalah TKKS yang dihasilkan dari proses pemisahan tandan buah segar pada pabrik kelapa sawit. Setiap pengolahan 1 ton tandan buah segar dapat menghasilkan sekitar 22–23% TKKS sehingga jumlah limbah yang dihasilkan sangat besar (Badan Pusat Statistik Provinsi Sumatera Utara, 2022; Fuadi & Pranoto, 2016).

Limbah TKKS memiliki kandungan organik yang tinggi sehingga sebenarnya memiliki potensi sebagai bahan baku energi. Namun, pemanfaatan TKKS saat ini masih terbatas pada penggunaan sebagai pupuk organik, mulsa perkebunan, bahan bakar boiler, dan material pendukung lainnya. Pemanfaatan tersebut belum sepenuhnya memberikan nilai ekonomi optimal sehingga diperlukan teknologi yang mampu meningkatkan nilai tambah limbah tersebut (Lubis, R. P., & Zulfan, Z. 2026); Haryanti et al., 2014).

Salah satu teknologi yang dapat digunakan untuk mengolah TKKS menjadi energi adalah teknologi pirolisis. Pirolisis merupakan proses penguraian bahan organik melalui pemanasan dalam

kondisi tanpa oksigen atau oksigen terbatas sehingga menghasilkan produk utama berupa bio-oil, gas, dan bio-char. Teknologi ini memiliki keunggulan karena mampu menghasilkan beberapa jenis produk energi dari satu jenis bahan baku biomassa (Mujiarto et al., 2014).

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa parameter operasi seperti temperatur, waktu tinggal, ukuran partikel, dan desain reaktor memiliki pengaruh besar terhadap hasil produk pirolisis. Peningkatan temperatur dapat meningkatkan proses pelepasan senyawa volatil yang berpengaruh terhadap pembentukan bio-oil, sedangkan distribusi gas dan bio-char dipengaruhi oleh kondisi operasi proses (Febriyanti et al., 2019).

Walaupun memiliki potensi besar, penerapan teknologi pirolisis TKKS masih menghadapi berbagai tantangan, terutama pada aspek desain reaktor, efisiensi perpindahan panas, sistem kondensasi, kestabilan produk, serta kelayakan ekonomi. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan penelitian yang lebih aplikatif untuk menjembatani hasil penelitian laboratorium menuju implementasi industri (Nur et al., 2021).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kajian literatur pengembangan (*development review*) dengan menganalisis berbagai penelitian terdahulu mengenai teknologi pirolisis TKKS. Kajian dilakukan terhadap aspek mekanisme proses, desain peralatan, karakteristik produk, parameter operasi, serta peluang penerapan teknologi pada industri kelapa sawit (Nur & Kongnardi, 2021).

Analisis difokuskan pada pendekatan teknik mesin dengan mempertimbangkan aspek desain reaktor, sistem pemanasan, perpindahan panas, proses kondensasi, dan efisiensi energi. Hasil analisis digunakan untuk menyusun rekomendasi implementasi teknologi dan arah penelitian lanjutan yang lebih sesuai dengan kebutuhan industri (Setiawan et al., 2022).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Rekomendasi Implementasi Teknologi Pirolisis TKKS

Implementasi teknologi pirolisis TKKS di Sumatera Utara sebaiknya tidak hanya dipandang sebagai solusi pengelolaan limbah, tetapi juga sebagai bagian dari strategi transisi energi menuju sistem industri yang lebih berkelanjutan. Ketersediaan bahan baku TKKS yang melimpah dari ratusan pabrik kelapa sawit aktif di Sumatera Utara menjadi modal utama dalam pengembangan teknologi berbasis biomassa. Dalam perspektif pengembangan teknologi, penerapan pirolisis perlu diarahkan pada pembentukan ekosistem energi biomassa yang terintegrasi antara sektor perkebunan, industri pengolahan, perguruan tinggi, serta pemerintah daerah sehingga tercipta rantai nilai energi yang berkelanjutan dan bernilai ekonomi tinggi (Lubis & Zulfan, 2026; BPS Sumatera Utara, 2022).

Pengembangan teknologi pirolisis TKKS perlu dilakukan secara bertahap melalui pendekatan Technology Readiness Level (TRL). Pada

tahap awal, teknologi dapat diterapkan dalam bentuk unit percontohan (pilot plant) yang berada di lingkungan pabrik kelapa sawit. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi menyeluruh terhadap karakteristik bahan baku lokal, performa reaktor, stabilitas operasi, serta kualitas produk yang dihasilkan. Keberadaan pilot plant juga dapat menjadi sarana transfer teknologi antara perguruan tinggi dan industri sehingga hasil penelitian laboratorium dapat diimplementasikan secara nyata pada kondisi lapangan yang sesungguhnya (Setiawan et al., 2022; Nur et al., 2021).

Dari perspektif rekayasa teknik mesin, pengembangan reaktor kontinu (continuous reactor) menjadi rekomendasi utama untuk implementasi industri. Sebagian besar penelitian terdahulu masih menggunakan reaktor tipe batch yang sesuai untuk kebutuhan penelitian laboratorium namun memiliki keterbatasan dalam kapasitas produksi dan kontinuitas operasi. Penggunaan reaktor kontinu akan meningkatkan produktivitas, menjaga kestabilan temperatur operasi, mengurangi waktu henti produksi, serta meningkatkan efisiensi termal sistem secara keseluruhan. Selain itu, desain reaktor kontinu memungkinkan integrasi langsung dengan sistem penanganan limbah pada pabrik kelapa sawit sehingga proses konversi energi dapat berlangsung secara berkesinambungan (Sinaga et al., 2019; Setiawan et al., 2022).

Aspek perpindahan panas menjadi faktor penting yang perlu mendapat perhatian dalam implementasi teknologi pirolisis. Efektivitas proses pirolisis sangat dipengaruhi oleh distribusi temperatur di dalam reaktor. Oleh karena itu,

diperlukan pengembangan desain sistem pemanas yang mampu menghasilkan distribusi panas yang merata pada seluruh volume biomassa. Pemanfaatan syngas hasil pirolisis sebagai bahan bakar internal untuk furnace dapat menjadi alternatif guna meningkatkan efisiensi energi sistem sekaligus mengurangi kebutuhan energi eksternal. Konsep pemanfaatan kembali energi internal ini sejalan dengan prinsip circular energy system yang saat ini banyak diterapkan pada industri berbasis biomassa di berbagai negara (Nur & Kongnardi, 2021; Idris & Idris, 2016).

Sistem kondensasi juga memerlukan pengembangan lebih lanjut karena berpengaruh langsung terhadap perolehan bio-oil. Beberapa penelitian menunjukkan adanya selisih hasil yang cukup signifikan antara simulasi dan eksperimen akibat kehilangan bio-oil pada saluran distribusi dan tangki penampungan. Oleh karena itu, desain kondensor multistage atau kondensor bertingkat direkomendasikan untuk meningkatkan efisiensi pemisahan uap hasil pirolisis. Penggunaan material perpipaan yang memiliki konduktivitas termal tinggi serta minim kebocoran juga dapat mengurangi kehilangan produk selama proses berlangsung sehingga meningkatkan rendemen bio-oil yang dihasilkan (Nur et al., 2021; Nur & Kongnardi, 2021).

Dalam konteks pemanfaatan produk,

implementasi teknologi pirolisis sebaiknya menerapkan konsep zero waste processing. Bio-oil yang dihasilkan dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar alternatif untuk boiler industri, syngas digunakan sebagai sumber energi panas internal proses pirolisis, sedangkan bio-char dapat dikembangkan menjadi bahan bakar padat, karbon aktif, maupun amelioran tanah untuk sektor pertanian. Strategi pemanfaatan seluruh produk ini akan meningkatkan efisiensi ekonomi teknologi sekaligus mengurangi limbah residu yang dihasilkan dari proses konversi energi biomassa (Mujiarto et al., 2014; Ristianingsih et al., 2015).

Dari aspek ekonomi, implementasi teknologi pirolisis TKKS perlu didukung oleh analisis techno-economic assessment (TEA) yang komprehensif. Kajian tersebut mencakup biaya investasi peralatan, biaya operasional, kebutuhan energi, biaya perawatan, harga jual produk energi, serta periode pengembalian investasi (payback period). Analisis ekonomi menjadi penting mengingat keberhasilan implementasi teknologi di industri tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis tetapi juga oleh tingkat keuntungan yang dapat diperoleh perusahaan. Dengan ketersediaan bahan baku yang relatif melimpah dan berbiaya rendah, peluang keekonomian teknologi pirolisis di Sumatera Utara diperkirakan cukup menjanjikan apabila didukung oleh sistem pengelolaan yang efisien (Haryanti et al., 2014; Febriyanti et al., 2019).

Selain aspek teknis dan ekonomi, dukungan kebijakan pemerintah juga menjadi faktor strategis dalam mempercepat adopsi teknologi pirolisis. Pemerintah daerah dapat mendorong implementasi teknologi ini

melalui pemberian insentif investasi energi terbarukan, program hilirisasi limbah sawit, serta penguatan kolaborasi antara industri dan perguruan tinggi. Dukungan regulasi akan meningkatkan kepercayaan investor dan mempercepat proses komersialisasi teknologi sehingga pemanfaatan limbah TKKS sebagai sumber energi terbarukan dapat memberikan dampak nyata terhadap pencapaian target pembangunan berkelanjutan dan pengurangan emisi karbon di sektor industri kelapa sawit (Lubis & Zulfan, 2026; Fuadi & Pranoto, 2016).

Sebagai arah penelitian lanjutan, kajian tidak hanya difokuskan pada peningkatan rendemen produk, tetapi juga pada pengembangan sistem pirolisis cerdas berbasis Internet of Things (IoT), pemodelan numerik perpindahan panas, integrasi kecerdasan buatan untuk pengendalian proses, serta analisis daur hidup (Life Cycle Assessment/LCA). Pendekatan tersebut akan menghasilkan teknologi pirolisis yang lebih efisien, adaptif, dan siap diterapkan pada skala industri modern. Dengan demikian, teknologi pirolisis TKKS tidak hanya menjadi solusi pengelolaan limbah, tetapi juga berpotensi menjadi pilar penting dalam pengembangan energi terbarukan berbasis biomassa di Sumatera Utara dan Indonesia secara umum (Setiawan et al., 2022; Nur & Kongnardi, 2021).

Pengembangan Desain Reaktor Pirolisis

Pengembangan desain reaktor pirolisis merupakan aspek yang sangat penting dalam peningkatan kinerja sistem konversi energi berbasis biomassa TKKS. Reaktor berfungsi sebagai tempat berlangsungnya proses dekomposisi termal biomassa yang akan menentukan kualitas, kuantitas, dan distribusi produk hasil pirolisis berupa bio-oil, syngas, dan bio-char. Berdasarkan berbagai penelitian yang telah dikaji, performa reaktor dipengaruhi oleh kemampuan sistem dalam menyediakan distribusi panas yang merata, menjaga kestabilan temperatur operasi, serta mengendalikan waktu tinggal material selama proses berlangsung. Oleh karena itu, pengembangan desain reaktor menjadi faktor utama dalam meningkatkan efisiensi konversi energi dan keberhasilan implementasi teknologi pirolisis pada skala industri (Setiawan et al., 2022; Lubis & Zulfan, 2026).

Sebagian besar penelitian terdahulu masih menggunakan reaktor tipe batch yang dirancang untuk kebutuhan laboratorium dan skala penelitian. Reaktor batch memiliki keunggulan berupa konstruksi yang sederhana, biaya pembuatan relatif rendah, serta kemudahan dalam pengendalian variabel penelitian. Namun demikian, sistem ini memiliki keterbatasan dalam hal kapasitas produksi, kontinuitas operasi, dan efisiensi penggunaan energi. Setiap siklus operasi memerlukan proses pengisian dan pengosongan bahan baku yang menyebabkan waktu henti (downtime) cukup tinggi. Kondisi tersebut menjadi kendala apabila teknologi pirolisis akan diterapkan pada pabrik kelapa sawit yang menghasilkan limbah TKKS dalam jumlah besar setiap

harinya (Sinaga et al., 2019; Nur et al., 2021).

Sebagai solusi pengembangan, reaktor kontinu (continuous pyrolysis reactor) direkomendasikan sebagai arah pengembangan teknologi pirolisis TKKS di masa mendatang. Reaktor kontinu memungkinkan proses pengumpanan biomassa dilakukan secara terus-menerus sehingga kapasitas produksi dapat meningkat secara signifikan. Selain itu, kondisi operasi dapat dipertahankan lebih stabil karena perubahan temperatur yang terjadi selama proses relatif lebih kecil dibandingkan sistem batch. Stabilitas operasi tersebut berpengaruh langsung terhadap kualitas produk yang dihasilkan, khususnya pada produksi bio-oil yang sangat sensitif terhadap fluktuasi temperatur reaksi (Febriyanti et al., 2019; Setiawan et al., 2022).

Dalam perspektif teknik mesin, pengembangan desain reaktor juga harus memperhatikan karakteristik fisik TKKS sebagai bahan baku. TKKS memiliki struktur serat yang kompleks, densitas relatif rendah, serta kandungan lignoselulosa yang tinggi. Karakteristik tersebut menyebabkan perpindahan panas ke bagian inti biomassa berlangsung lebih lambat dibandingkan biomassa berbentuk serbuk atau partikel kecil. Oleh sebab itu, diperlukan desain reaktor yang mampu meningkatkan kontak panas antara media pemanas dengan biomassa, misalnya melalui

penggunaan sistem agitator, screw conveyor, ataupun fluidized bed yang dapat meningkatkan homogenitas temperatur di dalam ruang reaktor (Mujiarto et al., 2014; Haryanti et al., 2014).

Pengembangan sistem fluidized bed reactor menjadi salah satu alternatif yang menjanjikan untuk pengolahan TKKS dalam kapasitas besar. Pada sistem ini, partikel biomassa berada dalam kondisi terfluidisasi oleh aliran gas sehingga perpindahan panas berlangsung lebih cepat dan merata. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa fluidized bed mampu menghasilkan laju pemanasan yang lebih tinggi dibandingkan fixed bed reactor sehingga dapat meningkatkan yield bio-oil secara signifikan. Selain itu, distribusi temperatur yang seragam dapat mengurangi pembentukan produk samping yang tidak diinginkan serta meningkatkan kualitas syngas yang dihasilkan (Sinaga et al., 2019; Nur & Kongnardi, 2021).

Selain pengembangan tipe reaktor, material konstruksi reaktor juga memerlukan perhatian khusus. Proses pirolisis berlangsung pada temperatur tinggi yang dapat mencapai 500–800°C sehingga material reaktor harus memiliki ketahanan panas, ketahanan korosi, dan umur pakai yang panjang. Berdasarkan penelitian sebelumnya, penggunaan stainless steel menjadi pilihan yang umum karena memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi dan lingkungan reaktif selama proses pirolisis berlangsung. Namun untuk implementasi industri jangka panjang, diperlukan penelitian lanjutan terkait penggunaan material tahan panas yang lebih ekonomis tanpa mengurangi keamanan dan performa

operasi reaktor (Isykapurnama et al., 2021; Setiawan et al., 2022).

Aspek lain yang perlu dikembangkan adalah integrasi sistem pemanfaatan energi internal reaktor. Selama proses pirolisis, syngas yang dihasilkan masih memiliki nilai kalor yang cukup tinggi dan berpotensi dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi pemanas reaktor. Konsep ini dikenal sebagai self-sustained pyrolysis system, dimana sebagian energi yang dihasilkan digunakan untuk mempertahankan proses pirolisis sehingga kebutuhan bahan bakar eksternal dapat ditekan. Pendekatan tersebut tidak hanya meningkatkan efisiensi energi tetapi juga dapat menurunkan biaya operasional sistem secara keseluruhan (Nur & Kongnardi, 2021; Idris & Idris, 2016).

Perkembangan teknologi industri 4.0 juga membuka peluang pengembangan reaktor pirolisis berbasis sistem kontrol otomatis. Penggunaan sensor temperatur, sensor tekanan, flow meter, dan sistem monitoring berbasis Internet of Things (IoT) memungkinkan pengendalian proses secara real-time. Data operasi yang diperoleh dapat digunakan untuk mengoptimalkan kondisi proses, mendeteksi gangguan operasi lebih awal, serta meningkatkan keselamatan kerja. Sistem otomatisasi ini menjadi sangat penting apabila teknologi pirolisis akan diintegrasikan dengan sistem produksi pada pabrik kelapa sawit modern yang menuntut efisiensi dan

keandalan tinggi (Setiawan et al., 2022; Lubis & Zulfan, 2026).

Dalam perspektif kajian literatur pengembangan, arah penelitian reaktor pirolisis TKKS tidak hanya berfokus pada peningkatan hasil produk, tetapi juga pada peningkatan efisiensi energi, keandalan operasi, kemudahan perawatan, dan kesiapan implementasi industri. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu mengintegrasikan pendekatan eksperimental, simulasi numerik Computational Fluid Dynamics (CFD), analisis perpindahan panas, serta optimasi desain menggunakan perangkat lunak rekayasa modern. Pendekatan multidisiplin tersebut diharapkan mampu menghasilkan desain reaktor yang lebih efisien, ekonomis, dan sesuai dengan kebutuhan industri kelapa sawit di Sumatera Utara maupun Indonesia secara umum (Nur et al., 2021; Sinaga et al., 2019; Setiawan et al., 2022).

Optimasi Parameter Operasi

Optimasi parameter operasi merupakan tahapan krusial dalam pengembangan teknologi pirolisis TKKS karena secara langsung memengaruhi distribusi produk, efisiensi energi, stabilitas proses, dan kelayakan ekonomi sistem. Dalam kajian pengembangan teknologi pirolisis modern, parameter operasi tidak lagi dipandang sebagai variabel yang berdiri sendiri, melainkan sebagai suatu sistem yang saling berinteraksi dan menentukan performa keseluruhan proses. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa temperatur reaksi, laju pemanasan, ukuran partikel, waktu tinggal uap (vapor residence time), kadar air biomassa, laju aliran gas inert, tekanan operasi, serta konfigurasi reaktor merupakan faktor

utama yang mempengaruhi kualitas dan kuantitas bio-oil, bio-char, dan syngas yang dihasilkan (Guedes et al., 2018; Rasag et al., 2024; Tamagno et al., 2025; Lubis & Zulfan, 2026).

Temperatur operasi merupakan parameter yang paling dominan dalam proses pirolisis biomassa. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa peningkatan temperatur akan mempercepat laju devolatilisasi biomassa sehingga meningkatkan pembentukan produk cair dan gas. Namun, temperatur yang terlalu tinggi dapat memicu reaksi cracking sekunder yang menyebabkan bio-oil terdekomposisi menjadi gas-gas ringan. Kajian sistematis terbaru menunjukkan bahwa temperatur sekitar 450–550°C merupakan rentang optimum untuk memaksimalkan produksi bio-oil pada biomassa lignoselulosa, sedangkan temperatur yang lebih rendah cenderung meningkatkan pembentukan bio-char. Temuan ini sejalan dengan penelitian pada TKKS yang menunjukkan bahwa peningkatan temperatur hingga kisaran 500–600°C menghasilkan konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan temperatur rendah (Ferdianto et al., 2020; Tamagno et al., 2025; Sustainability Review, 2025).

Selain temperatur, laju pemanasan (heating rate) juga memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi produk pirolisis. Laju pemanasan yang tinggi memungkinkan biomassa mengalami dekomposisi secara cepat sehingga senyawa volatil

dapat segera keluar dari matriks biomassa sebelum mengalami reaksi sekunder. Kondisi tersebut sangat menguntungkan untuk meningkatkan rendemen bio-oil. Sebaliknya, laju pemanasan yang rendah cenderung menghasilkan bio-char dalam jumlah yang lebih besar karena proses karbonisasi berlangsung lebih intensif. Oleh karena itu, pada pengembangan reaktor skala industri diperlukan sistem perpindahan panas yang mampu menghasilkan laju pemanasan tinggi dan merata pada seluruh volume biomassa untuk memperoleh efisiensi konversi yang optimal (Bridgwater, 2018; Review on Biomass Pyrolysis with a Focus on Bio-Oil Upgrading Techniques, 2023; Tamagno et al., 2025).

Ukuran partikel TKKS juga menjadi parameter penting yang perlu dioptimalkan sebelum biomassa memasuki reaktor. Partikel yang lebih kecil memiliki luas permukaan spesifik yang lebih besar sehingga mempercepat proses perpindahan panas dan meningkatkan homogenitas temperatur selama proses pirolisis. Sebaliknya, partikel yang terlalu besar menyebabkan terbentuknya gradien temperatur antara bagian luar dan inti biomassa sehingga menghambat proses devolatilisasi. Kajian terbaru menunjukkan bahwa ukuran partikel di bawah 2 mm umumnya memberikan hasil bio-oil yang lebih tinggi dibandingkan ukuran partikel yang lebih besar. Oleh karena itu, proses pencacahan dan preparasi bahan baku perlu menjadi bagian integral dalam sistem pengolahan TKKS berbasis pirolisis (Nasriani & Ghiri, 2026; Sustainability Review, 2025; Tamagno et al., 2025).

Kadar air biomassa merupakan faktor yang sangat menentukan

efisiensi energi proses. Kandungan air yang tinggi menyebabkan sebagian besar energi pemanasan digunakan untuk proses evaporasi sehingga menurunkan efisiensi termal reaktor. Selain itu, kadar air yang tinggi juga dapat meningkatkan kandungan air dalam bio-oil sehingga menurunkan nilai kalor dan stabilitas penyimpanannya. Oleh karena itu, sebagian besar penelitian merekomendasikan kadar air biomassa di bawah 10% sebelum dilakukan proses pirolisis. Pada konteks TKKS yang umumnya memiliki kadar air relatif tinggi setelah keluar dari pabrik kelapa sawit, tahapan pengeringan awal menjadi bagian penting dari strategi optimasi proses secara keseluruhan (Rasaq et al., 2024; Biomass Review, 2025; Elhenawy et al., 2024).

Waktu tinggal uap hasil pirolisis (vapor residence time) merupakan parameter yang sangat memengaruhi kualitas bio-oil. Uap pirolisis yang berada terlalu lama di dalam zona panas akan mengalami cracking sekunder sehingga sebagian besar komponen organik berat akan terurai menjadi gas-gas ringan. Kajian terbaru menunjukkan bahwa waktu tinggal uap kurang dari dua detik sangat ideal untuk meningkatkan produksi bio-oil dan mempertahankan kandungan senyawa organik bernilai tinggi. Sebaliknya, waktu tinggal yang lebih lama akan meningkatkan produksi gas dan menurunkan rendemen cairan. Oleh karena itu, pengembangan

desain reaktor dan sistem ekstraksi uap yang cepat menjadi salah satu fokus utama dalam pengembangan teknologi pirolisis modern (Sustainability Review, 2025; Qureshi et al., 2018; Nasriani & Ghiri, 2026).

Laju aliran gas inert dan tekanan operasi juga perlu diperhatikan dalam optimasi sistem pirolisis. Gas inert seperti nitrogen berfungsi mengeluarkan uap hasil pirolisis dari zona reaksi sehingga mengurangi kemungkinan terjadinya reaksi sekunder. Laju aliran gas yang terlalu rendah dapat menyebabkan akumulasi uap panas di dalam reaktor, sedangkan laju yang terlalu tinggi berpotensi meningkatkan kehilangan panas sistem. Di sisi lain, beberapa penelitian terbaru menunjukkan bahwa pengaturan tekanan operasi dapat mempengaruhi karakteristik syngas dan distribusi produk pirolisis sehingga masih menjadi area penelitian yang menarik untuk dikembangkan pada biomassa TKKS (Rasaq et al., 2024; Tamagno et al., 2025).

Optimasi parameter operasi tidak hanya dilakukan pada proses utama di dalam reaktor, tetapi juga pada sistem kondensasi. Efektivitas kondensor sangat menentukan jumlah bio-oil yang berhasil dipulihkan dari uap hasil pirolisis. Penelitian Nur et al. (2021) menunjukkan adanya perbedaan hasil antara simulasi dan eksperimen akibat kehilangan produk pada sistem perpipaan dan kondensasi. Oleh karena itu, penggunaan kondensor bertingkat (multi-stage condenser), peningkatan luas permukaan perpindahan panas, serta pengendalian temperatur pendinginan menjadi strategi yang direkomendasikan untuk meningkatkan efisiensi pemulihan

bio-oil pada skala industri (Nur et al., 2021; Biomass Review, 2025).

Perkembangan teknologi digital membuka peluang baru dalam optimasi parameter operasi melalui pemanfaatan pemodelan numerik dan kecerdasan buatan. Berbagai penelitian terkini telah menerapkan Computational Fluid Dynamics (CFD), Artificial Neural Network (ANN), Machine Learning, serta Response Surface Methodology (RSM) untuk memprediksi hubungan antara parameter operasi dan hasil produk pirolisis. Pendekatan ini memungkinkan identifikasi kondisi optimum secara lebih cepat dan akurat dibandingkan metode eksperimen konvensional. Integrasi sensor berbasis Internet of Things (IoT) dengan sistem kendali otomatis juga berpotensi meningkatkan stabilitas operasi reaktor pada skala industri sehingga teknologi pirolisis dapat berkembang menuju sistem energi biomassa yang lebih cerdas dan efisien (Elhenawy et al., 2024; Nasriani & Ghiri, 2026; Sustainability Review, 2025).

Berdasarkan kajian literatur pengembangan yang telah dilakukan, optimasi parameter operasi pirolisis TKKS perlu diarahkan pada pendekatan multi-parameter yang mempertimbangkan keterkaitan antara temperatur, laju pemanasan, ukuran partikel, kadar air, waktu tinggal, sistem kondensasi, dan desain reaktor secara simultan. Pendekatan tersebut tidak hanya bertujuan

meningkatkan rendemen bio-oil atau syngas, tetapi juga meningkatkan efisiensi energi, menurunkan biaya operasional, serta mempercepat kesiapan teknologi menuju skala komersial. Dengan demikian, optimasi parameter operasi menjadi fondasi utama dalam pengembangan teknologi pirolisis TKKS yang berkelanjutan dan mampu mendukung transisi energi berbasis biomassa di Indonesia (Rasaq et al., 2024; Tamagno et al., 2025; Nasriani & Ghiri, 2026; Lubis & Zulfan, 2026).

Pemanfaatan Produk Pirolisis

Produk hasil pirolisis biomassa tandan kosong kelapa sawit (TKKS) terdiri atas tiga fraksi utama yaitu bio-oil, syngas, dan bio-char yang masing-masing memiliki karakteristik dan potensi pemanfaatan yang berbeda. Keunggulan teknologi pirolisis dibandingkan metode konversi biomassa lainnya terletak pada kemampuannya menghasilkan lebih dari satu produk bernilai ekonomi dalam satu proses. Melalui pendekatan waste-to-energy, limbah TKKS yang sebelumnya hanya dimanfaatkan sebagai mulsa atau bahan bakar boiler dapat dikonversi menjadi produk energi dan material yang memiliki nilai tambah lebih tinggi. Oleh karena itu, pemanfaatan produk pirolisis secara terpadu menjadi salah satu strategi penting dalam mendukung ekonomi sirkular dan pengembangan energi terbarukan pada industri kelapa sawit (Lubis & Zulfan, 2026; Nur et al., 2021; Rahayu et al., 2021).

Bio-oil merupakan produk cair hasil kondensasi senyawa volatil yang terbentuk selama proses pirolisis. Produk ini tersusun atas campuran senyawa organik seperti fenol, aldehida, keton, asam organik, dan hidrokarbon ringan. Secara umum,

bio-oil memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan bakar cair alternatif pada sistem pembakaran industri, boiler, furnace, maupun pembangkit listrik skala kecil. Pemanfaatan bio-oil sebagai pengganti sebagian bahan bakar fosil menjadi salah satu peluang yang banyak diteliti karena dapat menurunkan emisi karbon sekaligus meningkatkan pemanfaatan biomassa lokal. Namun demikian, karakteristik bio-oil yang masih memiliki kandungan oksigen tinggi menyebabkan stabilitas penyimpanan dan nilai kalor relatif lebih rendah dibandingkan bahan bakar minyak konvensional sehingga diperlukan proses upgrading sebelum digunakan secara luas (Nur et al., 2021; Jamilatun et al., 2024; Pogaku et al., 2016).

Perkembangan penelitian dalam beberapa tahun terakhir menunjukkan bahwa bio-oil tidak hanya dimanfaatkan sebagai bahan bakar langsung, tetapi juga sebagai bahan baku industri kimia hijau (green chemicals). Kandungan senyawa fenolik yang cukup tinggi memungkinkan bio-oil digunakan sebagai bahan dasar resin, perekat, pelarut organik, hingga prekursor bahan kimia bernilai tinggi. Pendekatan biorefinery yang mengintegrasikan produksi energi dan bahan kimia dari biomassa menjadi arah pengembangan yang semakin banyak diterapkan untuk meningkatkan kelayakan ekonomi teknologi pirolisis. Dengan demikian, nilai ekonomi

bio-oil tidak hanya berasal dari sektor energi, tetapi juga dari sektor manufaktur dan industri kimia berkelanjutan (Abnisa et al., 2021; Sondakh, 2020; Pogaku et al., 2016).

Selain bio-oil, produk gas hasil pirolisis atau syngas memiliki peranan penting dalam meningkatkan efisiensi energi sistem. Syngas umumnya terdiri atas karbon monoksida (CO), hidrogen (H₂), metana (CH₄), karbon dioksida (CO₂), dan sejumlah kecil hidrokarbon ringan lainnya. Kandungan gas-gas mudah terbakar tersebut menjadikan syngas berpotensi digunakan sebagai bahan bakar internal untuk menyediakan energi panas pada reaktor pirolisis sehingga mengurangi kebutuhan bahan bakar eksternal. Konsep pemanfaatan kembali syngas sebagai sumber energi proses mampu meningkatkan efisiensi termal sistem secara keseluruhan dan mendukung operasional pirolisis yang lebih mandiri energi (Nur & Kongnardi, 2021; Sinaga et al., 2019).

Lebih lanjut, kandungan hidrogen dalam syngas membuka peluang pemanfaatan sebagai bahan baku produksi energi bersih. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa syngas hasil pirolisis TKKS dapat diintegrasikan dengan proses steam reforming atau water-gas shift untuk meningkatkan fraksi hidrogen yang dihasilkan. Hidrogen yang diperoleh selanjutnya berpotensi dimanfaatkan pada fuel cell, pembangkit listrik berbasis hidrogen, maupun industri kimia yang memerlukan gas hidrogen sebagai bahan baku. Potensi tersebut menjadikan teknologi pirolisis tidak hanya relevan dalam pengelolaan limbah biomassa, tetapi juga dalam mendukung transisi menuju ekonomi hidrogen di masa mendatang (Sinaga et al., 2019; Nur & Kongnardi, 2021).

Produk padat berupa bio-char juga memiliki prospek pemanfaatan yang sangat luas. Bio-char merupakan material kaya karbon yang terbentuk akibat dekomposisi termal biomassa pada kondisi minim oksigen. Karakteristik bio-char yang memiliki luas permukaan tinggi, struktur pori yang berkembang, dan kestabilan karbon yang baik menjadikannya dapat digunakan sebagai bahan bakar padat, bahan baku karbon aktif, adsorben pencemar, serta material pendukung pada berbagai aplikasi lingkungan. Dibandingkan biomassa mentah, bio-char memiliki nilai kalor yang lebih tinggi sehingga lebih mudah disimpan dan didistribusikan sebagai sumber energi padat (Ganing et al., 2025; Ristianingsih et al., 2015).

Dalam sektor pertanian, bio-char semakin banyak digunakan sebagai pembenah tanah (soil amendment) karena mampu meningkatkan kapasitas tukar kation, retensi air, aktivitas mikroorganisme tanah, dan efisiensi pemupukan. Penggunaan bio-char pada lahan pertanian juga berkontribusi terhadap peningkatan produktivitas tanaman sekaligus memperbaiki kualitas tanah yang terdegradasi. Selain itu, kemampuan bio-char dalam menyimpan karbon dalam jangka panjang menjadikannya salah satu teknologi potensial untuk mitigasi perubahan iklim melalui mekanisme carbon sequestration. Oleh karena itu, pemanfaatan bio-char dari

TKKS tidak hanya memberikan manfaat ekonomi tetapi juga manfaat ekologis yang signifikan (Rex et al., 2023; Ganing et al., 2025).

Perkembangan penelitian terbaru menunjukkan bahwa bio-char hasil pirolisis biomassa dapat dimodifikasi menjadi karbon aktif dengan kemampuan adsorpsi yang tinggi terhadap logam berat, zat warna tekstil, maupun senyawa organik berbahaya dalam air limbah. Aktivasi fisik maupun kimia terhadap bio-char mampu meningkatkan luas permukaan dan jumlah situs aktif sehingga memperluas pemanfaatannya pada sistem pengolahan air dan pengendalian pencemaran lingkungan. Aplikasi ini menjadi sangat relevan bagi industri kelapa sawit yang juga menghasilkan limbah cair dalam jumlah besar sehingga konsep pemanfaatan bio-char dapat diintegrasikan dengan sistem pengolahan limbah industri secara menyeluruh (Rex et al., 2023; Isykapurnama et al., 2021).

Apabila ketiga produk pirolisis dimanfaatkan secara simultan, maka nilai ekonomi keseluruhan sistem akan meningkat secara signifikan. Bio-oil dapat digunakan sebagai bahan bakar atau bahan baku kimia, syngas dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi internal proses, sedangkan bio-char dapat dipasarkan sebagai bahan bakar padat, adsorben, maupun pembenah tanah. Pendekatan multiproduk tersebut sejalan dengan konsep biorefinery modern yang berorientasi pada pemanfaatan biomassa secara menyeluruh tanpa menghasilkan limbah sisa yang signifikan. Dengan demikian, implementasi teknologi pirolisis TKKS pada industri kelapa sawit berpotensi menciptakan sistem produksi yang lebih efisien,

berkelanjutan, dan bernilai ekonomi tinggi (Mujiarto et al., 2014; Nur et al., 2021; Abnisa et al., 2021)

Implikasi Ekonomi dan Lingkungan

Implementasi teknologi pirolisis pada pengolahan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) memberikan implikasi ekonomi yang signifikan karena mampu mengubah limbah biomassa yang sebelumnya bernilai rendah menjadi produk bernilai tambah tinggi berupa bio-oil, syngas, dan bio-char. Dalam pendekatan ekonomi sirkular, limbah tidak lagi dipandang sebagai residu yang harus dibuang, melainkan sebagai sumber daya yang dapat dimanfaatkan kembali untuk menghasilkan energi dan material baru. Transformasi tersebut berpotensi meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya pada industri kelapa sawit sekaligus membuka peluang diversifikasi produk yang dapat meningkatkan pendapatan perusahaan. Melalui konsep waste-to-energy, biaya penanganan limbah dapat ditekan dan nilai ekonomi biomassa dapat dimaksimalkan sehingga memberikan keuntungan baik bagi industri maupun masyarakat sekitar (Lubis & Zulfan, 2026; Ismail et al., 2023; Abnisa et al., 2021).

Dari perspektif ekonomi industri, pemanfaatan TKKS melalui teknologi pirolisis dapat mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang selama ini digunakan dalam proses produksi. Produk syngas

yang dihasilkan dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar internal untuk memenuhi kebutuhan panas reaktor maupun proses pengolahan lainnya sehingga mampu menekan konsumsi energi eksternal. Selain itu, bio-oil yang dihasilkan dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif pada boiler industri atau dijual sebagai produk energi terbarukan. Pengurangan biaya energi operasional menjadi salah satu faktor penting yang dapat meningkatkan daya saing industri kelapa sawit, terutama di tengah meningkatnya harga energi global dan tuntutan penerapan industri rendah karbon (Nur & Kongnardi, 2021; Febriyanti et al., 2019; International Energy Agency, 2024).

Pengembangan unit pirolisis juga berpotensi menciptakan peluang ekonomi baru melalui terbentuknya rantai nilai biomassa berbasis energi terbarukan. Aktivitas pengumpulan, pengolahan, transportasi biomassa, pengoperasian fasilitas pirolisis, hingga distribusi produk energi dapat membuka lapangan pekerjaan baru di kawasan perkebunan dan pabrik kelapa sawit. Efek pengganda ekonomi (multiplier effect) tersebut menjadi penting khususnya bagi wilayah penghasil kelapa sawit seperti Sumatera Utara yang memiliki ketersediaan bahan baku biomassa dalam jumlah besar. Dengan demikian, implementasi teknologi pirolisis tidak hanya berdampak pada peningkatan efisiensi industri tetapi juga berkontribusi terhadap pembangunan ekonomi daerah dan peningkatan kesejahteraan masyarakat lokal (IRENA, 2023; Ganing et al., 2025; Haryanti et al., 2014).

Selain manfaat ekonomi langsung, pemanfaatan produk

pirolisis juga berpotensi meningkatkan nilai komersial limbah biomassa. Bio-char yang dihasilkan dapat dipasarkan sebagai bahan bakar padat, bahan baku karbon aktif, adsorben limbah industri, maupun pembenah tanah pada sektor pertanian. Diversifikasi produk ini memungkinkan perusahaan memperoleh sumber pendapatan tambahan yang sebelumnya tidak tersedia pada sistem pengelolaan limbah konvensional. Dalam beberapa studi, bio-char bahkan memiliki nilai jual yang lebih stabil dibandingkan produk energi karena tingginya permintaan pada sektor pertanian berkelanjutan dan pengolahan lingkungan (Rex et al., 2023; Ganing et al., 2025; Kurniawan et al., 2022).

Walaupun demikian, penerapan teknologi pirolisis juga memerlukan investasi awal yang relatif besar, terutama untuk pembangunan reaktor, sistem kondensasi, peralatan pengendalian proses, serta infrastruktur pendukung lainnya. Oleh karena itu, analisis kelayakan ekonomi menjadi aspek yang sangat penting sebelum implementasi dilakukan pada skala industri. Faktor-faktor seperti biaya investasi, biaya operasi dan perawatan, harga produk hasil pirolisis, ketersediaan bahan baku, serta skala produksi harus dipertimbangkan secara komprehensif agar teknologi yang dikembangkan dapat memberikan keuntungan ekonomi yang berkelanjutan. Kajian techno-economic

assessment (TEA) menunjukkan bahwa keberhasilan komersialisasi teknologi pirolisis sangat dipengaruhi oleh integrasi sistem energi dan optimalisasi pemanfaatan seluruh produk yang dihasilkan (Bridgwater, 2022; Abnisa et al., 2021; Nur et al., 2021).

Dari aspek lingkungan, teknologi pirolisis menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan dibandingkan metode pengelolaan limbah konvensional seperti pembakaran terbuka atau penumpukan biomassa di lahan. Pembakaran terbuka TKKS diketahui dapat menghasilkan emisi partikulat, karbon monoksida, nitrogen oksida, dan gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap pencemaran udara. Sebaliknya, proses pirolisis berlangsung dalam kondisi minim oksigen sehingga pembentukan emisi dapat dikendalikan dengan lebih baik. Pemanfaatan limbah sebagai sumber energi juga mendukung upaya pengurangan volume limbah yang dibuang ke lingkungan serta mengurangi potensi pencemaran tanah dan air akibat proses dekomposisi biomassa yang tidak terkendali (Isykapurnama et al., 2021; UNEP, 2024; Hossain et al., 2020).

Teknologi pirolisis juga memiliki kontribusi penting dalam mitigasi perubahan iklim melalui pengurangan emisi gas rumah kaca. Penggunaan bio-oil dan syngas sebagai substitusi bahan bakar fosil dapat menurunkan emisi karbon bersih karena karbon yang dilepaskan berasal dari biomassa yang sebelumnya menyerap karbon dioksida selama proses pertumbuhan tanaman. Dengan demikian, siklus karbon yang terjadi lebih bersifat netral dibandingkan penggunaan energi berbasis fosil. Sejumlah penelitian

menunjukkan bahwa integrasi teknologi pirolisis dalam sistem pengelolaan biomassa dapat membantu pencapaian target dekarbonisasi sektor industri dan mendukung agenda transisi energi berkelanjutan pada tingkat nasional maupun global (IRENA, 2023; IEA, 2024; Abnisa et al., 2021).

Manfaat lingkungan lainnya berasal dari pemanfaatan bio-char sebagai media penyimpanan karbon jangka panjang (carbon sequestration). Karbon yang tersimpan dalam struktur bio-char relatif stabil terhadap proses dekomposisi sehingga dapat bertahan di dalam tanah selama puluhan hingga ratusan tahun. Aplikasi bio-char pada lahan pertanian tidak hanya meningkatkan kualitas tanah dan produktivitas tanaman, tetapi juga berfungsi sebagai strategi mitigasi perubahan iklim melalui pengurangan konsentrasi karbon di atmosfer. Oleh karena itu, bio-char semakin mendapat perhatian sebagai salah satu pendekatan berbasis alam (nature-based solutions) untuk mendukung pembangunan rendah karbon (Rex et al., 2023; Lehmann et al., 2021; Ganing et al., 2025).

Selain itu, penggunaan bio-char sebagai adsorben juga memberikan manfaat dalam pengelolaan limbah cair industri. Struktur pori dan luas permukaan yang tinggi memungkinkan bio-char menyerap berbagai jenis polutan seperti logam berat, senyawa organik, maupun zat warna industri. Integrasi pemanfaatan

bio-char pada sistem pengolahan limbah pabrik kelapa sawit berpotensi menciptakan pendekatan pengelolaan lingkungan yang lebih terpadu karena produk hasil pirolisis dapat dimanfaatkan kembali untuk mengatasi permasalahan pencemaran yang dihasilkan oleh industri itu sendiri. Konsep tersebut menunjukkan bahwa teknologi pirolisis memiliki manfaat lingkungan yang melampaui fungsi utamanya sebagai teknologi konversi energi (Rex et al., 2023; Kurniawan et al., 2022; Hossain et al., 2020).

Secara keseluruhan, hasil kajian literatur menunjukkan bahwa implementasi teknologi pirolisis TKKS memberikan dampak positif yang saling berkaitan antara aspek ekonomi dan lingkungan. Peningkatan nilai tambah biomassa, pengurangan biaya energi, penciptaan peluang usaha baru, penurunan volume limbah, pengurangan emisi gas rumah kaca, serta pemanfaatan bio-char untuk perbaikan lingkungan menjadi indikator bahwa teknologi ini memiliki prospek yang kuat untuk dikembangkan pada industri kelapa sawit di Sumatera Utara. Namun demikian, keberhasilan implementasi pada skala industri tetap memerlukan dukungan kebijakan, investasi teknologi, penguatan riset terapan, serta analisis kelayakan ekonomi dan lingkungan yang komprehensif agar manfaat yang dihasilkan dapat berlangsung secara berkelanjutan (Lubis & Zulfan, 2026; IRENA, 2023; UNEP, 2024).

KESIMPULAN

Teknologi pirolisis merupakan salah satu metode konversi termokimia yang berpotensi tinggi untuk mengolah limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menjadi

produk bernilai tambah berupa bio-oil, syngas, dan bio-char. Ketersediaan TKKS yang melimpah di Sumatera Utara menjadikan teknologi ini sebagai alternatif strategis dalam mendukung pengelolaan limbah biomassa sekaligus pengembangan energi terbarukan.

Hasil kajian menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi teknologi pirolisis sangat dipengaruhi oleh desain reaktor, optimasi parameter operasi, sistem perpindahan panas, serta efektivitas proses kondensasi. Pengembangan reaktor kontinu, pemanfaatan syngas sebagai sumber energi internal, dan penerapan sistem kendali berbasis teknologi digital menjadi rekomendasi utama untuk meningkatkan efisiensi dan kesiapan teknologi pada skala industri.

Selain memberikan manfaat ekonomi melalui peningkatan nilai tambah limbah dan diversifikasi produk energi, teknologi pirolisis juga memberikan manfaat lingkungan berupa pengurangan limbah biomassa, penurunan emisi gas rumah kaca, serta peluang pemanfaatan bio-char untuk perbaikan kualitas tanah dan penyimpanan karbon. Oleh karena itu, pengembangan teknologi pirolisis TKKS perlu didukung oleh penelitian lanjutan yang mencakup analisis techno-economic assessment (TEA), life cycle assessment (LCA), simulasi numerik, serta integrasi Internet of Things (IoT) dan kecerdasan buatan untuk menghasilkan sistem yang lebih

efisien, berkelanjutan, dan layak diterapkan pada industri kelapa sawit di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- Abnisa, F., Daud, W.M.A.W., Husin, W.N.W., & Sahu, J.N. (2021). *Bio-oil production from pyrolysis of oil palm biomass and the upgrading technologies: A review*. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100195. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100195>.
- Badan Pusat Statistik Provinsi Sumatera Utara. (2022). *Direktori perusahaan perkebunan kelapa sawit Provinsi Sumatera Utara*. Badan Pusat Statistik Provinsi Sumatera Utara.
- Basu, P. (2018). *Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory* (3rd ed.). Academic Press.
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68–94.
- Bridgwater, A. V. (2018). Challenges and Opportunities in Fast Pyrolysis of Biomass. *Johnson Matthey Technology Review*, 62(1), 118–130.
- Bridgwater, A. V. (2018). Challenges and opportunities in fast pyrolysis of biomass. *Thermal Science*, 22(1), 3–15.
- Bridgwater, A.V. (2022). *Challenges and opportunities in fast pyrolysis of biomass: Techno-economic perspectives*. *Biomass and Bioenergy*, 161, 106455.
- Czernik, S., & Bridgwater, A. V. (2004). Overview of applications of biomass fast

- pyrolysis oil. *Energy & Fuels*, 18(2), 590–598.
- Demirbas, A. (2009). *Pyrolysis Mechanisms of Biomass Materials*. Energy Sources.
- Elhenawy, Y., et al. (2024). Experimental Analysis and Numerical Simulation of Biomass Pyrolysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 149, 10369–10383.
- Febriyanti, F., Fadila, N., Sanjaya, A. S., Bindar, Y., & Irawan, A. (2019). Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit menjadi bio-char, bio-oil dan gas dengan metode pirolisis. *Jurnal Chemurgy*, 3(2), 12–17. <https://doi.org/10.30872/cmg.v3i2.3578>
- Ferdiyanto, A., Munfaridi, F. H., & Hidayat, A. (2020). Pengaruh temperatur proses pirolisis tandan kosong kelapa sawit (TKKS) terhadap karakteristik bio-oil. *Khazanah: Jurnal Mahasiswa*, 8(1), 12–20. <https://doi.org/10.20885/3812016>
- Fuadi, A. M., & Pranoto, H. (2016). Pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan baku pembuatan glukosa. *Chemica: Jurnal Teknik Kimia*, 3(1), 1–5.
- Ganing, M., Sariwahyuni, S., Kartika, A. A., Yusuf, A. A. I. S., Amin, I., & Masnawati. (2025). Pirolisis tandan kosong kelapa sawit untuk meningkatkan kualitas biochar. *Jurnal Teknologi Kimia Mineral*, 4(2), 1–8. <https://doi.org/10.61844/jtkm.v4i2.1228>
- Guedes, R. E., Luna, A. S., & Torres, A. R. (2018). Operating Parameters for Bio-Oil Production in Biomass Pyrolysis: A Review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 129, 134–149.
- Haryanti, A., Norsamsi, N., Sholiha, P. S. F., & Putri, N. P. (2014). Studi pemanfaatan limbah padat kelapa sawit. *Jurnal Konversi*, 3(2), 57–66. <https://doi.org/10.24853/konversi.3.2.57-66>
- Hossain, N., Zaini, J.H., & Mahlia, T.M.I. (2020). A review of biochar utilization for environmental applications. *Environmental Technology & Innovation*, 19, 100962.
- International Energy Agency (IEA). (2024). *Net Zero Roadmap: 2024 Update*. Paris: International Energy Agency.
- International Renewable Energy Agency (IRENA). (2023). *Renewable Energy and Bioenergy Outlook 2023*. Abu Dhabi: IRENA.
- Isykapurnama, S., Sarastri, D., & Mahardika, H. (2021). Potensi teknologi pengolahan berbasis pirolisis dalam penanganan limbah biomassa. *Generics: Journal of Research in Pharmacy*, 1(1), 34–43.
- Jamilatun, S., Hakika, D.C., Sarah, D., & Puspitasari, A. (2024). *Generation and Characterization of Bio-Oil Obtained From The Slow Pyrolysis of Oil Palm Empty*

- Fruit Bunches at Various Temperatures.* Elkawnie, 10(1).
- Kurniawan, T.A., Avtar, R., Othman, M.H.D., et al. (2022). *Biochar for environmental remediation and sustainable waste management.* Science of the Total Environment, 817, 152865.
- Lehmann, J., Cowie, A., Masiello, C.A., et al. (2021). *Biochar in climate change mitigation.* Nature Geoscience, 14(12), 883–892.
- Lubis, R. P., & Zulfan, Z. (2026). *Potensi konversi energi pirolisis dalam pengolahan limbah tandan kosong kelapa sawit di Sumatera Utara.* Jurnal Ilmiah Kajian Multidisipliner, 10(1), 45–54.
<https://doi.org/10.2110-2151>
- Mohan, D., Pittman, C. U., & Steele, P. H. (2006). Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: A critical review. *Energy & Fuels*, 20(3), 848–889.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). Wiley.
- Mujiarto, S., Ristianingsih, Y., Amrullah, A., & Khalid, A. (2014). Studi proses pirolisis tandan kosong sawit menjadi bio oil sebagai energi alternatif. *PolhaSains*, 2(2), 21–25.
- Nasriani, H. R., & Ghiri, M. N. (2026). Biomass Pyrolysis: Recent Advances in Characterisation and Energy Utilisation. *Processes*, 14(8), 1321.
- Nur, T. B., & Kongnardi, J. (2021). Simulation analysis of the pyrolysis process for the production of syngas from oil palm empty fruit bunch and fiber. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 927, 012033.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/927/1/012033>
- Nur, T. B., Yansen, V., & Wibowo, R. P. (2021). Simulation analysis of bio-oil from slow pyrolysis using palm empty fruit bunch. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1122, 012113.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/1122/1/012113>
- Pogaku, R., Hardinge, B.S., Vuthaluru, H., & Amir, H.A. (2016). *Production of Bio-Oil from Oil Palm Empty Fruit Bunch by Catalytic Fast Pyrolysis: A Review.* Biofuels, 7(6), 647–660.
<https://doi.org/10.1080/17597269.2016.1187539>
- Qureshi, K. M., et al. (2018). A Technical Review on Semi-Continuous and Continuous Pyrolysis Process of Biomass to Bio-Oil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 131, 52–75.
- Rasaq, W. A., Okpala, C. O. R., Igwegbe, C. A., & Białowiec, A. (2024). Navigating Pyrolysis Implementation—A Tutorial Review on Consideration Factors and Thermochemical Operating Methods for Biomass Conversion. *Materials*, 17(3), 725.

- Rex, P., Ismail, K.R.M., Meenakshisundaram, N., et al. (2023). *Agricultural Biomass Waste to Biochar: A Review on Biochar Applications Using Machine Learning Approach and Circular Economy*. ChemEngineering, 7(3), 50.
<https://doi.org/10.3390/chemengineering7030050>.
- Ristianingsih, Y., Ulfa, A., & Syafitri, R. K. (2015). Pengaruh suhu dan konsentrasi perekat terhadap karakteristik briket bioarang berbahan baku tandan kosong kelapa sawit dengan proses pirolisis. *Jurnal Konversi*, 4(2), 45–51.
- Setiawan, A., Zakarya, M. A., & Nur, T. B. (2022). Experimental investigation and simulation of slow pyrolysis process of Arabica coffee agroindustry residues in a pilot-scale reactor. *Journal of Ecological Engineering*, 23(8), 260–269.
<https://doi.org/10.12911/2998993/150693>
- Sinaga, F. T. H., Napitupulu, F. H., & Nur, T. B. (2019). Hydrogen gas production simulation utilizing empty fruit bunch of oil palm pyrolysis unit by steam methane reforming process. *Journal of Physics: Conference Series*, 1566, 012125.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1566/1/012125>
- Sondakh, R. C. (2020). Analisis sistem optimasi bio-oil dari tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Teknologi dan Industri Pertanian Indonesia*, 12(2), 65–72.
- Sunarno, S. (2014). Pirolisis katalitik tandan kosong sawit menjadi bio-oil dengan katalis HZSM-5. *Eksergi*, 11(1), 7–10.
<https://doi.org/10.31315/e.v11i1.325>
- Sustainability Review. (2025). Biomass Pyrolysis Pathways for Renewable Energy and Sustainable Resource Recovery. *Sustainability*, 17(17), 7806.
- Tamagno, I. J., et al. (2025). Impact of Operational Parameters on the Yield of Biochar, Bio-Oil, and Pyrolytic Gas in Lignocellulosic Biomass Pyrolysis: A Systematic Review. *Bioresource Technology Reports*, 30, 102155.
- United Nations Environment Programme (UNEP). (2024). *Global Waste Management Outlook 2024*. Nairobi: UNEP.