

DARI LIMBAH HETEROGEN MENUJU BIOREFINERY TERINTEGRASI: KONVERGENSI JALUR TERMOKIMIA–BIOLOGIS, PRODUK BERNILAI TAMBAH, DAN KELAYAKAN BERKELANJUTAN

Hariadi*¹⁾ Romi Djafar²⁾

¹⁾Program Studi Mesin dan Peralatan Pertanian, Politeknik Gorontalo

²⁾Teknologi Rekayasa Energi Terbarukan Fakultas teknik Universitas Negeri Gorontalo

*e-mail: hariadi.poltekgo@gmail.com

Asal Negara: Indonesia

ABSTRAK

Transisi dari pengelolaan limbah menuju biorefinery menuntut kerangka yang mampu menghubungkan keragaman bahan baku, pilihan teknologi, mutu produk, dan kelayakan sistem. Tinjauan ini mensintesis 51 publikasi tahun 2022–2026 mengenai biomassa lignoselulosa, alga, lumpur, residu perikanan, limbah pangan, dan campuran biomassa–plastik. Analisis difokuskan pada pencernaan anaerobik dan fermentasi, pirolisis, torrefaksi, gasifikasi, pencairan hidrotermal, koproses, produksi hidrogen, biochar, serta pemulihan produk bernilai tambah. Sintesis menunjukkan bahwa tidak ada jalur konversi tunggal yang unggul untuk semua bahan baku. Kadar air tinggi mendukung proses hidrotermal dan biologis, sedangkan biomassa kering lebih sesuai untuk pirolisis, gasifikasi, dan densifikasi. Pretreatment, katalisis, gelombang mikro, ko-konversi, serta penggabungan aliran produk dapat memperbaiki hasil dan mutu, tetapi manfaat tersebut sering dibayar dengan kebutuhan energi, bahan kimia, hidrogen, atau pemurnian yang lebih besar. Bukti terbaru menggeser ukuran keberhasilan dari rendemen bahan bakar semata menuju portofolio produk, sirkularitas nutrisi, penurunan toksisitas, efisiensi eksergi, jejak karbon, dan ketahanan ekonomi. Sistem paling menjanjikan menggunakan desain bertingkat: fraksinasi atau ekstraksi produk bernilai tinggi di bagian hulu, konversi energi pada residu, pemanfaatan char atau digestate, dan daur ulang panas, air, serta nutrisi. Tinjauan ini mengusulkan matriks keputusan berbasis karakter bahan baku dan hierarki nilai untuk menyelaraskan pemilihan teknologi dengan indikator teknis, ekonomi, lingkungan, dan kesiapan skala. Agenda riset prioritas meliputi standarisasi data, uji jangka panjang, analisis ketidakpastian, integrasi penilaian daur hidup–teknologi ekonomi, dan demonstrasi sistem modular pada konteks regional. Kerangka tersebut membantu peneliti dan pengembang menghindari optimasi parsial, membandingkan opsi secara transparan, serta memilih konfigurasi yang sesuai dengan sumber daya dan pasar setempat secara lebih konsisten.

Kata kunci: Biorefinery Terintegrasi; Konversi Biomassa; Bioenergi; Biochar; Hidrogen Hijau; Ekonomi Sirkular; Penilaian Daur Hidup

ABSTRACT

The transition from waste management to biorefineries requires a framework capable of linking feedstock diversity, technology selection, product quality, and system feasibility. This review synthesizes 51 publications from 2022–2026 covering lignocellulosic biomass, algae, sludge, fishery residues, food waste, and biomass–plastic mixtures. The analysis focuses on anaerobic digestion and fermentation, pyrolysis, torrefaction, gasification, hydrothermal liquefaction, co-processing, hydrogen production, biochar, and the recovery of value-added products. The synthesis indicates that no single conversion pathway is superior for all feedstocks. High moisture content favors hydrothermal and biological processes, whereas dry biomass is more suitable for pyrolysis, gasification, and densification. Pretreatment, catalysis, microwave assistance, co-conversion, and product-stream integration can improve yields and product quality; however, these benefits often entail greater energy, chemical, hydrogen, or purification requirements. Recent evidence has shifted the measure of success from fuel yield alone toward product portfolios, nutrient circularity, toxicity reduction, exergy efficiency, carbon footprint, and economic resilience. The most promising systems employ a cascading design: upstream fractionation or extraction of high-value products, energy conversion of the remaining residues, utilization of char or digestate, and recycling of heat, water, and nutrients. This review proposes a decision matrix based on feedstock characteristics and a value hierarchy to align technology selection with technical, economic, environmental, and scale-readiness indicators. Priority research areas include data standardization, long-term testing, uncertainty analysis, integrated life-cycle and techno-economic assessments, and the demonstration of modular systems in regional contexts. This framework can help researchers and developers avoid partial optimization, compare alternatives transparently, and consistently select configurations suited to local resources and markets.

Keywords: integrated biorefinery; biomass conversion; bioenergy; biochar; green hydrogen; circular economy; life cycle assessment

1. PENDAHULUAN

Pemanfaatan biomassa tidak lagi cukup dinilai sebagai penggantian parsial bahan bakar fosil.

Literatur mutakhir memperlihatkan pergeseran menuju pengelolaan karbon, nutrisi, air, dan limbah dalam satu sistem produksi. Biomassa lignoselulosa

menyediakan fraksi selulosa, hemiselulosa, dan lignin; biomassa akuatik menawarkan pertumbuhan cepat serta kemampuan memanfaatkan air limbah; sedangkan lumpur dan residu agroindustri membawa persoalan kadar air, abu, kontaminan, dan heterogenitas. Karena cirinya berbeda, pilihan teknologi harus mengikuti sifat bahan baku, bukan mengikuti popularitas proses. Pirolisis, gasifikasi, pencairan hidrotermal, fermentasi, serta pencernaan anaerobik mempunyai jendela operasi dan keluaran yang berlainan (Faisal et al., 2022; Nguyen et al., 2024; Ocampo et al., 2023; Mehra & Goel, 2026). Perspektif ini menjadikan biorefinery sebagai rancangan aliran material yang berurutan, bukan sekadar daftar teknologi konversi.

Tantangan utamanya adalah ketegangan antara rendemen produk, mutu produk, intensitas energi, dan kompleksitas pemurnian. Peningkatan suhu dapat mendorong pembentukan gas dan mengurangi char; katalis dapat meningkatkan deoksigenasi tetapi menambah biaya serta risiko deaktivasi; pretreatment membuka struktur biomassa namun juga dapat menghasilkan inhibitor atau beban pemulihan pelarut. Hasil dari sekam padi, kayu, cangkang, lumpur, dan alga karena itu tidak dapat dipertukarkan secara langsung (Sulaiman et al., 2023; Starace et al., 2024; Meng et al., 2024; Lin et al., 2023; Choi et al., 2023). Bahkan pada bahan baku sejenis, umur tanaman, fraksi anatomi, mineral, serta kelembaban mempengaruhi komposisi produk. Sintesis yang bermutu harus menghindari generalisasi rendemen dan memeriksa hubungan sebab-akibat antara karakter bahan baku, kondisi operasi, reaksi dominan, dan fungsi akhir produk.

Literatur 2022–2026 juga memperluas sasaran produk. Selain bio-oil, syngas, biogas, bioetanol, dan biobutanol, sistem modern mengejar hidrogen, bahan kimia aromatik, 5-hidroksimetil furfural, kitin, pupuk, biostimulant, adsorben, serta material penyimpan energi (Taipabu et al., 2022; Sunil & Paul, 2025; Yang, Zou, et al., 2026; Ruangwicha et al., 2024; Braun & Colla, 2023; Sekar et al., 2024). Pergeseran ini penting karena bahan bakar umumnya bernilai per unit massa lebih rendah daripada bahan kimia khusus atau material fungsional. Studi tekno ekonomi memperlihatkan bahwa pemanfaatan lignin menjadi senyawa bernilai tambah dapat mengubah kelayakan proyek dibandingkan produksi bioetanol tunggal (Sunil & Paul, 2025). Dengan demikian, prioritas produk perlu ditetapkan berdasarkan hierarki nilai: mempertahankan struktur molekul yang bernilai, memulihkan komponen khusus, mengonversi residu menjadi energi, lalu mengembalikan nutrien atau karbon stabil ke lingkungan.

Tinjauan terdahulu sering berfokus pada satu jalur—misalnya hidrogen termokimia, biochar, biobutanol, atau pencairan hidrotermal—sehingga perbandingan lintas teknologi dan integrasi aliran

samping belum selalu jelas (Yin et al., 2023; Loc & Phuong, 2025; Liu et al., 2022; Ocampo et al., 2023). Publikasi baru mengenai ko-pirolisis biomassa–plastik, pengaktifan biochar kontinu, tanaman air, residu makanan laut, dan torefaksi–densifikasi menambah alasan untuk memperbarui sintesis (Zheng et al., 2026; Yek et al., 2026; Yang, Islam, et al., 2026; Xie, 2026; Granado et al., 2026). Artikel ini bertujuan: memetakan kesesuaian bahan baku–teknologi; menilai mekanisme peningkatan proses; membandingkan portofolio produk; serta merumuskan kerangka keputusan yang menggabungkan kinerja teknis, ekonomi, lingkungan, dan kesiapan skala. Kontribusinya terletak pada sintesis lintas jalur dan penempatan integrasi sebagai variabel desain utama.

2. METODE DAN RUANG LINGKUP TINJAUAN

Tinjauan disusun hanya dari dua himpunan data yang diberikan, yaitu DATA(3) dan REF RS. Kedua berkas diperiksa pada tingkat judul, penulis, tahun, abstrak, kata kunci, sumber, dan DOI. Setelah pencocokan identitas, tersedia 51 publikasi unik periode 2022–2026. Tidak ada sumber eksternal yang ditambahkan. Unit analisisnya adalah klaim yang dapat ditelusuri pada abstrak dan metadata: jenis bahan baku, jalur konversi, kondisi atau mekanisme utama, keluaran, indikator kinerja, keterbatasan, serta implikasi skala. Literatur ulasan dipakai untuk membangun kerangka, sedangkan studi eksperimental dan pemodelan dipakai untuk menguji ketepatan hubungan proses–hasil (Nguyen et al., 2024).

Sumber dikelompokkan menjadi empat klaster. Klaster pertama mencakup biomassa lignoselulosa dan residu pertanian; kedua mencakup alga, duckweed, serta biomassa laut; ketiga mencakup lumpur, air limbah, dan residu pangan/perikanan; keempat mencakup campuran biomassa dengan plastik atau minyak limbah. Teknologi kemudian dikodekan sebagai biologis, termokimia, hidrotermal, atau hibrida. Produk dikelompokkan sebagai energi, bahan kimia, material karbon, produk agronomis, dan layanan lingkungan. Pengelompokan ini memungkinkan perbandingan yang tidak bergantung pada satuan rendemen yang berbeda-beda (Yang, Islam, et al., 2026; Sholeha et al., 2024; Chan et al., 2023; Mishra & Meikap, 2024).

Integritas sitasi dijaga melalui pemetaan satu-ke-satu antara nama–tahun dalam teks dan satu entri pada daftar referensi. DOI dipertahankan bila tersedia; satu sumber tanpa DOI tetap dicantumkan berdasarkan metadata yang diberikan. Sumber yang sama tidak digandakan walaupun muncul dalam dua berkas. Sebanyak 120–150 kemunculan rujukan ditargetkan dengan pengulangan hanya ketika sebuah sumber mendukung klaim yang berbeda. Prinsip ini mencegah inflasi daftar pustaka dan

mempertahankan jejak bukti (Faisal et al., 2022; Lin et al., 2023; Sivaramakrishnan & Shrinithiviahshini, 2025). Karena bahan yang tersedia berupa abstrak dan metadata, simpulan tidak mengklaim detail yang tidak tercantum, seperti data kinetika lengkap atau konfigurasi alat yang tidak dilaporkan.

Sintesis dilakukan secara komparatif dan kausal. Pertama, karakter bahan baku dipasangkan dengan kebutuhan proses. Kedua, intervensi proses—pretreatment, katalisis, gelombang mikro, ko-konversi, kultur campuran, dan integrasi energi—dinilai menurut manfaat serta bebannya. Ketiga, studi LCA dan TEA dipakai untuk memeriksa apakah peningkatan teknis tetap bernilai pada tingkat sistem (Zheng et al., 2026; Lin et al., 2023; Foong et al., 2024; Ayub et al., 2024). Hasilnya dirangkum dalam dua tabel ekstensif. Tabel pertama memetakan bahan baku, jalur, mekanisme, produk, dan batasan; tabel kedua membandingkan strategi integrasi serta indikator keputusan.

3. LANSKAP BAHAN BAKU DAN IMPLIKASI PEMILIHAN PROSES

Biomassa lignoselulosa merupakan kelompok paling luas, tetapi recalcitrance membatasi pelepasan gula dan pembentukan produk cair. Perlakuan menggunakan gliserol atau kolin klorida pada sekam padi meningkatkan fraksi selulosa dan kristalinitas sekaligus mengubah sifat mekanik permukaan, menunjukkan bahwa pretreatment harus dievaluasi menurut tujuan produk, bukan hanya kehilangan lignin (Sulaiman et al., 2023). Untuk produksi bahan bakar, fraksi lignin dapat menjadi hambatan hidrolisis; untuk material komposit atau bahan kimia aromatik, fraksi yang sama justru bernilai. Kajian biochar menambahkan bahwa jenis bahan baku, suhu pirolisis, dan modifikasi menentukan porositas, gugus fungsi, serta kesesuaian aplikasi (Loc & Phuong, 2025; Sivaramakrishnan & Shrinithiviahshini, 2025; Meng et al., 2024). Maka, karakterisasi proksimat, ultimat, mineral, dan struktur polimer merupakan gerbang keputusan yang wajib.

Kayu dan residu pertanian kering cocok untuk proses termokimia, tetapi komposisi internal tetap menentukan hasil. Pemisahan jarum, kulit, dan kayu batang pinus menghasilkan perbedaan rendemen serta kandungan karbon bio-oil; umur pohon terutama mengubah proporsi anatomi, bukan sekadar reaktivitas kayu (Starace et al., 2024). Pada cangkang *Camellia*, kenaikan suhu menggeser distribusi dari char menuju gas dan mengubah nilai kalor serta sifat adsorpsi produk padat (Meng et al., 2024). Bagasse sagu dapat menghasilkan syngas lebih kaya hidrogen ketika katalis Al_2O_3 digunakan (Tosuli et al., 2025). Bukti ini mendukung pendekatan berbasis fraksi: pencampuran bahan baku perlu mempertimbangkan sinergi kimia, kandungan abu, dan tujuan produk akhir.

Biomassa akuatik menawarkan keuntungan karena tidak selalu berkompetisi dengan lahan pangan dan dapat menyerap nutrisi dari air limbah. Namun kadar air tinggi membuat pengeringan menjadi penalti energi, sehingga pencernaan anaerobik dan proses hidrotermal sering lebih rasional daripada pirolisis konvensional. Rumput laut dapat diarahkan ke biogas melalui pretreatment, ko-digesti, dan ekstraksi berurutan untuk mengurangi inhibitor serta meningkatkan pemanfaatan karbon (Faisal et al., 2022). Microalgae dapat menggabungkan pengolahan air, penangkapan karbon, biohidrogen, biofuel, biofertilizer, dan material penyimpanan energi (Braun & Colla, 2023; Vinayak et al., 2023; Kandasamy et al., 2023; Kumar et al., 2026). Keunggulan multi-fungsi ini hanya nyata apabila energi pemanenan dan dewatering dikendalikan.

Duckweed memperluas kategori biomassa akuatik karena pertumbuhannya cepat, kandungan protein dan pati tinggi, serta potensinya untuk pangan, bahan bakar, bio manufaktur, dan sistem pendukung kehidupan (Yang, Islam, et al., 2026). Sementara itu, residu makanan laut mengandung protein, mineral, kitin, lemak, dan senyawa bioaktif yang sebaiknya dipulihkan sebelum konversi energi. Fermentasi berurutan pada cangkang udang dapat menghasilkan α -kitin dan produk samping bernilai, sedangkan torefaksi gelombang mikro cangkang kepiting menawarkan pengelolaan sulfur serta produksi bahan bakar padat (Ruangwicha et al., 2024; Sun et al., 2025). Kajian bioekonomi biru menempatkan ekstraksi, fermentasi, dan pemanfaatan residu dalam satu rantai (Xie, 2026). Ini menunjukkan bahwa energi merupakan produk hilir setelah komponen bernilai tinggi dipisahkan.

Lumpur dan air limbah membawa bahan organik sekaligus air, abu, logam, dan polutan. Koproses termokimia biomassa–lumpur dapat memperbaiki keseimbangan energi dan mendiversifikasi produk, tetapi keamanan char dan emisi harus diuji (Chan et al., 2023). Pirolisis gelombang mikro berskala lebih besar mampu menghasilkan biogas kaya hidrogen dan telah dievaluasi melalui optimasi parameter serta jejak karbon (Lin et al., 2023). Pada jalur biologis, kultur mikroalga ganda dalam air limbah meningkatkan produktivitas biocrude dan pemulihan fosfor dibandingkan monokultur tertentu (Liu et al., 2024). Integrasi fermentasi dengan microbial fuel cell menawarkan pemulihan energi dan penurunan COD pada kondisi relatif ringan (Kumar et al., 2023). Nilai sistem berasal dari layanan pengolahan dan produk, bukan energi saja.

Campuran limbah memperkenalkan mekanisme donor–akseptor hidrogen. Biomassa kaya oksigen dapat dikoproses dengan plastik atau minyak limbah yang kaya hidrogen untuk meningkatkan mutu minyak, tetapi kontaminan, klorin, katalis, dan pemisahan produk memerlukan perhatian. Ko-

liquefaction biomassa lignoselulosa–plastik menunjukkan potensi peningkatan rendemen dan kualitas minyak melalui interaksi reaksi (Weligama Thuppahige et al., 2025). Ko-pirolisis lignin–poliolefin yang diikuti hidrogenasi memperlihatkan bahwa sumber hidrogen dapat mengubah biaya,

efisiensi eksergi, dan dampak lingkungan (Zheng et al., 2026). Studi motor oil–jerami padi menguatkan pentingnya optimasi rasio campuran dan parameter proses (Mishra & Meikap, 2024). Koproses tidak otomatis sirkular; manfaat bersih harus dibuktikan dengan neraca massa dan emisi.

Tabel 1. Matriks bahan baku, jalur konversi, produk, dan isu kritis

Kelompok bahan baku	Karakter dominan	Jalur yang sesuai	Produk utama	Isu kritis	Ref.
Lignoselulosa pertanian/kayu	Kering; selulosa–hemiselulosa–lignin; abu bervariasi	Pretreatment–fermentasi; pirolisis; gasifikasi; torrefaksi	Alkohol, syngas/H ₂ , bio-oil, biochar, biosolid	Recalcitrance, tar, mutu minyak, logistik	(Sulaiman et al., 2023; Sunil & Paul, 2025; Starace et al., 2024; Granado et al., 2026)
Alga, rumput laut, duckweed	Basah; protein/karbohidrat; nutrisi dan garam	AD; HTL; ekstraksi berurutan; biohidrogen	Biogas, biocrude, H ₂ , pangan/pakan, biostimulan	Dewatering, inhibitor, stabilitas kultur	(Faisal et al., 2022; Yang, Islam, et al., 2026; Vinayak et al., 2023; Sholeha et al., 2024)
Lumpur dan air limbah	Kadar air dan abu tinggi; kontaminan	HTL; pirolisis microwave; kultur alga; MFC	Gas, char, listrik, biomassa, layanan pengolahan	Logam, fase air, emisi, keamanan char	(Kandasamy et al., 2023; Lin et al., 2023; Chan et al., 2023; Kumar et al., 2023)
Residu makanan laut	Kitin, protein, mineral, sulfur	Fermentasi bertahap; ekstraksi; torrefaksi	Kitin, bahan kimia, biosolid, energi	Bau, sulfur, mineral, mutu bahan	(Xie, 2026; Ruangwicha et al., 2024; Sun et al., 2025)
Campuran biomassa–plastik/minyak	Donor–akseptor hidrogen; heterogen	Ko-HTL, ko-liquefaction, kopirolisis–hidrogenasi	Minyak lebih terdeoksigenasi, char, bahan bakar	Klorin, katalis, sumber H ₂ , alokasi dampak	(Sekar et al., 2024; Weligama Thuppahige et al., 2025; Zheng et al., 2026; Mishra & Meikap, 2024)

4. JALUR KONVERSI DAN MEKANISME PENINGKATAN KINERJA

Pencernaan anaerobik paling sesuai untuk substrat basah dan mudah terurai, dengan biogas sebagai produk utama serta digestate sebagai aliran nutrisi. Pada biomassa laut, komposisi karbohidrat, garam, sulfur, dan senyawa penghambat mempengaruhi komunitas mikroba dan stabilitas digester (Faisal et al., 2022). Pretreatment perlu cukup untuk meningkatkan aksesibilitas tanpa menghasilkan senyawa toksik. Ko-digesti dapat menyeimbangkan rasio karbon–nitrogen dan pengenceran inhibitor. Integrasi kultivasi mikroalga pada digestate selanjutnya dapat memulihkan nutrisi, meningkatkan biogas, serta menyediakan biomassa baru (Faisal et al., 2022; Braun & Colla, 2023; Kandasamy et al., 2023). Desain ini menutup aliran material, tetapi perlu pengendalian akumulasi garam dan verifikasi keamanan pemanfaatan digestate.

Fermentasi menghasilkan alkohol dan bahan kimia pada kondisi moderat, namun memerlukan gula yang dapat difermentasi dan pengendalian inhibitor. Biobutanol menarik karena sifat bahan bakarnya, tetapi produktivitas, toksisitas produk

terhadap mikroba, biaya substrat, dan pemisahan masih menjadi hambatan (Mehra & Goel, 2026; Liu et al., 2022). Pada limbah lignoselulosa, hidrolisis enzimatis meninggalkan lignin yang sebaiknya tidak hanya dibakar. Kajian ekonomi pada daun kurma dan rumput Napier menunjukkan jalur depolimerisasi oksidatif lignin menuju vanilin dan senyawa aromatik dapat lebih layak daripada bioetanol tunggal (Sunil & Paul, 2025). Implikasinya adalah fermentasi perlu diposisikan di dalam fraksinasi terpadu, dengan pemanfaatan lignin dan residu cair sebagai bagian dari model bisnis.

Pirolisis menawarkan fleksibilitas produk berupa gas, cairan, dan char. Distribusinya dikendalikan oleh laju pemanasan, suhu, waktu tinggal, ukuran partikel, dan komposisi bahan. Minyak pirolisis masih mengandung oksigen dan air sehingga kestabilan serta nilai kalornya terbatas. Katalis zeolit bermuatan logam tanah jarang dapat mendorong deoksigenasi tar pada fase gas (Jazie et al., 2023). Penggabungan pirolisis dengan biotransformasi membuka peluang pemurnian biologis atau konversi fraksi tertentu (Jiang et al., 2024). Akan tetapi, kehilangan karbon sebagai gas, pembentukan kokas, dan umur katalis harus dilaporkan agar peningkatan kualitas minyak

tidak disalah artikan sebagai peningkatan efisiensi total.

Gelombang mikro meningkatkan pemanasan volumetrik dan dapat mempercepat pirolisis, torrefaksi, atau aktivasi. Literatur terbaru menilai teknologi ini bersama LCA dan TEA, bukan sekadar rendemen laboratorium (Foong et al., 2024; Bisht et al., 2026). Sistem aktivasi uap kontinu dengan mekanisme auger menunjukkan arah menuju produksi biochar aktif yang lebih stabil dan terukur (Yek et al., 2026). Pada lumpur, optimasi sinergis parameter diperlukan untuk menjaga hasil hidrogen dan mengendalikan jejak karbon (Lin et al., 2023). Keunggulan gelombang mikro bergantung pada faktor kehilangan dielektrik bahan, kebutuhan susceptor, efisiensi pembangkit listrik, dan skala penetrasi. Tanpa pelaporan konsumsi listrik spesifik, klaim efisiensi proses sulit dibandingkan.

Gasifikasi mengkonversi biomassa menjadi syngas yang dapat dibakar, disintesis, atau dipakai pada sel bahan bakar. Kandungan tar, rasio H₂/CO, abu, dan kemurnian gas menentukan nilai hilir. Integrasi dengan solid oxide fuel cell dapat meningkatkan pemanfaatan energi serta memungkinkan upgrading internal, tetapi menuntut pembersihan gas ketat (Alaeldini et al., 2023). Katalis dan kondisi uap dapat meningkatkan hidrogen; kajian sago bagasse menunjukkan peran Al₂O₃ pada komposisi syngas (Tosuli et al., 2025). Ulasan hidrogen termokimia menempatkan pirolisis–gasifikasi sebagai jalur matang relatif, sambil tetap mencatat biaya pemurnian dan kebutuhan panas (Yin et al., 2023; Taipabu et al., 2022; Nguyen et al., 2024). Tolok ukur harus mencakup efisiensi karbon dan bukan hanya fraksi hidrogen.

Pencairan dan gasifikasi hidrotermal memanfaatkan air sebagai medium pada suhu serta tekanan tinggi, sehingga cocok untuk biomassa basah. HTL menghasilkan biocrude berenergi tinggi tanpa pengeringan awal, tetapi fase air kaya organik dan heteroatom memerlukan pengolahan (Ocampo et al., 2023). Gasifikasi hidrotermal berpotensi menghasilkan gas dari bahan basah, walau korosi, pengendapan garam, dan kebutuhan tekanan membatasi skala (Nogueira et al., 2023). Kajian mekanistik pada senyawa model alga menunjukkan jalur pembentukan HMF dan furfural dapat diarahkan melalui suhu serta waktu reaksi (Yang, Zou, et al., 2026). Pemahaman mekanisme ini penting agar proses hidrotermal tidak hanya mengejar biocrude, tetapi juga memulihkan platform chemicals secara selektif.

5. PORTOFOLIO PRODUK DAN HIERARKI NILAI

Biochar menempati posisi ganda sebagai produk energi, penyimpan karbon, pembenah tanah, adsorben, dan prekursor material elektrokimia. Sifatnya tidak universal: suhu, waktu tinggal, aktivasi, mineral, dan bahan baku mengendalikan

luas permukaan, stabilitas, pH, serta gugus fungsi (Loc & Phuong, 2025; Sivaramakrishnan & Shrinithiviahshini, 2025). Koproses hidrotermal serbuk gergaji–polipropilena menghasilkan char yang setelah aktivasi KOH atau H₂SO₄ menunjukkan peningkatan kapasitansi untuk superkapasitor (Sekar et al., 2024). Di sisi lingkungan, biochar dapat mengadsorpsi polutan termasuk surfaktan dan dioksin, tetapi kinerja serta potensi pelepasan kontaminan harus diverifikasi (Najem et al., 2024). Produk ini sebaiknya diklasifikasikan menurut spesifikasi penggunaan, bukan dipasarkan sebagai satu komoditas seragam.

Hidrogen mempunyai nilai strategis karena dapat mendukung panas industri, bahan kimia, dan sel bahan bakar. Namun istilah hidrogen berkelanjutan harus mencakup sumber energi, pasokan air, pemurnian, dan emisi tidak langsung. Biomassa dapat menghasilkan hidrogen melalui gasifikasi, pirolisis, fermentasi gelap, fotobiologis, dan pendekatan elektrokimia (Yin et al., 2023; Taipabu et al., 2022; Patra & Banu, 2025). Alga menawarkan jalur biologis dengan kemurnian potensial tinggi, tetapi produktivitas dan biaya masih membatasi skala (Vinayak et al., 2023; Ayub et al., 2024). Pada jalur termokimia, pembentukan tar dan konsumsi uap menjadi isu utama (Nguyen et al., 2024). Karena itu, perbandingan perlu menggunakan hidrogen bersih per unit energi atau karbon biogenik, bukan konsentrasi gas semata.

Produk agronomis dapat memperbaiki ekonomi sistem sambil mengembalikan nutrisi. Mikroalga menghasilkan biomassa yang berfungsi sebagai biofertilizer atau biostimulan melalui pasokan nutrisi dan senyawa pemacu pertumbuhan (Braun & Colla, 2023). Valorisasi limbah agro-pangan menjadi pupuk mendukung ekonomi sirkular, tetapi konsistensi komposisi, kontaminan, regulasi, dan penerimaan petani menjadi tantangan implementasi (Chojnacka et al., 2022). Digestate dan char juga dapat dikombinasikan, selama salinitas, logam, patogen, dan stabilitas organik memenuhi standar. Kerangka penilaian perlu menghitung substitusi pupuk mineral dan manfaat tanah secara konservatif. Tanpa pengujian agronomis jangka panjang, klaim penutupan siklus nutrisi tetap bersifat potensial.

Produk biru bernilai tinggi memperlihatkan logika cascading. Protein, pigmen, lipid, polisakarida, kitin, dan mineral dapat diekstraksi sebelum residunya diolah menjadi biogas, bio-oil, atau char (Sholeha et al., 2024; Xie, 2026; Ruangwicha et al., 2024). Biomassa extremophile menarik karena dapat dibudidayakan pada kondisi yang menekan kontaminasi dan kemudian diproses secara termokimia (Choi et al., 2023). Duckweed menawarkan produk pangan dan pakan sebelum pati atau residunya dialihkan ke energi (Yang, Islam, et al., 2026). Urutan proses menentukan keberhasilan: perlakuan keras pada tahap awal dapat menghancurkan molekul bernilai tinggi, sedangkan

ekstraksi selektif mempertahankan fungsi molekuler. Dengan demikian, desain biorefinery harus berangkat dari nilai tertinggi yang dapat dipertahankan secara realistis.

Bahan bakar padat melalui torefaksi dan densifikasi tetap relevan untuk logistik biomassa. Torefaksi mengurangi kelembaban dan rasio O/C, meningkatkan sifat hidrofobik dan kemudahan penggilingan; densifikasi meningkatkan kepadatan energi volumetrik. Ko-torefaksi dapat memanfaatkan sinergi antara residu dan menghasilkan biosolid yang lebih seragam (Waheed et al., 2022). Namun material ter-torefaksi kehilangan kemampuan mengikat, sehingga tekanan, suhu, kadar air, dan binder perlu dioptimalkan ketika dibuat menjadi pelet atau briket (Granado et al., 2026). Jalur ini relatif sederhana dibandingkan biorefinery cair, tetapi emisi pembakaran, penggunaan binder, debu, dan kestabilan penyimpanan tetap harus dihitung. Nilainya terbesar di wilayah dengan rantai pasok panas yang sudah tersedia.

Layanan lingkungan merupakan keluaran yang sering tidak masuk harga jual. Mikroalga dapat menghilangkan nutrisi dan logam dari air sekaligus menghasilkan biomassa (Kandasamy et al., 2023; Fekry et al., 2024; Liu et al., 2024). Sistem fermentasi-MFC dapat menurunkan COD sambil menghasilkan listrik atau hidrogen (Kumar et al., 2023). Biochar berpotensi memulihkan kualitas air melalui adsorpsi (Najem et al., 2024). Jika manfaat pengolahan tidak dihitung, teknologi multiproduk tampak lebih mahal daripada sistem konvensional; jika dihitung terlalu optimistis, kelayakan menjadi bias. Akuntansi harus memakai biaya pengolahan yang benar-benar dihindari, kapasitas aktual, dan standar efluen. Pemanfaatan biomassa terkontaminasi juga perlu jalur aman agar logam atau polutan tidak dipindahkan dari air ke tanah.

6. KELAYAKAN TEKNIS, EKONOMI, DAN LINGKUNGAN

Kinerja teknis perlu dilihat sebagai rantai, bukan unit reaktor. Rendemen tinggi di reaktor dapat kehilangan makna apabila pengeringan, pretreatment, kompresi, pemurnian, atau pengelolaan fase air mengkonsumsi energi besar. Pada HTL, penghindaran pengeringan menjadi keunggulan utama, tetapi tekanan dan upgrading biocrude tetap mahal (Nogueira et al., 2023; Ocampo et al., 2023). Pada pirolisis gelombang mikro, pemanasan cepat harus dibandingkan dengan efisiensi listrik dan kebutuhan susceptor (Foong et al., 2024; Bisht et al., 2026). Pada alga, produktivitas kultur dapat tergerus oleh pemanenan dan dewatering (Vinayak et al., 2023; Ayub et al., 2024). Indikator minimum mencakup efisiensi energi bersih, pemulihan karbon, penggunaan air, stabilitas operasi, serta kualitas setiap aliran produk.

TEA menunjukkan bahwa pilihan portofolio produk lebih menentukan daripada rendemen

tunggal. Produksi bioetanol dari daun kurma atau rumput Napier dilaporkan memiliki NPV negatif dan payback panjang, sedangkan produk aromatik dari lignin menunjukkan kinerja ekonomi lebih baik pada asumsi studi tersebut (Sunil & Paul, 2025). Pada ko-pirolisis-hidrogenasi, strategi hidrogen internal dapat menurunkan biaya dan meningkatkan efisiensi eksergi, sedangkan hidrogen komersial dapat menghasilkan dampak lingkungan berbeda (Zheng et al., 2026). Hasil ini tidak dapat dipindahkan langsung ke lokasi lain karena harga energi, skala, biaya modal, dan nilai produk berbeda. Analisis sensitivitas dan skenario wajib menyertai angka tunggal.

LCA harus menentukan batas sistem dan fungsi pembanding dengan cermat. Sistem yang menghasilkan energi sekaligus mengolah limbah memerlukan alokasi atau perluasan sistem agar kredit penghindaran tidak dihitung ganda. Kajian pirolisis gelombang mikro dan lumpur menunjukkan kemajuan karena menghubungkan optimasi proses dengan jejak karbon (Lin et al., 2023; Foong et al., 2024). Produksi hidrogen dari mikroalga juga memerlukan perhitungan listrik, nutrisi, infrastruktur kolam atau fotobioreaktor, serta pemurnian (Ayub et al., 2024). Karbon biogenik tidak otomatis netral; emisi rantai pasok, perubahan penggunaan lahan, dan waktu penyimpanan karbon menentukan hasil. LCA konsekuensial dan atribusional sebaiknya disajikan terpisah bila tujuan keputusan berbeda.

Integrasi panas merupakan pengungkit yang sering lebih kuat daripada peningkatan rendemen kecil. Gas panas dari pirolisis atau gasifikasi dapat mengeringkan bahan baku; char dapat menyediakan panas; biogas dapat menopang kebutuhan reaktor; dan panas matahari dapat membantu proses berbasis air. Studi pembangkit cerobong surya terintegrasi dengan desalinasi menunjukkan prinsip penggabungan energi-air, meskipun bukan sistem biomassa langsung (Abdelsalam et al., 2024). Pada biorefinery, integrasi semacam itu harus menghindari ketergantungan silang yang menurunkan keandalan. Simulasi proses, pinch analysis, serta penyimpanan panas diperlukan sebelum skala demonstrasi. Nilai integrasi harus dinilai setelah kehilangan distribusi dan variabilitas operasi dimasukkan.

Skala dan kontinuitas operasi memisahkan keberhasilan laboratorium dari industri. Reaktor batch berguna untuk memahami mekanisme, tetapi variasi bahan baku, fouling, korosi, umpan padat, dan deaktivasi katalis muncul lebih kuat pada operasi panjang. Produksi biochar aktif kontinu berbasis auger dan microwave menunjukkan arah rekayasa yang relevan (Yek et al., 2026). Hidrotermal bertekanan tinggi memerlukan sistem pengumpulan yang andal (Nogueira et al., 2023; Ocampo et al., 2023). Kultur mikroalga menghadapi musim, kontaminasi, dan perubahan nutrisi (Liu et al., 2024). Pelaporan harus mencakup jam operasi, neraca massa tertutup, kualitas produk antarbatch, downtime, dan

kebutuhan perawatan. Tanpa data itu, readiness level mudah dinilai terlalu tinggi.

Konteks regional menentukan konfigurasi terbaik. Daerah pesisir dapat memadukan rumput laut, residu perikanan, dan air limbah; wilayah pertanian dapat menggabungkan jerami, sekam, bagasse, serta limbah pangan; kota dapat memusatkan lumpur dan sampah organik. Sifat bahan baku lokal, jarak angkut, pola musim, kebutuhan

panas, regulasi pupuk, dan pasar produk harus masuk sejak desain awal (Xie, 2026; Chojnacka et al., 2022; Chan et al., 2023; Kumar et al., 2023). Sistem modular dapat mengurangi risiko logistik, sedangkan fasilitas terpusat memperoleh skala ekonomi. Pilihannya perlu diuji melalui optimasi jaringan pasok, bukan asumsi bahwa skala besar selalu lebih efisien.

Tabel 2. Strategi integrasi dan indikator keputusan pada biorefinery

Strategi integrasi	Mekanisme nilai	Indikator teknis	Indikator ekonomi/lingkungan	Risiko implementasi	Ref.
Ekstraksi dahulu, energi kemudian	Mempertahankan molekul bernilai tinggi; residu tetap dimanfaatkan	Pemulihan fraksi; efisiensi karbon; kemurnian	Pendapatan multiproduk; kredit penghindaran	Kompleksitas pemisahan dan pasar kecil	(Xie, 2026; Ruangwicha et al., 2024; Yang, Islam, et al., 2026)
Ko-konversi bahan heterogen	Transfer hidrogen dan sinergi komposisi	Rendemen cair; O/C; stabilitas katalis	Biaya umpan; emisi; skenario H2	Kontaminan dan variasi umpan	(Weligama Thuppahige et al., 2025; Zheng et al., 2026; Mishra & Meikap, 2024)
Air limbah–mikroalga–energi	Pemulihan N/P dan layanan pengolahan	Produktivitas; removal N/P; dewatering	Biaya pengolahan terhindar; listrik	Variasi efluen dan panen biomassa	(Braun & Colla, 2023; Kandasamy et al., 2023; Liu et al., 2024; Kumar et al., 2023)
Biochar fungsional	Penyimpanan karbon dan fungsi adsorpsi/elektroda	Luas permukaan; stabilitas; siklus	Nilai material; jejak aktivasi	Reagen, pencucian, keamanan akhir hayat	(Sekar et al., 2024; Loc & Phuong, 2025; Yek et al., 2026; Najem et al., 2024)
Integrasi panas dan utilitas	Menggunakan gas/char/panas proses	Efisiensi energi; pinch; uptime	CAPEX/OPEX; intensitas karbon	Ketergantungan antarunit	(Lin et al., 2023; Foong et al., 2024; Abdelsalam et al., 2024)
Torrefaksi–densifikasi	Meningkatkan densitas energi dan logistik	O/C, nilai kalor, durabilitas pelet	Biaya angkut dan penyimpanan	Binder, debu, emisi pembakaran	(Waheed et al., 2022; Granado et al., 2026)

7. KERANGKA BIOREFINERY
TERINTEGRASI DAN AGENDA RISET

Sintesis ini mengusulkan kerangka empat gerbang. Gerbang pertama adalah keamanan dan karakterisasi bahan: kadar air, abu, unsur, polutan, serta musim. Gerbang kedua adalah hierarki produk: komponen pangan, pakan, kimia, dan material dipertahankan sebelum energi. Gerbang ketiga memilih teknologi berdasarkan fase bahan dan kebutuhan produk. Gerbang keempat menguji sistem melalui TEA, LCA, eksergi, dan risiko operasi. Kerangka ini mencegah pemilihan proses hanya berdasarkan rendemen tertinggi (Loc & Phuong, 2025; Zheng et al., 2026; Osman et al., 2023; Foong et al., 2024). Untuk bahan basah, jalur biologis atau hidrotermal menjadi kandidat awal; untuk bahan kering, termokimia dan densifikasi lebih masuk akal; untuk campuran, ko-konversi dipilih hanya jika sinergi bersih terbukti.

Konfigurasi bertingkat dapat dimulai dengan sortasi dan ekstraksi ringan. Biomassa laut atau residu perikanan lebih dahulu diarahkan ke protein,

pigmen, lipid, atau kitin; fraksi karbohidrat masuk fermentasi atau pencernaan; residu padat dipirolisis menjadi char; gas dan minyak digunakan untuk panas atau upgrading (Faisal et al., 2022; Sholeha et al., 2024; Xie, 2026; Ruangwicha et al., 2024). Pada lignoselulosa, pretreatment memisahkan gula dan lignin, kemudian gula difermentasi sementara lignin di depolimerisasi atau dikoproses dengan donor hidrogen (Sulaiman et al., 2023; Sunil & Paul, 2025; Zheng et al., 2026). Air proses dan nutrisi dikembalikan sejauh kualitasnya memungkinkan. Arsitektur ini meningkatkan nilai total, tetapi kontrol mutu antarunit menjadi lebih rumit.

Agenda mekanistik perlu menautkan karakter bahan dengan jalur reaksi. Studi senyawa model hidrotermal memberi dasar untuk mengarahkan HMF dan furfural (Yang, Zou, et al., 2026); penelitian katalis deoksigenasi dan gasifikasi menjelaskan transformasi oksigenat serta pembentukan hidrogen (Tosuli et al., 2025; Jazie et al., 2023). Langkah berikutnya adalah memvalidasi mekanisme pada umpan nyata yang mengandung mineral, protein, dan kontaminan. Model kinetika perlu disertai neraca

unsur dan prediksi deaktivasi. Data terbuka mengenai komposisi bahan, distribusi produk, energi, dan ketidakpastian akan memungkinkan meta-analisis yang lebih kuat. Standardisasi ini lebih mendesak daripada menambah studi optimasi dengan desain eksperimen yang tidak dapat dibandingkan.

Agenda biologis perlu memprioritaskan stabilitas komunitas dan fungsi multiproduk. Kultur campuran mikroalga dapat meningkatkan pemanfaatan nitrogen–fosfor, tetapi interaksi komunitas dan daya tahan terhadap fluktuasi air limbah perlu diuji dalam operasi panjang (Liu et al., 2024). Rekayasa alga untuk biohidrogen memerlukan keseimbangan antara produktivitas, stres sel, dan biaya kendali lingkungan (Vinayak et al., 2023; Ayub et al., 2024). Digestate, efluen fermentasi, dan CO₂ gas buang dapat menjadi input kultur jika toksisitasnya terkendali (Faisal et al., 2022; Braun & Colla, 2023; Vickram et al., 2023). Integrasi biologis harus dinilai pada konsentrasi produk aktual dan kebutuhan pemisahan, bukan hanya potensi metabolik.

Agenda material menuntut hubungan antara proses, struktur, dan fungsi. Biochar untuk tanah, adsorpsi, katalis, dan superkapasitor memerlukan spesifikasi berbeda (Sekar et al., 2024; Loc & Phuong, 2025; Sivaramakrishnan & Shrinithiviahshini, 2025; Najem et al., 2024). Aktivasi kimia meningkatkan luas permukaan tetapi membawa kebutuhan pencucian dan pemulihan bahan kimia. Aktivasi uap atau CO₂ berpotensi mengurangi reagen, meski memerlukan energi panas (Yek et al., 2026). Penelitian harus melaporkan hasil massa setelah aktivasi, konsumsi reagen, stabilitas siklus, pelepasan logam, dan akhir hayat. Dengan cara ini, performa elektrokimia atau adsorpsi tidak dipisahkan dari dampak produksi material.

Agenda kebijakan dan komersialisasi mencakup standar produk, kontrak pasokan limbah, kredit karbon yang dapat diverifikasi, dan aturan pemanfaatan residu. Biofertilizer mikroalga dan pupuk dari limbah memerlukan standar kandungan serta keamanan (Braun & Colla, 2023; Chojnacka et al., 2022). Hidrogen berbasis biomassa memerlukan metodologi intensitas karbon yang sebanding dengan jalur lain (Taipabu et al., 2022; Ayub et al., 2024; Nguyen et al., 2024). Biochar memerlukan verifikasi stabilitas karbon dan penggunaan akhir (Loc & Phuong, 2025; Sivaramakrishnan & Shrinithiviahshini, 2025). Proyek demonstrasi sebaiknya menerbitkan data operasi dan kegagalan, bukan hanya hasil puncak. Kualitas bukti industri akan meningkat ketika indikator lingkungan dan ekonomi menjadi bagian dari spesifikasi desain sejak awal.

8. KETERBATASAN BUKTI DAN PRINSIP PELAPORAN

Ketidaksebandingan data membatasi sintesis kuantitatif. Rendemen kadang dilaporkan berdasarkan massa kering, massa umpan awal,

karbon, atau energi, sedangkan mutu produk memakai indikator berbeda. Kondisi bahan baku sebelum pengujian juga tidak selalu lengkap. Akibatnya, angka tertinggi dari dua studi tidak otomatis menunjukkan proses yang lebih unggul. Basis kering dan basah, kadar abu, nilai kalor, serta batas neraca perlu diseragamkan. Untuk produk gas, komposisi harus dilengkapi laju alir dan energi bersih. Untuk bio-oil, kandungan air, oksigen, viskositas, stabilitas penyimpanan, dan kebutuhan upgrading harus dilaporkan. Untuk char, hasil massa setelah aktivasi perlu dipisahkan dari hasil char mentah. Pelaporan semacam ini memungkinkan pembaca menguji trade-off yang biasanya tersembunyi di balik satu indikator performa.

Bukti yang tersedia masih didominasi eksperimen singkat dan umpan yang telah disiapkan dengan baik. Operasi industri menerima bahan dengan ukuran, kelembapan, abu, dan kontaminan yang berubah. Reaktor yang stabil selama beberapa jam belum membuktikan ketahanan terhadap fouling, korosi, slagging, pembentukan tar, atau perubahan komunitas mikroba. Studi demonstrasi perlu memakai kampanye operasi yang cukup panjang untuk menangkap start-up, shutdown, pembersihan, serta degradasi katalis. Hasil rata-rata dan variasinya lebih informatif daripada nilai puncak. Setiap gangguan perlu dicatat bersama tindakan koreksi dan dampaknya terhadap kualitas produk. Bukti kegagalan mempunyai nilai ilmiah karena membantu menentukan kebutuhan redundansi, persediaan bahan, dan kontrol proses sebelum investasi skala besar.

Asumsi ekonomi juga membutuhkan disiplin. Harga produk khusus sering diambil dari pasar bervolume kecil dan berkemurnian tinggi, padahal biorefinery baru belum tentu mencapai spesifikasi tersebut. Kredit tipping fee, penghindaran emisi, pupuk, atau pengolahan air tidak selalu dapat diterima sekaligus. Analisis dasar perlu memisahkan pendapatan yang dikontrak, pendapatan potensial, dan kredit kebijakan. Skenario konservatif, moderat, dan optimistis harus memakai rentang harga, biaya modal, kapasitas, faktor operasi, serta tingkat diskonto yang jelas. Analisis ketidakpastian dapat menunjukkan peluang NPV positif dan variabel yang paling menentukan. Pelaporan ini mengubah TEA dari membenaran teknologi menjadi alat untuk memilih eksperimen dan strategi pengurangan risiko.

Klaim lingkungan tidak boleh berhenti pada status bahan sebagai limbah. Penggunaan limbah dapat tetap berdampak tinggi apabila pengumpulan, pengeringan, bahan kimia, listrik, dan pengolahan residunya intensif. Sebaliknya, proses berenergi tinggi dapat kompetitif bila menggantikan pengolahan yang lebih buruk atau menyimpan karbon secara tahan lama. Penilaian perlu menyatakan unit fungsi, batas sistem, campuran listrik, umur fasilitas, metode alokasi, serta perlakuan terhadap karbon biogenik. Uji toksisitas dan nasib

kontaminan wajib mengikuti aliran padat, cair, dan gas. Sensitivitas terhadap sumber listrik dan jarak angkut penting untuk konfigurasi terdesentralisasi. Transparansi tersebut mencegah label hijau menggantikan pembuktian kuantitatif.

Paket data minimum dapat memperbaiki mutu bukti: identitas dan komposisi umpan; kondisi penyimpanan dan pretreatment; konfigurasi serta skala reaktor; waktu operasi; konsumsi listrik, panas, air, gas, dan reagen; neraca unsur; distribusi serta spesifikasi produk; emisi dan limbah sekunder; serta rentang ketidakpastian. Untuk sistem multiproduk, diagram alir dan titik alokasi perlu disediakan. Untuk kultur biologis, perubahan komunitas, kontaminasi, dan stabilitas produktivitas harus dicatat. Untuk katalis dan adsorben, jumlah siklus, regenerasi, kehilangan massa, dan akhir hayat harus dilaporkan. Paket ini cukup ringkas untuk diterapkan, tetapi mampu meningkatkan reproduksibilitas dan kualitas perbandingan lintas teknologi.

Potensi teknis, kelayakan rekayasa, dan proposisi bisnis perlu dibedakan. Potensi teknis menjawab apakah reaksi dan produk dapat dihasilkan. Kelayakan rekayasa menjawab apakah sistem dapat berjalan terus-menerus dengan keselamatan, mutu, dan efisiensi yang stabil. Proposisi bisnis menjawab siapa yang memasok bahan, membeli produk, menanggung risiko, serta membayar layanan lingkungan. Ketiganya membutuhkan bukti berbeda dan tidak boleh disimpulkan dari satu percobaan. Artikel tinjauan bermutu perlu mempertahankan batas ini, mengakui ketidakpastian, dan tetap memberi arah keputusan. Agenda riset dengan demikian tidak berhenti pada peningkatan hasil, tetapi bergerak menuju pengurangan risiko sistem secara terukur. Pendekatan ini juga memberi dasar yang lebih kuat bagi proses peer review, replikasi, standarisasi, dan keputusan investasi pada konteks wilayah.

Dimensi sosial dan tata kelola juga perlu masuk ke rancangan penelitian. Fasilitas konversi biomassa berhubungan langsung dengan petani, pengelola limbah, pemerintah daerah, operator, dan pengguna produk. Perubahan harga bahan, persaingan pemanfaatan residu, bau, lalu lintas angkutan, serta persepsi terhadap produk berbasis limbah dapat menentukan penerimaan proyek. Kajian perlu memetakan pemilik manfaat dan penanggung risiko, termasuk konsekuensi bila pasokan berkurang atau pasar produk gagal berkembang. Kontrak yang fleksibel, pelacakan asal bahan, mekanisme pengaduan, dan pemantauan emisi dapat meningkatkan kepercayaan. Untuk proyek berbasis limbah masyarakat, pembagian nilai sebaiknya dijelaskan sejak tahap demonstrasi. Analisis sosial tidak menggantikan TEA atau LCA, tetapi memperbaiki asumsi keduanya dengan kondisi perilaku dan kelembagaan yang nyata. Bukti ini penting agar sistem yang efisien di atas kertas tetap

dapat dioperasikan, dipelihara, dan diterima selama umur fasilitas.

9. KESIMPULAN

Literatur 2022–2026 menunjukkan bahwa masa depan konversi biomassa terletak pada biorefinery yang menyesuaikan teknologi dengan sifat bahan baku dan mempertahankan nilai molekuler setinggi mungkin. Biomassa basah lebih cocok untuk proses biologis atau hidrotermal; biomassa kering untuk pirolisis, gasifikasi, torrefaksi, dan densifikasi; sedangkan campuran biomassa–plastik memerlukan bukti sinergi serta pengendalian kontaminan (Weligama Thuppahige et al., 2025; Chan et al., 2023; Ocampo et al., 2023; Granado et al., 2026). Pretreatment, katalisis, microwave, dan ko-konversi dapat meningkatkan kinerja, tetapi harus dinilai bersama konsumsi energi, bahan kimia, pemurnian, dan stabilitas operasi. Produk bernilai tinggi, biochar fungsional, pemulihan nutrisi, serta layanan pengolahan limbah sering menjadi penentu kelayakan (Sunil & Paul, 2025; Xie, 2026; Ruangwicha et al., 2024; Kumar et al., 2023).

Sistem yang paling kuat memakai urutan ekstraksi–konversi–pemanfaatan residu, disertai daur ulang panas, air, karbon, dan nutrisi. Keputusan investasi memerlukan gabungan neraca massa–energi, TEA, LCA, eksergi, sensitivitas, dan risiko skala (Zheng et al., 2026; Lin et al., 2023; Foong et al., 2024; Ayub et al., 2024). Kesenjangan terbesar bukan kekurangan opsi teknologi, melainkan kurangnya data yang seragam, uji kontinu, pelaporan ketidakpastian, serta demonstrasi regional. Riset berikutnya harus membuktikan keandalan rantai lengkap dan mutu setiap produk, bukan hanya hasil reaktor. Dengan disiplin ini, biomassa dapat bergeser dari komoditas energi berbiaya rendah menjadi platform sirkular yang menghasilkan bahan kimia, material, energi, dan layanan lingkungan secara terukur.

DAFTAR REFERENSI

1. Faisal, S., Zaky, A., Wang, Q., Huang, J., & Abomohra, A. (2022). Integrated Marine Biogas: A Promising Approach towards Sustainability. *Fermentation*, 8(10). <https://doi.org/10.3390/fermentation8100520>
2. Sekar, S., Venkatachalam, C.D., Sengottian, M., & Ravichandran, S.R. (2024). Hydrothermal co-processing of plastic waste with lignocellulosic biomass and its application as a supercapacitor material. *Journal of Energy Storage*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114475>
3. Sulaiman, M., Rabbani, F.A., Iqbal, T., Kazmi, M.A., Yasin, S., Mujtaba, M.A., Kalam, M.A., & Almomani, F. (2023). Impact of eco-friendly chemical pretreatment on physicochemical and surface mechanical properties of sustainable lignocellulosic

- agricultural waste. *Algal Research*, 71. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.103051>
4. Braun, J.C.A., & Colla, L.M. (2023). Use of Microalgae for the Development of Biofertilizers and Biostimulants. *Bioenergy Research*, 16(1), 289–310. <https://doi.org/10.1007/s12155-022-10456-8>
5. Sunil, K., & Paul, S.K. (2025). Techno-economic assessment of bioethanol production and oxidative depolymerization of lignin to different value-added products from lignocellulosic feedstocks: A comparative study. *Bioresource Technology Reports*, 32. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2025.102447>
6. Loc, N.X., & Phuong, D.T.M. (2025). Optimizing biochar production: a review of recent progress in lignocellulosic biomass pyrolysis. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 12(1), 148–172. <https://doi.org/10.15302/J-FASE-2024597>
7. Alaedini, A.H., Tourani, H.K., & Saidi, M. (2023). A review of waste-to-hydrogen conversion technologies for solid oxide fuel cell (SOFC) applications: Aspect of gasification process and catalyst development. *Journal of Environmental Management*, 329. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117077>
8. Weligama Thuppahige, R.T., Barner, L., Shahbazi, M., Fraga, G., & Moghaddam, L. (2025). A comprehensive review of sustainable valorisation of lignocellulosic biomass and plastic waste into biofuels and chemicals via co-liquefaction. *Waste Management*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2025.114827>
9. Zheng, X., Zhong, Z., Zhang, B., Shen, L., Wang, W., Qi, R., & Ye, Q. (2026). Catalytic co-pyrolysis-hydrogenation of lignin and polyolefin waste into biofuels: A comparative energy–environment–economy analysis of hydrogen sourcing strategies. *Journal of Cleaner Production*, 545. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.147728>
10. Nogueira, R.C., Neto, F.S., Junior, P.G.D.S., Valério, R.B.R., Serpa, J.D.F., Lima, A.M.D.S., de Souza, M.C.M., de Lima, R.K.C., Lopes, A.A.S., Guimarães, A.P., Melo, R.L.F., Rios, M.A.D.S., & dos Santos, J.C.S. (2023). Research trends and perspectives on hydrothermal gasification in producing biofuels. *Energy Nexus*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100199>
11. Yang, J., Islam, M.F., Kazmi, A., Zhao, X., Hu, H., Sun, G., Ishizawa, H., & Hou, H. (2026). Beyond tiny aquatic plants: how duckweeds serve the world as revolutionary crops for alleviating resource and energy crises. *Food Chemistry*, 516. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.149330>
12. Vinayak, V., Sirotiya, V., Khandelwal, P., Rai, A., Jadhav, D.A., Pugazhendhi, A., Schoefs, B., Marchand, J., & Chae, K.-J. (2023). Recent trends in engineering algae for biohydrogen production: State of art strategies. *Fuel*, 348. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128636>
13. Kandasamy, S., Narayanan, M., Raja, R., Devarayan, K., & Kavitha, R. (2023). The current state of algae in wastewater treatment and energy conversion: a critical review. *Current Opinion in Environmental Science and Health*, 33. <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2023.100469>
14. Sholeha, N.A., Rachmadona, N., Nurrusyda, F.S., Masruchin, N., & Pasaribu, K.M. (2024). Aquatic Biomass Conversion and Biorefinery for Value-Added Products. *Green Energy and Technology*, Part F2058, 121–142. https://doi.org/10.1007/978-981-99-7769-7_6
15. Fekry, A.N., Qiblawey, H., & Almomani, F. (2024). Mercury removal by microalgae: Recent breakthroughs and prospects. *Algal Research*, 80. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2024.103547>
16. Lin, J., Liu, S., Han, Z., Ma, R., Cui, C., & Sun, S. (2023). Scaled-up microwave pyrolysis of sludge for hydrogen-rich biogas and life cycle assessment: Parameters synergistic optimization, carbon footprint analysis and technology upgrade. *Chemical Engineering Journal*, 452. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.139551>
17. Xie, S. (2026). Transforming seafood processing residues into a circular blue bioeconomy: modern advances, integrated pathways and industrial translation. *Food Chemistry*, 517. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2026.149479>
18. Mehra, K.S., & Goel, V. (2026). Biobutanol Production and Analysis. *Biofuels: Analytical Insights and Perspectives*, 210–228. <https://doi.org/10.1201/9781003485636-10>
19. Osman, A.I., Lai, Z.Y., Farghali, M., Yiin, C.L., Elgarahy, A.M., Hammad, A., Ihara, I., Al-Fatesh, A.S., Rooney, D.W., & Yap, P.-S. (2023). Optimizing biomass pathways to bioenergy and biochar application in electricity generation, biodiesel production, and biohydrogen production. *Environmental Chemistry Letters*, 21(5), 2639–2705. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01613-2>
20. Yin, F., Zeng, D., Qiu, Y., Yang, Y., Wu, S., & Xiao, R. (2023). Advances in biomass-based thermochemical hydrogen production technology. *Energy Environmental Protection*, 37(1), 29–41. <https://doi.org/10.20078/j.eep.20230127>

21. Ruangwicha, J., Cheirsilp, B., & Suyotha, W. (2024). Green biorefinery of shrimp shell waste for α -chitin and high-value co-products through successive fermentation by co-lactic acid bacteria and proteolytic fungus. *Bioresource Technology*, 393. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.130106>
22. Choi, D., Kwon, D., Lee, D., Jung, S., Chen, W.-H., Lim, J.-K., Park, S.-J., Park, W.-K., & Kwon, E.E. (2023). Strategic Use of Extremophilic Microalgae as a Carbon Source in the Thermo-Chemical Process. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 11(16), 6454–6464. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c00486>
23. Sivaramakrishnan, S., & Shrinithiviahshini, N.D. (2025). Biochar. *Biochar: Science, Applications, and Future Prospects for Sustainable Solutions*, 1–258. <https://doi.org/10.1016/C2024-0-04232-4>
24. Sun, J., Liu, Q., Peng, F., & Gu, Y. (2025). Exploring new approach for resource utilization of crab shell waste: Optimized microwave torrefaction parameters and efficient self-desulfurization. *Journal of Environmental Management*, 373. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123582>
25. Taipabu, M.I., Viswanathan, K., Wu, W., Hattu, N., & Atabani, A.E. (2022). A critical review of the hydrogen production from biomass-based feedstocks: Challenge, solution, and future prospect. *Process Safety and Environmental Protection*, 164, 384–407. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.006>
26. Yek, P.N.Y., Ting, Y.T., Wong, C.C., Kong, S.H., Liew, R.K., Zhang, Z., Tan, Y.H., Alomairy, S., & Lam, S.S. (2026). Continuous production of activated Biochar via microwave steam activation and Auger mechanism. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 16(3). <https://doi.org/10.1007/s13399-025-07006-5>
27. Foong, S.Y., Chan, Y.H., Yek, P.N.Y., Lock, S.S.M., Chin, B.L.F., Yiin, C.L., Lan, J.C.-W., & Lam, S.S. (2024). Microwave-assisted pyrolysis in biomass and waste valorisation: Insights into the life-cycle assessment (LCA) and techno-economic analysis (TEA). *Chemical Engineering Journal*, 491. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151942>
28. Chojnacka, K., Moustakas, K., & Mikulewicz, M. (2022). Valorisation of agri-food waste to fertilisers is a challenge in implementing the circular economy concept in practice. *Environmental Pollution*, 312. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119906>
29. Liu, Y., Yuan, Y., Ramya, G., Mohan Singh, S., Thuy Lan Chi, N., Pugazhendhi, A., Xia, C., & Mathimani, T. (2022). A review on the promising fuel of the future – Biobutanol; the hindrances and future perspectives. *Fuel*, 327. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.125166>
30. Abdelsalam, E., Almomani, F., Kafiah, F., Azzam, A., Kassem, F., Abdallah, R., & Juaidi, A. (2024). A case study of an integrated solar chimney power plant and water desalination plant in Qatar. *Desalination*, 575. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2023.117283>
31. Chan, Y.H., Lock, S.S.M., Chin, B.L.F., Wong, M.K., Loy, A.C.M., Foong, S.Y., Yiin, C.L., & Lam, S.S. (2023). Progress in thermochemical co-processing of biomass and sludge for sustainable energy, value-added products and circular economy. *Bioresource Technology*, 380. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129061>
32. Kumar, A., Arora, N., Pandey, K., Kumar, V.T., Singh, D., & Bhaskar, T. (2026). Thermochemical Conversion of Algal Biomass for Energy Storage Applications. *ACS Symposium Series*, 1522, 59–81. <https://doi.org/10.1021/bk-2026-1522.ch003>
33. Tosuli, Y.T., Dafiqurrohman, H., Hermawan, R., & Surjosatyo, A. (2025). Enhancing hydrogen content in syngas from sago bagasse gasification using Al_2O_3 catalyst. *International Journal of Hydrogen Energy*, 136, 60–66. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.05.061>
34. Jiang, Y., Hu, Z., Cheng, L., & Luo, C. (2024). Linking biomass pyrolysis and biotransformation: A bibliometric review. *Journal of the Energy Institute*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.joei.2024.101592>
35. Mishra, A., & Meikap, B.C. (2024). Optimization and screening of process parameters for the robust co-pyrolytic study of waste motor oil and rice stubble toward sustainable waste-to-fuel generation. *Chemosphere*, 352. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.141450>
36. Jazie, A.A., Haydary, J., Abed, S.A., & Husár, J. (2023). Gas-Phase Deoxygenation of Biomass Pyrolysis Tar Catalyzed by Rare Earth Metal Loaded H β Zeolite. *Catalysts*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/catal13061016>
37. Bisht, P., Mishra, A., Anand, V., Singh, A., Tiwari, H., Shobana, S., Kumar, G., Kumar, S., Pant, K.K., & Prajapati, S.K. (2026). Microwave-assisted pyrolysis of biomass for bioenergy production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 226. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116344>

38. Ayub, H.M.U., Nizami, M., Qyyum, M.A., Iqbal, N., Al-Muhtaseb, A.H., & Hasan, M. (2024). Sustainable hydrogen production via microalgae: Technological advancements, economic indicators, environmental aspects, challenges, and policy implications. *Environmental Research*, 244. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117815>
39. Vickram, A.S., Saravanan, A., Senthil Kumar, P., Thamarai, P., Yasodha, S., Jamuna, G., & Rangasamy, G. (2023). An integrated approach to the sustainable development and production of biofuel from biopolymers and algal biomass derived from wastewater. *Fuel*, 349. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128691>
40. Ocampo, E., Beltrán, V.V., Gómez, E.A., Ríos, L.A., & Ocampo, D. (2023). Hydrothermal liquefaction process: Review and trends. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 7. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2023.100382>
41. Yang, C., Zou, F., Ma, Y., Ben, H., Li, Z., & He, Y. (2026). 5-Hydroxymethylfurfural (HMF) generation from hydrothermal liquefaction of algal modeling compound: A comprehensive investigation on the experimental exploration and formation mechanism. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2026.107648>
42. Patra, N., & Banu, S.S. (2025). Emerging Approaches in Hydrogen Production from Biomass. *Engineering Materials, Part F11*, 117–135. https://doi.org/10.1007/978-3-031-76953-5_5
43. Liu, W., Shang, Q., Fu, D., Shi, W., & Singh, R.P. (2024). Development of microalgal dual-cultures for enhanced productivity in sewage: An experimental study. *Biomass and Bioenergy*, 180. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2023.106994>
44. Nguyen, V.G., Nguyen-Thi, T.X., Phong Nguyen, P.Q., Tran, V.D., Ağbulut, Ü., Nguyen, L.H., Balasubramanian, D., Tarelko, W., A. Bandh, S., & Khoa Pham, N.D. (2024). Recent advances in hydrogen production from biomass waste with a focus on pyrolysis and gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, 54, 127–160. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.05.049>
45. Kumar, K., Ding, L., Zhao, H., & Cheng, M.-H. (2023). Waste-to-Energy Pipeline through Consolidated Fermentation–Microbial Fuel Cell (MFC) System. *Processes*, 11(8). <https://doi.org/10.3390/pr11082451>
46. Starace, A.K., Palmer, S., Orton, K., Pierce, C., Christensen, E., Larson, A., Martinez, R., Klinger, J., Griffin, M.B., Mukarakate, C., Iisa, K., Wiatrowski, M.R., Dutta, A., Parks, J.E., Oyediji, O., & Carpenter, D. (2024). Influence of loblolly pine anatomical fractions and tree age on oil yield and composition during fast pyrolysis. *Sustainable Energy and Fuels*, 9(2), 501–512. <https://doi.org/10.1039/d4se01252f>
47. Meng, M., Meng, W., Cheng, S., Xing, B., Yi, G., & Zhang, C. (2024). Effect of pyrolysis temperature on pyrolysis of *Camellia oleifera* shell. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(21), 26753–26763. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-03317-z>
48. Waheed, A., Naqvi, S.R., & Ali, I. (2022). Co-Torrefaction Progress of Biomass Residue/Waste Obtained for High-Value Bio-Solid Products. *Energies*, 15(21). <https://doi.org/10.3390/en15218297>
49. Granado, M.P.P., Conti, A.C.D., & Nanda, S. (2026). Advances in Torrefaction and Densification of Biomass to Produce Biofuel Pellets and Briquettes: A Review. *Bioenergy Research*, 19(1). <https://doi.org/10.1007/s12155-026-10980-x>
50. Najem, T., Ayoub, G.M., Salam, D., & Zayyat, R.M. (2024). Eliminating hazardous pollutants: treatment options for dioxins and surfactants from water and wastewater: an updated review. *Environmental Science and Pollution Research*, 31(54), 62702–62729. <https://doi.org/10.1007/s11356-024-35416-x>