Jurnal Penelitian, Pengembangan, Pembelajaran, dan Teknologi (JP3T)

Volume 4 Number 1 (2026)

https://jurnalcendekia.id/index.php/jp3t

Estimasi Potensi Ekonomi Sirkular Limbah Sawit untuk Energi Terbarukan di Sumatera Utara

Pravil Mistryanto Tambunan [1] *, Supran Hidayat Sihotang [2], Nurmala Sari [3], Fanny Rizki Sembiring [4]
[1 2 3 4] Universitas Tjut Nyak Dhien, Sumatera Utara, Indonesia
[1 2 3 4] PT Bakrie Renewable Chemicals, Sumatera Utara, Indonesia
* Penulis Korespondensi: pravilt@utnd.ac.id

Abstrak: Sumatera Utara merupakan salah satu pusat produksi minyak sawit Indonesia, tetapi statistik resmi tingkat provinsi belum memetakan volume residu proses secara terintegrasi. Kesenjangan tersebut membatasi perencanaan ekonomi sirkular dan energi terbarukan berbasis limbah. Penelitian ini mengestimasi volume Tandan Buah Segar (TBS), tandan kosong, serat, cangkang, dan Palm Oil Mill Effluent (POME), serta menilai jalur pemanfaatan POME, used cooking oil (UCO), dan spent bleaching earth (SBE). Studi deskriptif kuantitatif menggunakan data sekunder tahun 2024, telaah literatur, dan pemodelan skenario. Produksi CPO sebesar 5,12 juta ton dikonversi menjadi TBS dengan Oil Extraction Rate 20–22%; volume residu dihitung memakai rentang rasio neraca massa, sedangkan UCO dihitung sebagai proksi demografis. TBS yang diolah diperkirakan 23,27–25,60 juta ton/tahun. Potensi residu terdiri atas TKKS 5,12–5,89 juta ton, serat 3,03–3,46 juta ton, cangkang 1,28–1,54 juta ton, dan POME 15,13–17,92 juta m^3/tahun. Proksi UCO menghasilkan sekitar 0,165 juta kiloliter/tahun. POME paling rasional diolah dekat PKS menjadi biogas, sedangkan UCO dan minyak pulihan SBE lebih sesuai dikonsolidasikan dalam hub pengolahan terintegrasi. Sumatera Utara memiliki basis sumber daya yang besar untuk ekonomi sirkular, tetapi angka ini bersifat estimasi perencanaan dan belum layak menjadi dasar investasi tanpa inventarisasi pabrik, pemetaan spasial, uji kualitas bahan baku, analisis biaya logistik, dan life-cycle assessment.

Keyword: Ekonomi Sirkular, Limbah Kelapa Sawit, POME, Energi Terbarukan, Sumatera Utara

Pendahuluan

Industri kelapa sawit mempunyai posisi strategis dalam perekonomian Indonesia karena menghasilkan minyak pangan, bahan baku oleokimia, dan sumber energi nabati. Pada saat yang sama, pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) menghasilkan aliran samping dalam jumlah besar berupa tandan kosong kelapa sawit (TKKS), serat mesokarp, cangkang, Palm Oil Mill Effluent (POME), dan berbagai residu pemurnian.

Copyright © 2026
Pravil Mistryanto Tambunan – Supran Hidayat Sihotang – Nurmala Sari – Fanny Rizki Sembiring

Dalam model produksi linear, aliran tersebut dipandang sebagai beban pengolahan atau bahan bakar bernilai rendah. Dalam ekonomi sirkular, residu diperlakukan sebagai sumber karbon, energi, nutrien, dan bahan baku sekunder yang dapat dipulihkan melalui biogas, kompos, biomassa padat, biochar, biodiesel, material berbasis serat, serta produk oleokimia bernilai tambah (Siagian et al., 2024; Goh et al., 2025).

Sumatera Utara relevan sebagai lokasi kajian karena mempunyai basis perkebunan dan industri pengolahan yang besar. Publikasi statistik perkebunan 2024 menempatkan luas areal kelapa sawit provinsi ini sekitar 1,36 juta hektare, sedangkan produksi minyak sawit diperkirakan mencapai 5,12 juta ton atau sekitar 11,27% dari produksi nasional. Perekonomian provinsi tumbuh 5,03% pada 2024 dan memberi kontribusi 23,55% terhadap struktur ekonomi Pulau Sumatera. Skala aktivitas tersebut menunjukkan adanya basis bahan baku dan infrastruktur industri yang dapat mendukung pengembangan pengolahan residu, tetapi besarnya produksi CPO tidak otomatis sama dengan ketersediaan residu yang secara teknis dan ekonomis dapat dikumpulkan.

Kesenjangan utama adalah belum tersedianya inventaris resmi yang konsisten mengenai volume POME, TKKS, serat, cangkang, SBE, dan UCO pada tingkat provinsi maupun kabupaten. Statistik perkebunan umumnya berhenti pada luas areal dan produksi komoditas utama. Akibatnya, perencanaan proyek sering menggunakan rasio baku dari literatur yang berasal dari lokasi, tahun, teknologi, dan kondisi operasi yang berbeda. Ketidakpastian semakin besar untuk UCO karena pasokannya tersebar pada rumah tangga, hotel, restoran, kafe, dan industri pangan, serta dipengaruhi perilaku penyimpanan, kualitas, harga, dan jaringan kolektor (Traction Energy Asia, 2024).

Urgensi penelitian meningkat setelah penerapan mandatori biodiesel B40 pada 2025 dengan alokasi nasional 15,6 juta kiloliter. Pengembangan bahan baku berbasis limbah berpotensi mengurangi kompetisi langsung antara kebutuhan pangan dan energi, meningkatkan nilai tambah lokal, serta mendukung dekarbonisasi. Namun, strategi pengolahan perlu membedakan karakter setiap residu. POME mempunyai kadar air sangat tinggi sehingga tidak efisien diangkut jarak jauh; sebaliknya UCO dan minyak pulihan SBE lebih padat energi dan dapat dikonsolidasikan menuju fasilitas terpusat. Karena itu, model kilang sirkular tidak seharusnya memusatkan seluruh aliran limbah pada satu lokasi tanpa mempertimbangkan logistik dan kualitas.

Penelitian ini bertujuan; (1) mengestimasi volume TBS yang diolah di Sumatera Utara berdasarkan produksi CPO; (2) menghitung rentang indikatif volume TKKS, serat, cangkang, dan POME menggunakan skenario neraca massa; (3) menghasilkan proksi awal potensi UCO; dan (4) menyusun implikasi teknis, lingkungan, dan tata kelola bagi pengembangan ekosistem ekonomi sirkular. Kebaruan penelitian terletak pada penggabungan data resmi provinsi, analisis rentang ketidakpastian, serta diferensiasi desain pengolahan berdasarkan karakter fisik dan tingkat ketersebaran bahan baku.

Metode

Research Design & Scope

Penelitian menggunakan desain deskriptif kuantitatif berbasis data sekunder dan pemodelan skenario. Unit analisis adalah aktivitas pengolahan kelapa sawit dan aliran residu yang secara potensial terbentuk di Provinsi Sumatera Utara. Tahun dasar utama adalah 2024 karena merupakan tahun terbaru yang mempunyai data produksi perkebunan teragregasi dan dapat disandingkan dengan indikator ekonomi provinsi. Analisis tidak dimaksudkan sebagai studi kelayakan investasi, melainkan sebagai estimasi awal untuk mengidentifikasi orde besaran sumber daya, ketidakpastian, dan kebutuhan data primer.

Bahan kajian mencakup data Badan Pusat Statistik, kebijakan pemerintah, laporan penelitian UCO, serta artikel ilmiah mengenai neraca massa pabrik kelapa sawit, pengolahan POME, pemanfaatan TKKS, ekonomi sirkular, dan pemulihan minyak dari SBE. Sumber dipilih apabila mempunyai identitas penerbit yang jelas, metode atau basis angka dapat ditelusuri, serta relevan terhadap proses industri sawit. Publikasi media digunakan terbatas sebagai konteks dan tidak menjadi dasar utama perhitungan.

Data Sources and Variables

Tabel 1. Variabel, Nilai Masukan, dan Fungsi Analitis

Variabel	Nilai	Fungsi
Produksi CPO Sumatera Utara	5,12 juta ton/tahun	Data dasar BPS, 2024
Oil Extraction Rate	20–22%	Rentang skenario industri
TKKS terhadap TBS	22–23% berat	Literatur neraca massa
Serat terhadap TBS	13–13,5% berat	Literatur neraca massa
Cangkang terhadap TBS	5,5–6% berat	Literatur neraca massa
POME terhadap TBS	0,65–0,70 m^3/ton	Literatur dan studi kasus
Penduduk Sumatera Utara	15,47 juta jiwa	Proksi demografis 2024
Penduduk Indonesia	281,60 juta jiwa	Penyebut proksi demografis
Potensi UCO nasional	3,0 juta kL/tahun	Skenario literatur/kebijakan

Sumber: : BPS, Literatur Teknis, dan Pengolahan Penulis

Calculation Procedure

Estimasi dihitung melalui empat tahap. Pertama, volume TBS diperoleh dengan membagi produksi CPO dengan OER. Kedua, residu padat dihitung sebagai hasil perkalian volume TBS dengan rasio massa masing-masing residu. Ketiga, POME dihitung sebagai hasil perkalian TBS dan rasio debit POME. Keempat, UCO Sumatera Utara dihitung sebagai proksi proporsional antara penduduk provinsi dan penduduk nasional. Rumus yang digunakan adalah:

TBS (juta ton/tahun) = Produksi CPO ÷ OER
Residu padat (juta ton/tahun) = TBS × rasio residu
POME (juta m^3/tahun) = TBS × rasio POME
UCO Sumatera Utara = potensi UCO nasional × (penduduk Sumatera Utara ÷ penduduk Indonesia).

Rentang minimum dibentuk dari kombinasi yang menghasilkan volume terendah, sedangkan rentang maksimum menggunakan kombinasi yang menghasilkan volume tertinggi. Analisis sensitivitas POME menggunakan tiga OER (20%, 21%, dan 22%) dan tiga rasio POME (0,650; 0,675; dan 0,700 m^3/ton TBS), menghasilkan sembilan skenario. Nilai UCO hanya digunakan sebagai indikator awal karena konsumsi minyak goreng, tingkat kehilangan selama penggorengan, praktik pengumpulan, dan struktur sektor HoReCa Sumatera Utara belum diukur secara primer.

Data Analysis & Ethical Considerations

Analisis dilakukan secara deskriptif menggunakan nilai minimum, titik tengah, maksimum, dan perbandingan skenario. Hasil kuantitatif di triangulasi dengan bukti teknis dari penelitian terdahulu untuk menilai kecocokan jalur pemanfaatan. Interpretasi mempertimbangkan kadar air, kepadatan energi, ketersebaran sumber, kematangan teknologi, kebutuhan pengendalian mutu, dan risiko tata kelola. Penelitian tidak

melibatkan manusia, hewan, rekam medis, atau data pribadi; seluruh data berasal dari sumber publik dan agregat sehingga persetujuan etik khusus tidak diperlukan.

Hasil & Pembahasan

Hasil

Palm Oil Sector Profile

Skala sektor sawit Sumatera Utara memberikan basis kuantitatif yang kuat untuk ekonomi sirkular. Luas areal sekitar 1,357 juta hektare dan produksi CPO 5,12 juta ton menunjukkan konsentrasi aktivitas hulu-hilir. Pada saat yang sama, pertumbuhan ekonomi 5,03% dan kontribusi 23,55% terhadap ekonomi Pulau Sumatera menandakan kapasitas industri dan pasar yang relatif matang. Pemerintah provinsi juga pernah menetapkan Rencana Aksi Provinsi Perkebunan Kelapa Sawit Berkelanjutan melalui Peraturan Gubernur Sumatera Utara Nomor 14 Tahun 2020 untuk periode 2020–2024. Identifikasi tahun regulasi ini penting karena dossier awal menuliskannya sebagai peraturan tahun 2024.

Tabel 2. Profil Kuantitatif Sumatera Utara yang Relevan terhadap Ekonomi Sirkular

Indikator	Nilai	Makna analitis
Luas areal kelapa sawit	1,357 juta ha	Basis sumber daya hulu
Produksi CPO	5,12 juta ton	Basis perhitungan TBS
Pangsa produksi nasional	11,27%	Menunjukkan posisi strategis
Penduduk	15,47 juta jiwa	Penyusun proksi UCO
Pertumbuhan ekonomi 2024	5,03%	Konteks kapasitas ekonomi
Kontribusi ekonomi Pulau Sumatera	23,55%	Konteks spasial regional

Sumber: BPS dan Pengolahan Penulis

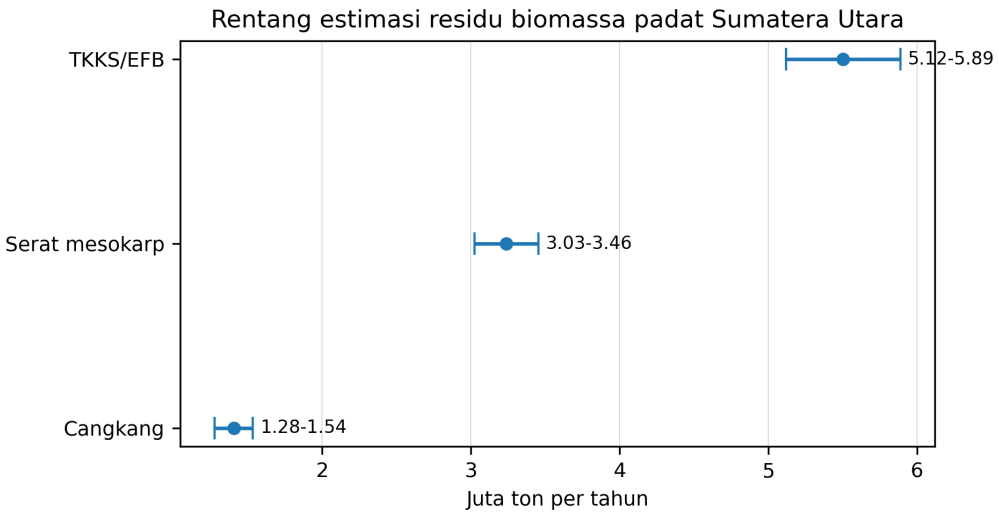
Estimated FFB & Solid Residues

Produksi CPO sebesar 5,12 juta ton menghasilkan estimasi TBS 23.27–25.60 juta ton/tahun. Nilai minimum muncul pada OER 22%, sedangkan nilai maksimum muncul pada OER 20%. Titik tengah pada OER 21% adalah 24.38 juta ton/tahun. Rentang tersebut memperlihatkan bahwa selisih dua poin persentase OER mengubah estimasi bahan baku lebih dari 2,3 juta ton, sehingga data OER aktual per PKS merupakan variabel penting dalam inventarisasi provinsi.

Tabel 3. Estimasi TBS dan Residu Utama Industri Sawit Sumatera Utara

Aliran	Rasio	Minimum	Maksimum	Satuan
TBS yang diolah	—	23.27	25.60	juta ton/tahun
TKKS/EFB	22–23%	5.12	5.89	juta ton/tahun
Serat mesokarp	13–13,5%	3.03	3.46	juta ton/tahun
Cangkang	5,5–6%	1.28	1.54	juta ton/tahun
POME	0,65–0,70 m^3/ton	15.13	17.92	juta m^3/tahun

Sumber: Perhitungan Penulis Berdasarkan Produksi CPO 2024

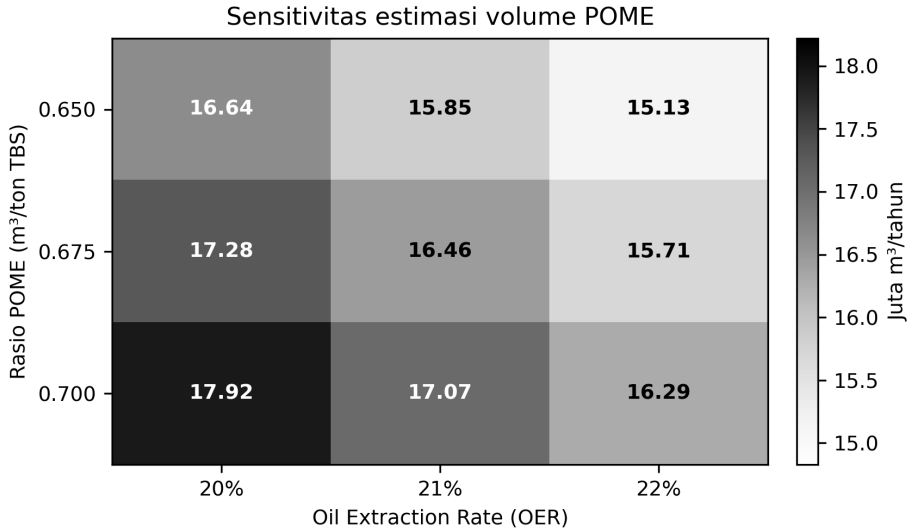


Gambar 1. Rentang Estimasi Residu Biomassa Padat Sumatera Utara
Sumber: Perhitungan Penulis

Gambar 1 menunjukkan TKKS sebagai residu padat terbesar, diikuti serat dan cangkang. Meskipun jumlah teoritisnya besar, volume yang benar-benar tersedia untuk proyek baru akan lebih rendah karena sebagian serat dan cangkang telah digunakan sebagai bahan bakar boiler, sedangkan TKKS dapat dikembalikan ke kebun, dikomposkan, atau dimanfaatkan oleh pihak lain. Oleh sebab itu, studi kelayakan harus menghitung volume surplus setelah pemakaian internal dan kontrak eksisting, bukan menggunakan seluruh timbulan teoritis.

POME Scenario & Uncertainty

Estimasi POME berada pada rentang 15.13–17.92 juta m³/tahun. Rentang sebesar 2.79 juta m³, atau sekitar 18.5% dari nilai minimum, berasal hanya dari variasi OER dan rasio POME. Variasi aktual dapat lebih lebar karena perbedaan penggunaan air proses, tingkat resirkulasi, kondisi sterilizer, klarifikasi, dan praktik housekeeping.



Gambar 2. Analisis Sensitivitas Volume POME terhadap OER dan Rasio Pembentukan POME
Sumber: Perhitungan Penulis

Tabel 4. Matriks sensitivitas estimasi POME (juta m³/tahun)

Rasio POME	OER 20%	OER 21%	OER 22%
0.650	16.64	15.85	15.13
0.675	17.28	16.46	15.71
0.700	17.92	17.07	16.29

Sumber: Penulis Penulis

Silang-uji menggunakan estimasi historis POME nasional yang diproporsikan terhadap pangsa CPO menghasilkan nilai jauh lebih rendah daripada pendekatan neraca massa. Perbedaan tersebut tidak dapat diperlakukan sebagai dua pengukuran yang setara karena tahun dasar, cakupan pabrik, dan definisi massa/volume berbeda. Temuan ini justru memperkuat kebutuhan pengumpulan data debit aktual dari flow meter atau neraca air pada setiap PKS.

UCO & Refinery Residues

Dengan skenario potensi UCO nasional 3,0 juta kiloliter/tahun dan pangsa penduduk Sumatera Utara sekitar 5.49%, proksi UCO provinsi adalah 0.165 juta kiloliter atau sekitar 165 ribu kiloliter/tahun. Angka ini berbeda dari survei ketersediaan karena mengasumsikan konsumsi dan perilaku pengumpulan per kapita yang seragam. Laporan Traction Energy Asia menunjukkan bahwa volume UCO dipengaruhi skala usaha, penyusutan selama penggorengan, standar penyimpanan, harga jual, dan hubungan dengan kolektor; karena itu proksi demografis sebaiknya hanya digunakan untuk menentukan kebutuhan survei, bukan untuk kontrak pasokan.

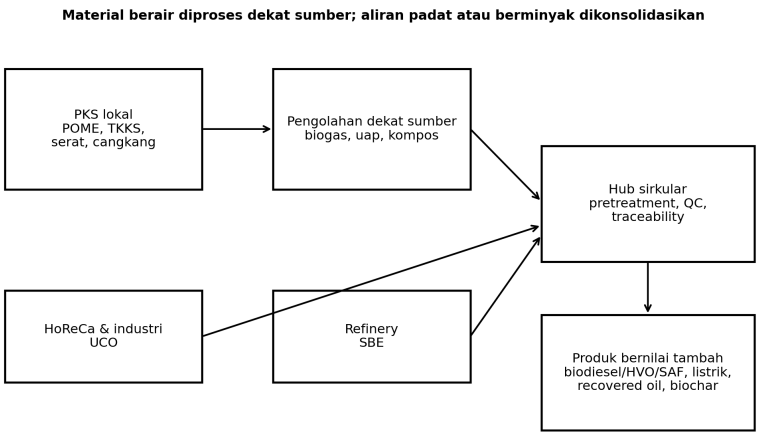
SBE merupakan residu pemurnian yang masih mengandung minyak. Penelitian ekstraksi refluks menunjukkan bahwa minyak dapat dipulihkan dari matriks bleaching earth, sehingga terbentuk dua aliran: recovered oil yang dapat diarahkan ke bahan bakar atau produk nonpangan, dan de-oiled bleaching earth yang memerlukan pengujian lebih lanjut sebelum dimanfaatkan. Keputusan teknologi harus mempertimbangkan kadar minyak, kadar air, karakteristik adsorben, kandungan logam, keselamatan pelarut, dan status regulasi limbah.

Waste-to-Value Pathways

Tabel 5. Jalur Pemanfaatan dan Faktor Pembatas Setiap Aliran

Aliran	Produk potensial	Keunggulan	Kendala utama
POME	Biogas, listrik/uap, digestate	Pengolahan dekat PKS; debit kontinu; penangkapan metana	Kualitas tidak stabil; CAPEX digester; operasi biologis
TKKS	Kompos, pellet, biochar, serat, bioetanol	Volume besar dan banyak opsi teknologi	Kadar air tinggi; bulky; penggunaan eksisting
Serat	Bahan bakar boiler, pellet, material	Umumnya tersedia di area PKS	Sebagian besar telah dipakai internal
Cangkang	Boiler, co-firing, karbon aktif	Kepadatan energi lebih tinggi dan mudah diperdagangkan	Kompetisi pasar dan variasi spesifikasi
UCO	UCOME, HVO, SAF, oleokimia nonpangan	Densitas energi tinggi; dapat dikonsolidasikan	Pasokan tersebar; adulterasi; traceability
SBE	Recovered oil, biodiesel, material setelah de-oiling	Mengurangi kehilangan minyak refinery	Keselamatan ekstraksi dan status residu padat

Sumber: Sintesis Siagian et al. (2024), Goh et al. (2025), dan Literatur Terkait



Gambar 3. Model Konseptual *Hub-And-Spoke* untuk Pengelolaan Residu Sawit
Sumber: Sintesis Penulis

Model hub-and-spoke memisahkan pengolahan awal dari pengolahan terpusat. POME, TKKS basah, dan sebagian serat diprioritaskan untuk konversi dekat sumber karena biaya pengangkutan air dan volume bulky tinggi. UCO, minyak pulihan SBE, cangkang, serta produk antara yang telah distabilkan dapat dikonsolidasikan menuju hub sirkular untuk pretreatment, pengendalian mutu, sertifikasi, dan konversi lanjutan. Arsitektur tersebut mengurangi kebutuhan mengangkut limbah berair sekaligus mempertahankan manfaat skala ekonomi pada aliran yang lebih bernilai.

Policy & Decarbonization Context

Penerapan B40 sejak 1 Januari 2025 meningkatkan kebutuhan biodiesel nasional dan memperkuat insentif untuk diversifikasi bahan baku. Kebijakan ekspor produk turunan sawit juga berubah melalui Peraturan Menteri Perdagangan Nomor 26 Tahun 2024 yang kemudian diubah dengan Peraturan Menteri Perdagangan Nomor 2 Tahun 2025. Bagi pengembang proyek, dinamika kebijakan ini menegaskan pentingnya analisis kepatuhan, klasifikasi komoditas, neraca massa, dan traceability sebelum menetapkan model bisnis UCO, POME oil, atau residu lainnya.

Dari sisi iklim, kajian Goh et al. (2025) melaporkan bahwa integrasi praktik bioekonomi sirkular dapat menurunkan emisi GRK industri hingga sekitar 30%, sementara perbaikan pengelolaan POME berpotensi mengurangi emisi metana secara substansial. Angka global tersebut tidak dapat langsung dikalikan dengan timbulan Sumatera Utara. Reduksi emisi proyek harus dihitung menggunakan baseline yang jelas, faktor emisi yang sesuai, efisiensi penangkapan metana, penggunaan energi, kebocoran, pemanfaatan digestate, dan transportasi bahan baku.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa skala teoritis residu sawit Sumatera Utara berada pada orde jutaan ton dan jutaan meter kubik per tahun. Besarnya potensi tersebut mendukung argumen bahwa pengelolaan residu bukan sekadar isu pengendalian pencemaran, melainkan bagian dari strategi industri dan energi. Namun, nilai teoritis tidak sama dengan feedstock bankable. Untuk menjadi dasar investasi, setiap aliran harus dikonversi menjadi tiga lapis data: timbulan bruto, pemakaian eksisting, dan surplus yang dapat dikontrak secara berkelanjutan.

POME merupakan contoh paling jelas. Volume besar dan kandungan organiknya mendukung produksi biogas, tetapi kadar air tinggi membuat pengangkutan POME mentah tidak rasional. Studi pembanding pada PKS PT Fajar Saudara Kusuma di Kabupaten Sambas, Kalimantan Barat, menunjukkan keterkaitan antara debit POME

dan potensi listrik, tetapi artikel tersebut menggunakan notasi satuan output listrik yang perlu dibaca hati-hati. Karena itu, penelitian ini tidak mengekstrapolasi angka listrik studi tersebut ke Sumatera Utara. Pendekatan yang lebih kuat adalah mengukur COD, BOD, debit harian, fraksi metana, efisiensi digester, dan kebutuhan listrik internal per PKS.

Untuk TKKS, serat, dan cangkang, strategi seharusnya menghindari penghitungan ganda. Serat dan cangkang lazim digunakan sebagai bahan bakar internal, sehingga proyek baru hanya dapat menggunakan surplus atau meningkatkan efisiensi sistem energi eksisting. TKKS mempunyai volume terbesar, tetapi kelembapan, biaya pencacahan, pengeringan, densifikasi, dan radius angkut menentukan nilai ekonominya. Produk berharga lebih tinggi seperti karbon aktif, biochar, serat, atau bahan kimia platform dapat meningkatkan nilai, tetapi biasanya membutuhkan kualitas bahan baku yang lebih ketat dan teknologi yang lebih kompleks dibanding pembakaran langsung.

UCO menawarkan karakter berbeda: volumenya lebih kecil, tetapi densitas energi dan nilai komersialnya lebih tinggi. Tantangan utama berada pada sisi tata niaga dan mutu, termasuk sumber yang tersebar, kontaminasi air dan padatan, kemungkinan pencampuran dengan minyak lain, serta lemahnya dokumentasi asal. Laporan Traction Energy Asia memperlihatkan perlunya jaringan kolektor, wadah tertutup, insentif, peran pemerintah daerah, dan sistem pencatatan. Survei primer Sumatera Utara perlu memisahkan rumah tangga, HoReCa, dan industri pangan karena ketiganya mempunyai pola timbulan dan kemampuan pengelolaan berbeda.

Secara spasial, hasil mendukung pengembangan klaster, bukan satu fasilitas yang menarik seluruh jenis limbah dari seluruh provinsi. PKS di Langkat, Simalungun, Asahan, Batu Bara, dan Labuhanbatu Raya dapat dikelompokkan berdasarkan jarak, kapasitas, akses jalan, jaringan listrik, serta kedekatan dengan refinery atau pelabuhan. Model GIS perlu memasukkan radius ekonomis yang berbeda untuk setiap bahan: POME sangat pendek, TKKS pendek-menengah setelah densifikasi, sedangkan UCO, cangkang, dan recovered oil dapat bergerak lebih jauh.

Secara kelembagaan, keberhasilan ekonomi sirkular memerlukan kontrak pasokan, spesifikasi mutu, skema pembagian nilai, dan pengawasan kepatuhan. Sertifikasi seperti ISCC atau skema rantai pasok lain membutuhkan bukti asal, neraca massa, pencegahan double counting, dan audit trail. Hal ini penting karena peningkatan permintaan bahan baku limbah dapat menciptakan risiko insentif salah, misalnya pengalihan produk primer menjadi seolah-olah limbah atau pencampuran bahan yang tidak memenuhi definisi.

Penelitian memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, produksi CPO provinsi tidak selalu identik dengan TBS yang berasal dari atau diproses seluruhnya di wilayah yang sama karena pergerakan bahan antarwilayah. Kedua, rasio neraca massa berasal dari literatur dan belum dikalibrasi terhadap teknologi PKS Sumatera Utara. Ketiga, proksi UCO berbasis penduduk mengabaikan struktur konsumsi dan kegiatan industri. Keempat, penelitian belum menghitung CAPEX, OPEX, harga produk, biaya karbon, ataupun emisi siklus hidup. Kelima, tidak tersedia inventaris SBE provinsi yang memungkinkan estimasi kuantitatif. Meskipun demikian, analisis rentang memberikan batas awal yang transparan dan dapat diperbarui saat data primer tersedia.

Tabel 6. Agenda Penelitian Lanjutan untuk Meningkatkan Kesiapan Investasi

Paket kerja	Data minimum	Keluaran
Inventaris PKS	Debit POME, OER, COD/BOD, TKKS, serat, cangkang, pemakaian internal	Neraca massa per pabrik
Pemetaan GIS	Koordinat, kapasitas, jalan, listrik, pelabuhan, radius angkut	Peta klaster dan lokasi optimum
Survei UCO	Rumah tangga, HoReCa, industri pangan, harga, mutu, kolektor	Kurva pasokan UCO yang dapat dikontrak
Karakterisasi SBE	Kadar minyak, air, logam, sifat adsorben, status limbah	Pilihan teknologi recovery dan residu akhir
LCA dan GHG	Baseline, energi, transportasi, methane capture, co-product	Reduksi emisi terverifikasi
Studi kelayakan	CAPEX, OPEX, harga, sensitivitas, risiko, sertifikasi	Keputusan investasi bertahap

Sumber: Sintesis Penulis

Kesimpulan

Produksi CPO Sumatera Utara sebesar 5,12 juta ton mengindikasikan pengolahan TBS sekitar 23,27–25,60 juta ton/tahun. Berdasarkan rasio neraca massa, timbulan teoritis diperkirakan mencapai 5,12–5,89 juta ton TKKS, 3,03–3,46 juta ton serat, 1,28–1,54 juta ton cangkang, dan 15,13–17,92 juta m³ POME per tahun. Proksi demografis menunjukkan potensi UCO sekitar 165 ribu kiloliter/tahun, tetapi angka tersebut memerlukan validasi survei. POME dan biomassa basah sebaiknya diolah dekat sumber, sedangkan UCO, cangkang, dan minyak pulihan SBE dapat dikonsolidasikan pada hub sirkular yang mempunyai pretreatment, pengendalian mutu, traceability, dan fasilitas konversi lanjutan. Potensi sumber daya yang besar belum otomatis menjadi pasokan layak investasi; diperlukan inventaris per pabrik, pemetaan spasial, karakterisasi bahan, analisis logistik, studi kelayakan, dan LCA. Penelitian ini menyediakan batas kuantitatif awal sekaligus kerangka prioritas pengumpulan data untuk mengembangkan ekonomi sirkular sawit Sumatera Utara secara bertahap, terukur, dan dapat diaudit.

Daftar Pustaka

Awoh, E. T., Kamarudin, S. K., & Daud, W. R. W. (2023). Current trends in palm oil waste management: A comparative review. Environmental Science and Pollution Research, 30, 104353–104377.

Badan Pusat Statistik. (2025). Statistik tanaman perkebunan tahunan Indonesia 2024: Kelapa sawit, kopi, kakao, karet, teh, dan komoditas perkebunan unggulan. BPS-Statistics Indonesia.

Badan Pusat Statistik Provinsi Sumatera Utara. (2025). Ekonomi Sumatera Utara triwulan IV-2024 tumbuh 5,10 persen (y-on-y). BPS Provinsi Sumatera Utara.

Foong, S. Y., Chan, Y. H., Lock, S. S. M., Chin, B. L. F., Yiin, C. L., Cheah, K. W., Loy, A. C. M., Yek, P. N. Y., Chong, W. W. F., & Lam, S. S. (2023). Microwave processing of oil palm wastes for bioenergy production and circular economy: Recent advancements, challenges, and future prospects. Bioresource Technology, 369, 128478. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128478

Goh, K. C., Kurniawan, T. A., AlSultan, G. A., Othman, M. H. D., Anouzla, A., Aziz, F., Ali, I., Casila, J. C. C., Khan, M. I., Zhang, D., Onn, C. W., Seow, T. W., & Shafii, H. (2025). Innovative circular bioeconomy and decarbonization approaches in

palm oil waste management: A review. Process Safety and Environmental Protection, 195, 106746. https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.12.127

Harahap, F., Leduc, S., Mesfun, S., Khatiwada, D., Kraxner, F., & Silveira, S. (2019). Opportunities to optimize the palm oil supply chain in Sumatra, Indonesia. Energies, 12(3), 420. https://doi.org/10.3390/en12030420

Hidayat, M. S., Hasibuan, A., Harahap, B., & Nasution, S. P. (2022). Pemanfaatan tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan pupuk di PT Karya Hevea Indonesia. Factory: Jurnal Industri, Manajemen dan Rekayasa Sistem Industri, 1(2), 51–58.

Irwansyah, W. Y. (2018). Potensi pemanfaatan Palm Oil Mill Effluent (POME) sebagai bahan baku pembangkit listrik tenaga biogas (PLTBg) di PKS PT Fajar Saudara Kusuma. Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology, 6(1). https://doi.org/10.26418/j3eit.v6i1.30314

Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. (2025). Mandatori B40 berlaku 1 Januari 2025. Kementerian ESDM.

Kementerian Perdagangan Republik Indonesia. (2025). Peraturan Menteri Perdagangan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2025 tentang perubahan atas Peraturan Menteri Perdagangan Nomor 26 Tahun 2024 tentang ketentuan ekspor produk turunan kelapa sawit.

Mohammad, S., Baidurah, S., Kobayashi, T., Ismail, N., & Leh, C. P. (2021). Palm oil mill effluent treatment processes—A review. Processes, 9(5), 739. https://doi.org/10.3390/pr9050739

Pemerintah Provinsi Sumatera Utara. (2020). Peraturan Gubernur Sumatera Utara Nomor 14 Tahun 2020 tentang Rencana Aksi Provinsi Perkebunan Kelapa Sawit Berkelanjutan Provinsi Sumatera Utara Tahun 2020–2024.

Siagian, U. W. R., Wenten, I. G., & Khoiruddin. (2024). Circular economy approaches in the palm oil industry: Enhancing profitability through waste reduction and product diversification. Journal of Engineering and Technological Sciences, 56(1), 25–49. https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2024.56.1.3

Sulaiman, F., Abdullah, N., Gerhauser, H., & Shariff, A. (2011). An outlook of Malaysian energy, oil palm industry and its utilization of wastes as useful resources. Biomass and Bioenergy, 35(9), 3775–3786. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.06.018

Suksaroj, C., Jearat, K., Cherypiew, N., Rattanapan, C., & Suksaroj, T. T. (2023). Promoting circular economy in the palm oil industry through biogas codigestion of palm oil mill effluent and empty fruit bunch pressed wastewater. Water, 15(12), 2153. https://doi.org/10.3390/w15122153

Traction Energy Asia. (2024). Used cooking oil availability and collection models in Indonesia for used cooking oil as a biofuel feedstock. Traction Energy Asia.

Utami, S., & Indrasti, N. S. (2020). Pemulihan minyak sawit dari spent bleaching earth dengan metode ekstraksi refluks. Jurnal Teknologi Industri Pertanian, 30(1), 90–99. https://doi.org/10.24961/j.tek.ind.pert.2020.30.1.90

Waudby, H., & Zein, S. H. (2021). A circular economy approach for industrial scale biodiesel production from palm oil mill effluent using microwave heating: Design, simulation, techno-economic analysis and location comparison. Process Safety and Environmental Protection, 148, 1006–1018. https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.02.003

Yeo, J. Y. J., How, B. S., Teng, S. Y., Leong, W. D., Ng, W. P. Q., Lim, C. H., Ngan, S. L., Sunarso, J., & Lam, H. L. (2020). Synthesis of sustainable circular economy in palm oil industry using graph-theoretic method. Sustainability, 12(19), 8081. https://doi.org/10.3390/su12198081