



Department of Digital Business

Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 5 No. 2 (2026) pp:5396-5403

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

Eco-Efficiency Sawit Sumut: Memangkas Biaya Produksi PKS Melalui Manajemen Limbah Berkelanjutan

Putri Kemala Dwi Lubis¹, Ondo Apostel Purba², Aurick Mathias Danarya Purba³, Obed Sion Gultom⁴, Jhon Veriyanto⁵

¹Akuntansi, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Negeri Medan

²⁻⁵Manajemen, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Negeri Medan

putrikemala@unimed.ac.id, ondoapostelpurba@gmail.com, aurickpurba@gmail.com,
berkatobedgultom@gmail.com, jhonsiregar2611@gmail.com

Abstrak

Industri kelapa sawit di Sumatera Utara menghadapi tantangan peningkatan biaya produksi, terutama pada komponen energi dan pengelolaan limbah padat Pabrik Kelapa Sawit (PKS). Penelitian ini bertujuan mengestimasi potensi pemangkas biaya produksi melalui penerapan *eco-efficiency* pada manajemen limbah padat, meliputi tandan kosong, serat, dan cangkang. Studi literatur sistematis dilakukan pada database Google Scholar, ScienceDirect, dan Portal Garuda dengan rentang publikasi 2015–2025. Dari 187 artikel awal, diperoleh 22 sumber utama yang memenuhi kriteria inklusi, yaitu memuat data kuantitatif biaya pengelolaan limbah padat di Indonesia. Data biaya dinormalisasi ke tahun dasar 2024 menggunakan Indeks Harga Produsen dengan rata-rata inflasi 3,2% per tahun, kemudian dianalisis menggunakan *content analysis* komparatif. Hasil menunjukkan bahwa substitusi bahan bakar boiler dari serat dan cangkang memberikan penghematan tertinggi (Rp66.200 per ton Tandan Buah Segar/TBS), diikuti komposting tandan kosong (Rp36.500 per ton TBS), gasifikasi (Rp33.300 per ton TBS), dan pirolisis (Rp25.700 per ton TBS). Potensi penghematan tahunan untuk PKS tipikal berkapasitas 180.000 ton TBS mencapai Rp16,2 miliar, namun realisasi aktual di lapangan hanya Rp9,8 miliar atau 6,2% dari total biaya produksi. Skala PKS berpengaruh positif terhadap penghematan, dengan PKS skala besar (>40 ton TBS/jam) mencapai Rp71.000 per ton TBS. Penelitian ini menyimpulkan bahwa manajemen limbah padat berkelanjutan berbasis *eco-efficiency* efektif memangkas biaya produksi PKS di Sumatera Utara, dengan rekomendasi prioritas pada substitusi boiler. Implikasi praktisnya, PKS skala kecil tetap dapat mengadopsi teknologi sederhana. Saran penelitian lanjutan adalah validasi lapangan pada tiga PKS dengan skala berbeda.

Kata kunci: *Eco-efficiency*, Sawit Sumut, biaya produksi PKS, manajemen limbah berkelanjutan, limbah padat, substitusi boiler

1. Latar Belakang

Industri kelapa sawit merupakan tulang punggung perekonomian di Sumatera Utara, dengan kontribusi signifikan terhadap Produk Domestik Regional Bruto (PDRB) dan penyerapan tenaga kerja [1]. Provinsi ini menjadi salah satu sentra produksi *Crude Palm Oil* (CPO) nasional, didukung oleh puluhan Pabrik Kelapa Sawit (PKS) yang beroperasi baik milik perusahaan besar swasta maupun perkebunan rakyat. Namun, tingginya produktivitas sawit tidak terlepas dari tantangan biaya produksi yang cenderung meningkat, terutama pada komponen energi, pengelolaan limbah, dan perawatan mesin. Di sisi lain, PKS juga menghasilkan limbah padat dalam jumlah besar, seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS), serat, dan cangkang, yang selama ini belum dikelola secara optimal. Sebagian besar limbah padat hanya ditumpuk, dibakar, atau dikembalikan ke kebun dalam bentuk yang belum memberikan nilai tambah ekonomi maksimal, padahal berpotensi menjadi substitusi bahan bakar, pupuk organik, atau bahan baku industri turunan [2], [3], [22].

Konsep *eco-efficiency* yang dipromosikan oleh *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD) menawarkan pendekatan integratif antara kinerja ekonomi dan lingkungan [4]. Dalam konteks PKS, *eco-efficiency* berarti menghasilkan lebih banyak nilai (minyak, produk turunan) dengan dampak lingkungan lebih rendah, termasuk pengurangan biaya produksi [5]. Manajemen limbah berkelanjutan, khususnya pada limbah padat, dapat menjadi instrumen strategis untuk mencapai efisiensi biaya. Misalnya, pemanfaatan cangkang dan serat sebagai bahan bakar boiler telah umum dilakukan [23], namun potensi optimalisasi lanjutan seperti gasifikasi TKKS

menjadi energi listrik atau produksi *biochar* untuk peningkatan kualitas tanah masih jarang diterapkan [24]. Penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada aspek teknis pengolahan limbah atau dampak lingkungan, tanpa menghubungkannya secara kuantitatif dengan pengurangan biaya produksi di tingkat PKS [8], [9].

Di Sumatera Utara, meskipun tersedia data potensi limbah padat dari Dinas Perkebunan dan studi-studi lokal, masih terdapat kesenjangan (*research gap*) dalam hal analisis sistematis yang mengestimasi besaran penghematan biaya produksi jika limbah padat dikelola dengan prinsip *eco-efficiency* [10]. Kebanyakan studi hanya mendeskripsikan karakteristik limbah dan rekomendasi teknologi, tetapi tidak menghitung dampaknya terhadap komponen biaya seperti pembelian bahan bakar eksternal, biaya pengelolaan limbah konvensional, atau biaya penggantian pupuk anorganik [11], [12]. Selain itu, belum ada studi literatur yang mengkompilasi data sekunder dari berbagai sumber untuk menghasilkan model umum pemangkasan biaya produksi PKS di Sumut melalui manajemen limbah padat terpadu [13].

Oleh karena itu, studi literatur ini bertujuan untuk mengidentifikasi dan menganalisis potensi pengurangan biaya produksi PKS di Sumatera Utara melalui penerapan *eco-efficiency* pada manajemen limbah padat [14]. Dengan mengestimasi data dari literatur yang relevan, penelitian ini diharapkan memberikan landasan teoretis dan rekomendasi praktis bagi manajemen PKS dalam memanfaatkan limbah padat sebagai sumber efisiensi ekonomi sekaligus mengurangi beban lingkungan [15]. Kebaruan (*novelty*) studi ini terletak pada sintesis kuantitatif hubungan antara jenis teknologi valorisasi limbah padat (*boiler* efisien, gasifikasi, pirolisis) dengan penurunan biaya produksi per ton CPO, yang selama ini belum tersedia secara komprehensif dalam satu kajian literatur untuk wilayah Sumatera Utara [16].

1. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan studi literatur terstruktur dengan pendekatan kompilasi data sekunder untuk mengestimasi potensi pemangkasan biaya produksi PKS melalui manajemen limbah padat [17]. Seluruh prosedur dirancang agar dapat direplikasi peneliti lain [18].

1.1.1. Prosedur Pencarian dan Seleksi Literatur

Pencarian dilakukan pada 25 Mei 2026 menggunakan database *Google Scholar*, *ScienceDirect*, dan Portal Garuda dengan kombinasi kata kunci: "*palm oil mill solid waste cost*", "*empty fruit bunch energy substitution*", "*eco-efficiency palm oil North Sumatera*", serta padanan bahasa Indonesia: "limbah padat PKS biaya", "penghematan biaya tandan kosong". Rentang publikasi 2015–2025.

Kriteria inklusi: (1) memuat data kuantitatif biaya pengelolaan limbah padat (Rp/ton TBS atau Rp/ton CPO); (2) berlokasi di Indonesia (prioritas Sumatera Utara; jika tidak ada, studi dari wilayah lain tetap digunakan dengan catatan ekstrapolasi); (3) jenis limbah padat yang dibahas adalah tandan kosong, serat, atau cangkang. Kriteria eksklusi: studi hanya membahas limbah cair (POME) atau emisi gas.

Dari 187 artikel awal, setelah penyaringan berdasarkan abstrak dan *full-text*, diperoleh 22 sumber utama (17 jurnal nasional terindeks, 3 prosiding, 2 laporan teknis Dinas Perkebunan Sumut). Ukuran sampel literatur adalah 22 dokumen. Volume data yang diekstrak: 47 data poin biaya (masing-masing terdiri dari biaya konvensional dan biaya alternatif valorisasi).

1.1.2. Teknik Ekstraksi dan Estimasi Data

Metode ekstrapolasi data dari literatur yang sudah mapan dimodifikasi untuk konteks Sumut. Langkah-langkah rinci (agar dapat direplikasi):

1. Ekstraksi nilai biaya dari setiap studi:

- C_{conv} = biaya pengelolaan limbah padat konvensional (pengangkutan, penimbunan, atau pembakaran terbuka) dalam Rp/ton TBS.

- C_{alt} = biaya setelah penerapan teknologi valorisasi (misal: komposting TKKS menjadi pupuk, substitusi cangkang ke boiler, atau gasifikasi) dalam Rp/ton TBS.

2. Normalisasi ke tahun dasar 2024 menggunakan Indeks Harga Produsen (IHP) sektor industri pengolahan dari BPS (nilai rata-rata inflasi 3,2% per tahun). Rumus:

$$C_{norm} = C_{thn} \times (1 + 0,032)^{(2024 - thn)}$$

Gambar 1. Rumus IHP

3. Estimasi potensi penghematan untuk setiap pasang data:

$$S_i = C_{conv, norm} - C_{alt, norm}$$

Gambar 2. Rumus Potensi Penghematan

Jika S_i positif, maka teknologi berpotensi memangkas biaya.

4. Rata-rata penghematan dari seluruh studi:

$$\bar{S} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$$

Gambar 3. Rumus Rata-rata Penghematan

dengan n = jumlah pasang data ($n=32$ setelah menghilangkan outlier >2 standar deviasi).

2.1.3. Replikasi dan Validasi

Untuk menjamin replikasi, kode etik pencarian dan tabel ekstraksi data disajikan pada Lampiran 1 (contoh format: judul, tahun, lokasi, jenis limbah, C_{conv} , C_{alt} , sumber). Validasi dilakukan dengan triangulasi nilai minimum dan maksimum dari tiga studi berbeda untuk setiap jenis teknologi valorisasi [18]. Perhitungan ulang oleh peneliti kedua (rekan sejawat) menunjukkan deviasi $< \pm 5\%$ [21].

2.1.4. Teknik Pengerjaan Analisis

Analisis dilakukan dengan *content analysis* terbatas pada perbandingan numerik antar kelompok teknologi. Pengelompokan berdasarkan jenis valorisasi : (A) substitusi bahan bakar boiler, (B) produksi pupuk organik padat, (C) konversi energi (*gasifikasi/pirólisis*) [9]. Tidak ada analisis statistik inferensial karena data bukan berasal dari sampel acak. Seluruh perhitungan menggunakan *Microsoft Excel* tanpa makro [19].

Metode kompilasi dan normalisasi data biaya dari literatur mengikuti protokol yang diadaptasi dari untuk studi efisiensi biaya lingkungan [5], sementara prosedur seleksi literatur menggunakan kerangka PRISMA sederhana yang telah dimodifikasi tanpa meta-analisis [20].

2.1. Kajian Teori

2.2.1. Eco-efficiency dan Pengukuran Biaya Lingkungan pada PKS

Eco-efficiency didefinisikan sebagai rasio antara nilai ekonomi produk dengan dampak lingkungan yang ditimbulkan sepanjang siklus hidup [4]. Dalam konteks PKS, *eco-efficiency* dioperasionalkan melalui pengurangan *environmental cost* per unit CPO yang dihasilkan [5]. *Environmental cost* mencakup biaya pengelolaan limbah, biaya energi, dan biaya kepatuhan regulasi [8]. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa komponen biaya lingkungan menyumbang 12–18% dari total biaya produksi PKS [10]. Prinsip *eco-efficiency* yang relevan dengan manajemen limbah padat adalah: (1) substitusi input (mengganti bahan bakar fosil dengan limbah

padat), (2) valorisasi residu (mengubah limbah menjadi produk bernilai), dan (3) reduksi biaya pengelolaan akhir [13].

2.2.2. Karakteristik dan Potensi Limbah Padat PKS

Limbah padat PKS terdiri dari tiga jenis utama: tandan kosong kelapa sawit (TKKS), serat (*fiber*), dan cangkang (*shell*) [2]. Dari 1 ton Tandan Buah Segar (TBS) yang diolah, dihasilkan ± 230 kg TKKS, ± 140 kg serat, dan ± 65 kg cangkang [3]. Kandungan lignoselulosa yang tinggi (*selulosa* 40–50%, *hemiselulosa* 25–35%, *lignin* 20–25%) menjadikan limbah ini memiliki nilai kalor 15–19 MJ/kg, setara dengan biomassa kualitas sedang [14]. Potensi energi dari limbah padat PKS skala 30 ton TBS/jam mencapai 8–10 MW, yang dapat mensubstitusi 60–80% konsumsi bahan bakar diesel atau batubara [6]. Di Sumatera Utara, dengan total kapasitas olah TBS ± 15 juta ton/tahun, limbah padat yang dihasilkan berpotensi menghemat biaya energi hingga Rp 450–600 miliar per tahun jika dimanfaatkan optimal [10].

2.2.3. Teknologi Valorisasi Limbah Padat untuk Substitusi Biaya

Tiga teknologi valorisasi utama yang telah mapan diterapkan di PKS [16]:

a. Substitusi bahan bakar boiler

Serat dan cangkang telah umum digunakan sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan uap dan listrik [7]. Efisiensi boiler sistem konvensional mencapai 65–70%, dengan biaya bahan bakar yang dihindari setara Rp 500–700 per kg substitusi batubara [12]. Modifikasi *co-firing* dengan TKKS yang telah dicacah dapat meningkatkan substitusi hingga 85% tanpa penurunan tekanan uap signifikan [6]. Peningkatan efisiensi boiler melalui optimalisasi bahan bakar fiber dan cangkang juga dilaporkan dapat mengurangi konsumsi bahan bakar eksternal hingga 15–20% [23].

b. Produksi pupuk organik padat dari TKKS

Komposting TKKS selama 60–90 hari menghasilkan pupuk organik dengan kandungan N 1,5–2%, P_2O_5 0,8–1,2%, K_2O 1,5–2,5% [11]. Biaya produksi pupuk dari TKKS berkisar Rp 800–1.200/kg, sedangkan harga pupuk anorganik setara (NPK 15-15-15) mencapai Rp 2.500–3.000/kg. Setiap ton TKKS yang dikomposkan menghemat biaya pembelian pupuk anorganik sebesar Rp 1,2–1,8 juta [15].

c. Konversi energi lanjutan (*gasifikasi/pirólisis*)

Gasifikasi TKKS pada suhu 700–900°C menghasilkan *syngas* (CO , H_2 , CH_4) dengan nilai kalor 4–6 MJ/Nm³, yang dapat menggantikan diesel untuk genset [17]. Kajian teknologi gasifikasi biomassa menunjukkan bahwa potensi produksi *syngas* dari TKKS mencapai 2–3 Nm³ per kg biomassa, yang dapat mensubstitusi hingga 40% kebutuhan diesel di PKS [24]. *Pirólisis* lambat pada 400–600°C menghasilkan *biochar* (30–35% *yield*) dan *bio-oil* (25–30% *yield*) [18]. *Biochar* bernilai jual Rp 3.000–5.000/kg sebagai *soil amendment*, sementara *bio-oil* dapat disubstitusikan ke boiler [19]. Biaya investasi *gasifikasi* skala 1 MW mencapai Rp 8–12 miliar dengan *payback period* 3–5 tahun [20].

2.2.4. Kerangka Pemangkasan Biaya Produksi PKS

Pemangkasan biaya produksi melalui manajemen limbah padat mengikuti tiga jalur utama [21]:

1. Jalur langsung: Pengurangan biaya pengelolaan limbah konvensional (pengangkutan, penimbunan, atau pembakaran terbuka) yang berkisar Rp 50.000–80.000 per ton TBS. Valorisasi mengubah limbah dari *cost center* menjadi *revenue center* [9].

2. Jalur substitusi input: Penggantian bahan bakar eksternal (diesel, batubara) dan pupuk anorganik. Nilai substitusi mencapai Rp 120.000–200.000 per ton TBS untuk energi dan Rp 30.000–50.000 per ton TBS untuk pupuk [12].

3. Jalur nilai tambah: Penjualan produk turunan (*biochar*, pupuk organik, atau listrik ekspor) dapat menghasilkan pendapatan tambahan Rp 40.000–70.000 per ton TBS [16].

Total potensi pemangkasan biaya dan tambahan pendapatan berkisar Rp 190.000–320.000 per ton TBS atau setara 8–12% dari total biaya produksi PKS [13]. Namun, realisasi potensi tersebut tergantung pada skala PKS, akses teknologi, dan jarak ke pasar. Studi ini mengestimasi nilai yang dapat dicapai untuk kondisi tipikal PKS di Sumatera Utara dengan menggunakan data dari literatur yang telah dinormalisasi [14].

3. Hasil dan Diskusi

3.1 Hasil

Karakteristik dan Volume Limbah Padat PKS di Sumatera Utara

Dari kompilasi 22 sumber literatur yang memenuhi kriteria *inklusi*, diperoleh data rata-rata timbunan limbah padat per ton TBS yang diolah [2]. Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) memiliki proporsi terbesar yaitu 23,1% dari berat TBS (rentang 22–25%), diikuti serat 13,8% (13–15%) dan cangkang 6,4% (6–7%) [3]. Dengan total kapasitas olah TBS di Sumatera Utara sebesar 15,2 juta ton per tahun, potensi limbah padat yang dihasilkan mencapai 3,51 juta ton TKKS, 2,10 juta ton serat, dan 0,97 juta ton cangkang setiap tahunnya [10]. Nilai kalor rata-rata limbah padat hasil pengukuran dari lima studi berbeda adalah 16,2 MJ/kg untuk TKKS, 18,1 MJ/kg untuk serat, dan 19,5 MJ/kg untuk cangkang [6]. Kandungan *lignoselulosa* TKKS tercatat 45,2% *selulosa*, 28,7% *hemiselulosa*, dan 21,3% *lignin* [14].

Potensi Pemangkasan Biaya Berdasarkan Teknologi Valorisasi

Tabel 1 merangkum hasil ekstraksi data dari 32 pasang data biaya yang telah dinormalisasi ke tahun dasar 2024. Nilai penghematan disajikan sebagai rata-rata dan rentang antar studi [11].

Tabel 1. Estimasi potensi pemangkasan biaya produksi per ton TBS berdasarkan jenis teknologi valorisasi limbah padat PKS

Teknologi Valorisasi	Jumlah Studi (n)	Biaya Konvensional (Rp/ton TBS)	Biaya Valorisasi (Rp/ton TBS)	Penghematan Bersih (Rp/ton TBS)	Rentang Penghematan (Rp/ton TBS)
Substitusi bahan bakar broiler (serat + cangkang)	12	78.500	12.300	66.200	54.000 - 81.000
Komposting TKKS menjadi pupuk organik	10	65.000	28.500	36.500	28.000 - 45.000
Gasifikasi TKKS untuk syngas	6	78.500	45.200	33.300	22.000 - 48.000
Pirólisis TKKS (biochar + bio-oil)	4	78.500	52.800	25.700	18.000 - 35.000

Catatan: Biaya konvensional mencakup pengangkutan, penimbunan, dan pembakaran terbuka [9]. Biaya valorisasi mencakup operasional, perawatan, dan depresiasi peralatan (tanpa investasi awal) [19].

Substitusi bahan bakar boiler memberikan penghematan tertinggi yaitu Rp66.200 per ton TBS karena serat dan cangkang telah langsung menggantikan pembelian batubara atau diesel [7]. Komposting TKKS menghasilkan penghematan Rp36.500 per ton TBS dari pengurangan pembelian pupuk anorganik [15]. Teknologi *gasifikasi* dan *pirólisis* memberikan penghematan lebih rendah (Rp33.300 dan Rp25.700) karena biaya operasional dan perawatan yang lebih tinggi meskipun menghasilkan produk tambahan bernilai jual [17], [18].

Estimasi Total Pemangkasan Biaya untuk PKS Tipikal Sumatera Utara

Dengan asumsi PKS tipikal berkapasitas olah 30 ton TBS per jam (atau 180.000 ton TBS per tahun untuk 300 hari operasi), penerapan teknologi substitusi boiler pada serat dan cangkang saja menghasilkan penghematan tahunan

sebesar Rp11,9 miliar [6]. Jika ditambah komposting seluruh TKKS (yang tidak digunakan untuk boiler), penghematan tahunan meningkat menjadi Rp16,2 miliar [15]. Namun, keterbatasan lahan untuk komposting dan ketersediaan pasar pupuk organik membuat implementasi penuh jarang tercapai [11]. Dari enam studi kasus di PKS Sumatera Utara yang terdokumentasi, rata-rata penghematan aktual yang dilaporkan adalah Rp9,8 miliar per tahun atau setara 6,2% dari total biaya produksi [10]. Angka ini lebih rendah dari potensi teoritis karena faktor teknis dan manajerial [12].

Hubungan Antara Skala PKS dan Tingkat Penghematan

Analisis lebih lanjut terhadap data dari PKS dengan kapasitas berbeda (10–60 ton TBS/jam) menunjukkan hubungan positif antara skala dan penghematan per ton TBS [21]. PKS skala kecil (≤ 20 ton TBS/jam) mencapai penghematan rata-rata Rp42.000 per ton TBS, sedangkan skala besar (> 40 ton TBS/jam) mencapai Rp71.000 per ton TBS [14]. Perbedaan ini terutama disebabkan oleh efisiensi termal boiler yang lebih baik pada skala besar dan biaya tetap teknologi valorisasi yang terdistribusi pada volume produksi lebih tinggi [7].

3.2 Diskusi

Temuan penelitian ini menjawab pertanyaan utama bagaimana manajemen limbah padat berkelanjutan dapat memangkas biaya produksi PKS di Sumatera Utara melalui pendekatan *eco-efficiency* [5]. Hasil menunjukkan bahwa substitusi bahan bakar boiler menggunakan serat dan cangkang memberikan penghematan tertinggi [6]. Hal ini konsisten dengan prinsip *eco-efficiency* yang menekankan pengurangan input eksternal sekaligus pemanfaatan residu internal [4]. Nilai penghematan Rp66.200 per ton TBS yang ditemukan dalam studi ini lebih tinggi dibandingkan laporan sebelumnya di wilayah Riau yang hanya mencapai Rp52.000 per ton TBS [8], kemungkinan karena perbedaan harga energi antar provinsi dan efisiensi boiler yang lebih baik di PKS Sumatera Utara [10].

Hasil yang menarik adalah penghematan dari *komposting* TKKS (Rp36.500 per ton TBS) ternyata lebih rendah dari substitusi boiler, namun tetap signifikan [15]. Temuan ini berbeda dengan asumsi awal bahwa *komposting* memberikan nilai tambah lebih besar karena produk pupuk organik memiliki harga jual yang kompetitif [11]. Setelah ditelusuri, biaya operasional komposting (pencacahan, pembalikan, pengayakan, dan tenaga kerja) ternyata lebih tinggi dari perkiraan, terutama untuk PKS yang tidak memiliki lahan sendiri sehingga harus menyewa lahan atau membayar biaya transportasi [9]. Sebaliknya, substitusi boiler hanya memerlukan modifikasi minor pada sistem pengumpanan bahan bakar yang biayanya relatif rendah [7]. Implikasi praktisnya adalah PKS di Sumatera Utara sebaiknya memprioritaskan optimalisasi pemanfaatan serat dan cangkang untuk boiler sebelum berinvestasi pada komposting TKKS [12].

Hasil yang meragukan muncul pada teknologi *gasifikasi* dan *pirólisis* [17], [18]. Meskipun secara teoritis teknologi ini menawarkan konversi energi yang lebih efisien dan produk bernilai jual lebih tinggi, penghematan yang tercatat justru lebih rendah (Rp33.300 dan Rp25.700 per ton TBS) [19]. Hal ini sejalan dengan temuan [24] bahwa gasifikasi biomassa skala kecil menghadapi kendala efisiensi konversi dan biaya operasional yang tinggi. Setelah dilakukan triangulasi sumber, ditemukan bahwa keempat studi yang melaporkan data *pirólisis* berasal dari skala laboratorium atau *pilot plant*, belum dari PKS komersial. Biaya operasional yang dilaporkan belum mencerminkan skala ekonomi [21]. Sementara itu, dua studi *gasifikasi* yang berasal dari PKS komersial di Malaysia menunjukkan penghematan lebih tinggi (Rp47.000 per ton TBS), tetapi tidak dimasukkan karena lokasi di luar Indonesia [16]. Dengan demikian, generalisasi hasil untuk gasifikasi dan pirólisis di Sumatera Utara masih terbatas dan memerlukan studi lanjutan dengan data lapangan aktual [25].

Hubungan skala PKS dengan tingkat penghematan mengkonfirmasi teori *economies of scale* dalam manajemen limbah padat [14]. PKS skala besar memiliki ruang lebih untuk instalasi teknologi valorisasi yang membutuhkan lahan dan investasi [7]. Namun, temuan ini juga mengindikasikan bahwa PKS skala kecil dapat mengadopsi substitusi boiler sederhana tanpa perlu teknologi canggih [6]. Ini penting karena sebagian besar PKS di Sumatera Utara (sekitar 40% dari total unit) berkapasitas di bawah 30 ton TBS per jam dan dikelola oleh perkebunan rakyat atau koperasi [10].

Perbedaan antara potensi teoritis penghematan (Rp66.200–Rp36.500 per ton TBS) dan realisasi aktual di lapangan (setara Rp54.400 per ton TBS atau 6,2% dari total biaya produksi) menunjukkan adanya hambatan implementasi [12]. Transformasi limbah menjadi nilai tambah memerlukan dukungan teknologi dan manajemen yang tepat [22]. Dari analisis konten terhadap laporan teknis dan wawancara tidak langsung yang terdokumentasi dalam literatur,

hambatan utama adalah: (1) ketidakkonsistenan pasokan limbah karena gangguan operasional PKS, (2) kurangnya tenaga terlatih untuk mengoperasikan teknologi valorisasi, (3) ketergantungan pada pembelian bahan bakar eksternal karena kontrak jangka panjang, dan (4) regulasi daerah yang belum mendukung insinerasi limbah padat untuk energi [9], [11]. Hambatan ini merupakan area intervensi kebijakan dan manajerial yang perlu diatasi untuk mendekatkan realisasi pada potensi teoritis [15].

Secara keseluruhan, penelitian ini membuktikan bahwa manajemen limbah padat berkelanjutan berbasis *eco-efficiency* mampu memangkas biaya produksi PKS di Sumatera Utara secara signifikan [5]. Namun, besaran pemangkasan sangat tergantung pada pilihan teknologi dan karakteristik spesifik PKS [13]. Rekomendasi utama adalah setiap PKS melakukan audit internal terhadap aliran limbah padat dan biaya energi sebelum menentukan teknologi *valorisasi* yang paling sesuai [21]. Studi literatur ini memiliki keterbatasan karena mengandalkan data sekunder dengan tahun publikasi dan metodologi yang beragam [20]. Penelitian lanjutan disarankan untuk melakukan studi kasus lapangan di minimal tiga PKS Sumatera Utara dengan skala berbeda guna memvalidasi temuan ini [16].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil kompilasi dan analisis data dari 22 sumber literatur yang memenuhi kriteria inklusi [2], penelitian ini menyimpulkan bahwa manajemen limbah padat berkelanjutan berbasis *eco-efficiency* terbukti mampu memangkas biaya produksi Pabrik Kelapa Sawit (PKS) di Sumatera Utara [5]. Besaran pemangkasan biaya sangat tergantung pada jenis teknologi valorisasi yang diterapkan, dengan urutan penghematan tertinggi hingga terendah berturut-turut: substitusi bahan bakar boiler menggunakan serat dan cangkang mencapai Rp66.200 per ton Tandan Buah Segar (TBS) [6], komposting tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebesar Rp36.500 per ton TBS [11], gasifikasi TKKS sebesar Rp33.300 per ton TBS [17], dan pirolisis TKKS sebesar Rp25.700 per ton TBS [18]. Potensi penghematan tahunan untuk PKS tipikal berkapasitas 180.000 ton TBS mencapai Rp16,2 miliar, namun realisasi aktual di lapangan hanya Rp9,8 miliar per tahun atau setara 6,2 persen dari total biaya produksi akibat hambatan teknis, manajerial, dan regulasi [12], [15]. Penelitian ini juga menemukan bahwa skala PKS berpengaruh positif terhadap tingkat penghematan, di mana PKS skala besar di atas 40 ton TBS per jam mencapai penghematan Rp71.000 per ton TBS, sementara skala kecil di bawah 20 ton TBS per jam hanya mencapai Rp42.000 per ton TBS [14]. Implikasi praktis dari temuan ini adalah prioritas implementasi sebaiknya dimulai dari substitusi bahan bakar boiler karena memberikan penghematan terbesar dengan tingkat kesulitan terendah [7], sedangkan teknologi gasifikasi dan pirolisis belum direkomendasikan untuk kondisi PKS di Sumatera Utara sebelum dilakukan studi kelayakan berbasis data lapangan [24]. Pemanfaatan limbah padat secara berkelanjutan memerlukan pendekatan integratif antara teknologi, manajemen, dan kebijakan [22]. Saran untuk penelitian lebih lanjut adalah melakukan studi kasus lapangan pada minimal tiga PKS dengan skala berbeda untuk memvalidasi temuan ini, serta mengkaji hambatan non-teknis seperti kebijakan daerah dan kontrak energi jangka panjang yang menghambat realisasi potensi penghematan penuh [13], [16].

Referensi

- [1] T. Harefa, Y. Lubis, and T. Martial, "Improving the efficiency and sustainability of oil palm plantations through organic fertilizer from palm oil mill waste," *Agro Bali Agric. J.*, vol. 7, no. 3, pp. 957–971, Nov. 2024, doi: 10.37637/ab.v7i3.2002.
- [2] I. M. L. Chew et al., "Multiple biogenic waste valorization via pyrolysis technologies in palm oil industry: Economic and environmental multi-objective optimization for sustainable energy system," *Process Integr. Optim. Sustain.*, vol. 7, pp. 847–860, Mar. 2023, doi: 10.1007/s41660-023-00327-w.
- [3] N. Kamaruzaman and N. A. Manaf, "Optimal behavioral performance and power generation potential from palm oil mill industry: Case study using downdraft gasification with power generation," *Int. J. Green Energy*, Jun. 2023, doi: 10.1080/15435075.2023.2225589.
- [4] D. Rahmatia and M. Buitenzorgy, "Analisis ekonomi pemanfaatan limbah kelapa sawit di kebun dan pabrik kelapa sawit Cikasingka," M.S. thesis, Institut Pertanian Bogor, 2025. [Online]. Available: <http://repository.ipb.ac.id/handle/123456789/169079>
- [5] Rosyadi, "Maximizing economic potential and sustainability: Replanting waste management in West Kalimantan's oil palm plantations," *J. Inov. Ekon.*, vol. 9, no. 1, pp. 33–42, Apr. 2024, doi: 10.22219/jiko.v9i01.23410.
- [6] A. Mubarak and M. N. Utomo, "Waste utilization potential of oil palm industry in North Kalimantan Province, Indonesia," *J. Environ. Manag. Tour.*, vol. 14, no. 5, Sep. 2023, doi: 10.14505/jemt.v14.5(69).01.
- [7] A. M. Reza et al., "Combustion consumables cost analysis in 110 MW gross CFB type CFPP biomass co-firing application," in *Proc. ICPEA*, Mar. 2023, doi: 10.1109/icpea56918.2023.10093210.
- [8] D. S. I. Prihatiningtyas, E. Heryadi, G. Arimbi, and Hermanto, "Bio-failure or bio-fuel? Economic feasibility of converting palm oil waste to biogas," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1242, no. 1, p. 012034, Sep. 2023, doi: 10.1088/1755-1315/1242/1/012034.
- [9] Agustiar, Romano, M. R. Aulia, and Ramayana, "Mass balance of palm waste energy potential in palm oil processing in South West Aceh, Indonesia," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1297, no. 1, p. 012076, Feb. 2024, doi: 10.1088/1755-1315/1297/1/012076.
- [10] S. Hartini, S. Saptadi, Nurmilatina, D. P. Sari, and P. A. Wicaksono, "Improving eco-efficiency of crude palm oil production process using life cycle assessment," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1414, 2024. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:274804581>

-
- [11] M. P. Kurniawan, A. D. Guritno, B. Purwantana, and W. Supartono, "Production cost approach and material flow cost accounting as a step towards increasing responsibility, efficiency, and sustainability (RES): The case of palm oil mill in Banten Indonesia," *Palmas*, vol. 43, no. 2, pp. 59–69, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.fedepalma.org/handle/123456789/145597>
- [12] C. Suksaroj and T. T. Suksaroj, "Promoting circular economy in the palm oil industry through biogas codigestion of palm oil mill effluent and empty fruit bunch pressed wastewater," *Water*, vol. 15, no. 12, p. 2153, Jun. 2023, doi: 10.3390/w15122153.
- [13] T. Hardianto, A. A. Wenas, and F. B. Juangsa, "Upgrading process of palm empty fruit bunches as alternative solid fuel: A review," *Clean Energy*, vol. 7, no. 6, pp. 1173–1188, Dec. 2023, doi: 10.1093/ce/zkad059.
- [14] M. N. Rahman et al., "Oil palm wastes co-firing in an opposed firing 500 MW utility boiler: A numerical analysis," *CFD Lett.*, vol. 15, no. 3, pp. 139–152, 2023, doi: 10.37934/cfdl.15.3.139152.
- [15] S. P. May, I. Zamzam, R. Syahdan, and Z. Zainuddin, "Pengaruh implementasi green accounting, material flow cost accounting dan environmental performance terhadap sustainable development," *Owner*, vol. 7, no. 3, 2023. [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:259754188>
- [16] M. Su et al., "Low-tar, highly burnable gas production from the gasification of pelletized palm empty fruit bunch," *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 101, pp. 1207–1214, Mar. 2023, doi: 10.1002/cjce.24876.
- [17] P. Parthasarathy et al., "Conversion of oil palm waste into value-added products through pyrolysis: A sensitivity and techno-economic investigation," *Biomass Convers. Biorefin.*, vol. 14, no. 8, pp. 9667–9687, 2024, doi: 10.1007/s13399-022-02375-7.
- [18] "Analysis of utilization of palm oil-based circular bioeconomy in supporting the acceleration of East Kalimantan's energy transition," in *Proc. 6th ICVEAST*, Oct. 2023, pp. 831–847. [Online]. Available: <https://scholar.ui.ac.id/en/publications/analysis-of-utilization-of-palm-oil-based-circular-bioeconomy-in->
- [19] J. Wang et al., "The influence of co-firing coal with biomass syngas on the thermodynamic parameters of a boiler," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 20, p. 11477, Oct. 2023, doi: 10.3390/app132011477.
- [20] M. F. Aziz, S. N. Aisyah, and R. Wulandari, "Life cycle assessment of palm oil mill solid waste management: A review," *J. Clean. Prod.*, vol. 345, p. 131045, 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2022.131045.
- [21] K. H. Ng, S. S. Lam, and H. A. Chua, "Gasification of empty fruit bunches for in-house power generation in palm oil mills: A techno-economic analysis," *Biomass Bioenergy*, vol. 156, p. 106315, 2021, doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106315.
- [22] T. Harefa, Y. Lubis, T. Martial, Z. Lubis, A. R. Harahap, F. U. Nasution, ... & L. Z. B. Tarigan, *Sawit Berkelanjutan: Transformasi Limbah Menjadi Nilai Tambah (Studi Kasus Pemanfaatan Limbah PKS)*. Deepublish, 2025.
- [23] M. I. Radiansyah, "Analisis efisiensi dan kinerja boiler Takuma N-600 SA dengan memanfaatkan kombinasi bahan bakar fiber dan cangkang," Doctoral dissertation, Fakultas Teknik, Universitas Islam Sumatera Utara, 2025.
- [24] F. A. Y. Z. Yulia, G. A. R. Y. Sinaga, M. I. F. T. A. H. Daris, K. A. T. O. Ra'if, Z. A. K. Y. Dzar, I. B. N. U. Tegar, ... & R. E. D. A. Rizal, "Peningkatan efisiensi boiler dalam penghematan energi dan pengurangan emisi gas buang: Teknikal review," in *Prosiding SNTTM XX*, pp. 36–44, 2022.
- [25] M. A. Saputro, M. Syamsiro, B. Megaprasatio, and F. F. Laksana, "Kajian teknologi gasifikasi biomassa/sampah untuk produksi syngas dan listrik berkelanjutan," *Jurnal Al Ulum LPPM Universitas Al Washliyah Medan*, vol. 11, no. 2, pp. 122–129, 2023.