



Kajian Integrasi Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa Berbasis Limbah Bauksit sebagai Substitusi Energi Fosil pada Operasional PT “X” Alumina Refinery, Kalimantan Barat

Integration Study of Bauxite Residue-Based Biomass Power Plant as Fossil Energy Substitution in PT “X” Alumina Refinery Operations, West Kalimantan

Dedy Setyo Oetomo^{1,*}, Rani Sri Wahyuni², Farliana Sutartiah¹

¹ Teknik Industri, STT Wastukancana, Purwakarta, Indonesia

² Teknik Informatika, STT Wastukancana, Purwakarta, Indonesia

Abstrak: Peningkatan konsumsi energi pada operasional industri alumina refinery mendorong kebutuhan diversifikasi sumber energi yang lebih berkelanjutan. PT “X” Alumina Refinery (PT.”X”) di Kalimantan Barat mengkonsumsi energi fosil dalam jumlah besar untuk proses Bayer yang meliputi tahap digestion, evaporation, dan calcination. Penelitian ini mengkaji potensi integrasi pembangkit listrik tenaga biomassa berbasis limbah bauksit (red mud dan bauksit oversize) serta biomassa lokal Kalimantan Barat (cangkang sawit, serbuk kayu, dan sekam) sebagai substitusi parsial energi fosil melalui teknologi co-firing dan gasifikasi. Kajian dilakukan dengan pendekatan analisis tekno-ekonomi menggunakan model matematis neraca energi, efisiensi termal, dan analisis biaya siklus hidup. Hasil kajian menunjukkan bahwa potensi energi total dari residu bauksit dan biomassa lokal mencapai 319.009 GJ/tahun dengan kapasitas pembangkitan ekuivalen 10,11 MW dalam radius operasional, dan 485.600 GJ/tahun (42,7 MW ekuivalen) dalam skala provinsi. Implementasi sistem co-firing 30% biomassa pada boiler eksisting dapat menurunkan konsumsi batubara sebesar 89.250 ton/tahun dan menghemat biaya energi bersih sebesar Rp 87,3 miliar per tahun. Kajian lingkungan menunjukkan penurunan emisi CO₂ sebesar 198.450 ton/tahun (63,8% dari total emisi baseline). Analisis kelayakan ekonomi menghasilkan NPV = Rp 412,8 miliar, IRR = 18,7%, dan payback period 5,3 tahun, membuktikan kelayakan finansial proyek ini serta kontribusinya terhadap target Net Zero Emission 2060 Indonesia.

Kata Kunci: Biomassa; Co-firing; Gasifikasi; Limbah Bauksit; Alumina Refinery; Kalimantan Barat; Energi Terbarukan

Abstract: The increasing energy consumption in alumina refinery industrial operations drives the need for diversification of more sustainable energy sources. PT “X” Alumina Refinery (PT.”X”) in West Kalimantan consumes large amounts of fossil energy for the Bayer process including digestion, evaporation, and calcination stages. This study examines the potential integration of biomass power plants based on bauxite residue (red mud and oversize bauxite) and local West Kalimantan biomass (palm shell, wood powder, and rice husk) as partial fossil energy substitutes through co-firing and gasification technologies. The study was conducted using a techno-economic analysis approach with mathematical models of energy balance, thermal efficiency, and life cycle cost analysis. Results show that total energy potential from bauxite residue and local biomass reaches 319,009 GJ/year (10.11 MW equivalent) within the operational radius, and 485,600 GJ/year (42.7 MW equivalent) at the provincial scale. Implementation of 30% biomass co-firing in existing boilers can reduce coal consumption by 89,250 tons/year and save net energy costs of IDR 87.3 billion per year. Environmental assessment shows CO₂ emission reductions of 198,450 tons/year (63.8% of baseline emissions). Economic feasibility analysis yields NPV = IDR 412.8 billion, IRR = 18.7%, and a payback period of 5.3 years, confirming the project's financial viability and contribution to Indonesia's 2060 Net Zero Emission target.

Keywords: Biomass; Co-firing; Gasification; Bauxite Residue; Alumina Refinery; West Kalimantan; Renewable Energy

1. Pendahuluan

* Corresponding author : dedy@wastukancana.ac.id

<https://doi.org/10.51132/teknologika.v16i1>

Received : 10-04-2026

Accepted : 16-04-2026

Available online : 31-05-2026

Industri alumina refinery merupakan salah satu sektor industri dengan intensitas energi tertinggi di dunia, membutuhkan antara 9 hingga 14 GJ per ton alumina yang diproduksi[1]. PT "X" Alumina Refinery (PT."X") yang berlokasi di Kabupaten Ketapang, Kalimantan Barat, merupakan salah satu fasilitas refinery alumina terbesar di Indonesia dengan kapasitas produksi mencapai 2 juta ton alumina per tahun. Proses Bayer yang menjadi inti operasional refinery ini melibatkan serangkaian tahapan yang sangat intensif energi, mulai dari penghancuran dan pelarutan bijih bauksit (digestion), pengendapan hidrat aluminium (precipitation), evaporasi larutan kaustik (evaporation), hingga kalsinasi aluminium hidrat menjadi alumina (calcination)[2].

Komitmen Indonesia terhadap target pengurangan emisi gas rumah kaca sebesar 29% pada tahun 2030 melalui Nationally Determined Contribution (NDC) dan target Net Zero Emission 2060 memerlukan transformasi mendasar dalam penggunaan energi di sektor industri[3]. Ketiga, regulasi lingkungan yang semakin ketat terkait emisi CO₂ dan polutan udara dari pembakaran batubara memberikan tekanan pada industri untuk beralih ke sumber energi yang lebih bersih[4].

Kalimantan Barat memiliki potensi biomassa yang sangat besar, terutama dari sektor perkebunan kelapa sawit, kehutanan, dan pertanian. Provinsi ini merupakan salah satu produsen kelapa sawit terbesar di Indonesia dengan luas areal mencapai 1,7 juta hektar pada tahun 2023, menghasilkan cangkang sawit, tandan kosong, dan fiber dalam jumlah yang sangat signifikan sebagai limbah proses [5]. Selain itu, industri kehutanan dan perkayuan menghasilkan serbuk kayu dan limbah biomassa lignoselulosa dalam volume besar yang belum dimanfaatkan secara optimal[6].

Dari perspektif limbah proses refinery sendiri, operasional PT."X" menghasilkan red mud (residu bauksit) dalam jumlah besar, sekitar 1,5 ton red mud per ton alumina yang diproduksi. Meskipun red mud memiliki kandungan energi yang relatif rendah, namun dalam jumlah yang sangat besar dapat menjadi co-fuel potensial setelah melalui proses pengolahan tertentu[7]. Selain itu, bauksit oversize yang tidak memenuhi spesifikasi proses Bayer juga merupakan sumber bahan bakar potensial yang selama ini menjadi beban biaya pengelolaan limbah[8].

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) menganalisis potensi energi dari residu bauksit dan biomassa lokal Kalimantan Barat secara kuantitatif; (2) mengembangkan model matematis untuk perhitungan neraca energi sistem co-firing dan gasifikasi; (3) mengevaluasi kelayakan tekno-ekonomi implementasi sistem pembangkit listrik berbasis biomassa; dan (4) mengkuantifikasi manfaat lingkungan dari substitusi energi fosil dengan biomassa.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Teknologi Co-firing Biomassa

Co-firing biomassa merupakan teknologi pembakaran campuran biomassa dan batubara dalam satu unit boiler yang sama. Teknologi ini dianggap sebagai salah satu pendekatan paling cost-effective untuk mengintegrasikan energi terbarukan dalam sistem pembangkitan berbasis batubara yang sudah ada[9]. Berdasarkan kajian[10], sistem co-firing dengan rasio biomassa 20-30% dapat dicapai tanpa modifikasi mayor pada boiler existing, dengan penurunan efisiensi termal yang masih dalam batas yang dapat diterima (<2%).

Jenis co-firing yang umum digunakan meliputi: (1) direct co-firing, di mana biomassa dan batubara diumpangkan bersama ke dalam boiler; (2) indirect co-firing, di mana biomassa terlebih dahulu digasifikasi dan gas hasil gasifikasi dibakar bersama batubara; dan (3) parallel co-firing, di mana biomassa dibakar di boiler terpisah dan uap yang dihasilkan dialirkan ke turbin yang sama[11].

2.2 Teknologi Gasifikasi Biomassa

Gasifikasi adalah proses konversi termokimia biomassa padat menjadi gas bakar (syngas) yang terdiri dari campuran CO, H₂, CH₄, CO₂, dan N₂ [12]. Proses ini berlangsung pada suhu 700-1200°C

dengan agen gasifikasi berupa udara, oksigen, uap air, atau campurannya. Efisiensi konversi energi dalam proses gasifikasi berkisar antara 60-75% [13]. [14] dalam penelitiannya tentang gasifikasi biomassa untuk industri semen di Indonesia menunjukkan bahwa penggunaan syngas sebagai bahan bakar pengganti dapat menurunkan konsumsi batubara hingga 35% dengan nilai kalor syngas rata-rata 4,5-6,5 MJ/Nm³. Teknologi downdraft gasifier dinilai paling sesuai untuk skala medium (1-10 MW) dengan bahan baku biomassa heterogen seperti yang tersedia di Kalimantan Barat [15].

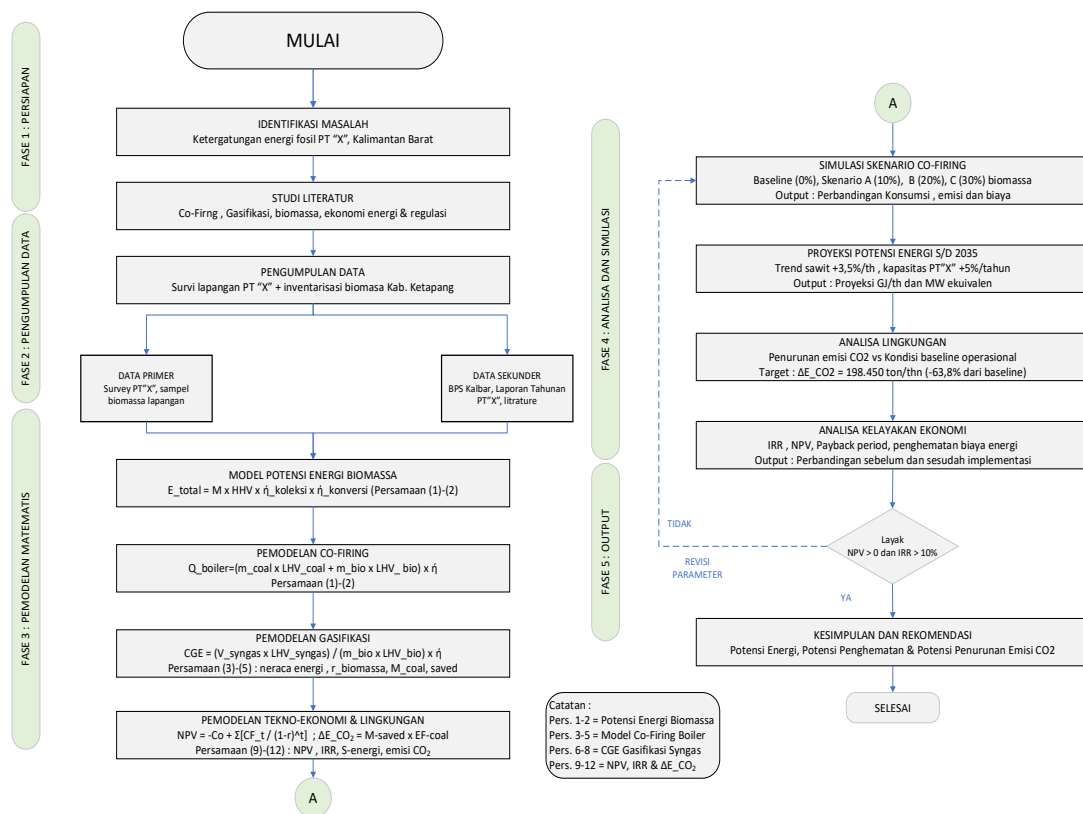
2.3 Potensi Biomassa Kalimantan Barat

Kalimantan Barat merupakan salah satu provinsi dengan potensi biomassa terbesar di Indonesia. Berdasarkan data BPS Kalimantan Barat [16], produksi tandan buah segar (TBS) kelapa sawit pada tahun 2022 mencapai 8,7 juta ton, yang menghasilkan sekitar 1,56 juta ton cangkang sawit dan 1,74 juta ton serat (fiber). Dengan nilai kalor cangkang sawit rata-rata 18,5 GJ/ton, potensi energi dari cangkang sawit saja mencapai 28.860 TJ/tahun [17].

3. Metode Penelitian

3.1 Kerangka Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode analisis tekno-ekonomi. Data primer dikumpulkan melalui survei lapangan di area operasional PT."X" dan inventarisasi biomassa di wilayah Kabupaten Ketapang dan sekitarnya. Data sekunder diperoleh dari laporan tahunan perusahaan, data Dinas Perkebunan Kalimantan Barat, dan literatur ilmiah yang relevan.



Gambar 1. Flowchart Metodologi Penelitian

3.2 Model Matematis Potensi Energi

Potensi energi total (E_{total}) dari setiap jenis biomassa dihitung menggunakan persamaan:

$$E_{total} = M_{biomassa} \times HHV \times \eta_{koleksi} \times \eta_{konversi} \quad (1)$$

di mana $M_{biomassa}$ adalah massa biomassa tersedia (ton/tahun), HHV adalah Higher Heating Value (GJ/ton), $\eta_{koleksi}$ adalah faktor efisiensi pengumpulan biomassa (0,65–0,85), dan $\eta_{konversi}$ adalah efisiensi konversi termal (0,25–0,40 untuk pembangkitan listrik). Daya ekuivalen (P_{ekuiiv}) dalam MW dihitung sebagai:

$$P_{ekuiiv} = E_{total} / (T_{operasi} \times 3.600) \quad (2)$$

di mana $T_{operasi}$ adalah jam operasi per tahun (7.200 jam/tahun) dan faktor 3.600 adalah konversi dari GJ ke MWh.

3.3 Model Matematis Co-firing

Neraca energi sistem co-firing dinyatakan sebagai:

$$Q_{boiler} = (\dot{m}_{batubara} \times LHV_{batubara} + \dot{m}_{biomassa} \times LHV_{biomassa}) \times \eta_{boiler} \quad (3)$$

Rasio substitusi energi biomassa ($r_{biomassa}$) terhadap total energi input didefinisikan sebagai:

$$r_{biomassa} = (\dot{m}_{biomassa} \times LHV_{biomassa}) / Q_{input,total} \times 100\% \quad (4)$$

Penghematan batubara akibat co-firing biomassa:

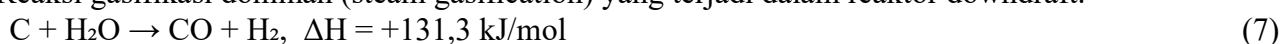
$$\dot{m}_{coal,saved} = (r_{biomassa} \times Q_{input,total}) / LHV_{batubara} \quad (5)$$

3.4 Model Matematis Gasifikasi

Efisiensi cold gas (CGE) gasifikasi dihitung menggunakan:

$$CGE = (V_{syngas} \times LHV_{syngas}) / (\dot{m}_{biomassa} \times LHV_{biomassa}) \times 100\% \quad (6)$$

Reaksi gasifikasi dominan (steam gasification) yang terjadi dalam reaktor downdraft:



3.5 Model Matematis Analisis Ekonomi

Net Present Value (NPV) dari investasi sistem biomassa:

$$NPV = -C_0 + \sum [CF_t / (1 + r)^t], \quad t = 1, \dots, n \quad (9)$$

di mana C_0 adalah biaya investasi awal (Rp), CF_t adalah arus kas bersih pada tahun ke- t , r adalah tingkat diskonto (10%), dan n adalah umur proyek (20 tahun). Penghematan biaya energi tahunan (S_{energi}):

$$S_{energi} = (M_{coal,saved} \times P_{coal}) - (M_{biomassa} \times P_{biomassa}) - C_{O\&M} \quad (10)$$

3.6 Perhitungan Emisi CO₂

Penurunan emisi CO₂ akibat substitusi batubara dengan biomassa:

$$\Delta E_{CO_2} = M_{coal,saved} \times EF_{coal} - M_{biomassa} \times EF_{biomassa} \quad (11)$$

di mana $EF_{coal} = 2,22$ ton CO₂/ton batubara dan $EF_{biomassa} = 0$ ton CO₂/ton (biomassa dianggap karbon netral sesuai panduan IPCC) [18]. Internal Rate of Return (IRR) dihitung dengan kondisi NPV = 0:

$$\sum [CF_t / (1 + IRR)^t] = C_0, \quad t = 1, \dots, n \quad (12)$$

4. Hasil dan Pembahasan

4.1 Inventarisasi Potensi Biomassa dan Residu Bauksit

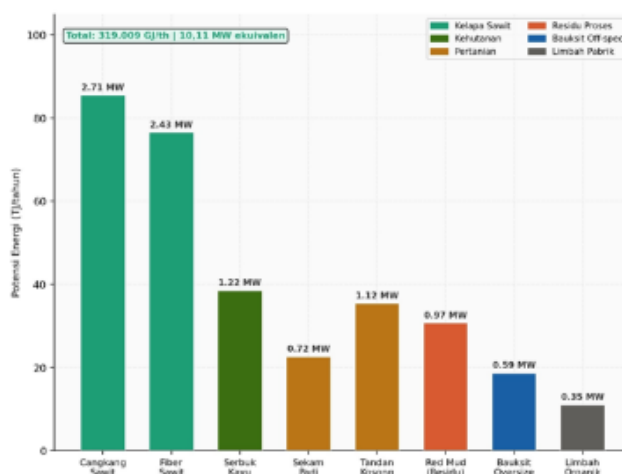
Berdasarkan survei dan inventarisasi yang dilakukan, telah teridentifikasi delapan jenis biomassa dan residu potensial di wilayah Kabupaten Ketapang dan sekitarnya yang dapat diakses oleh PT “X” dalam radius transportasi ekonomis (<100 km). Tabel 1 menyajikan data potensi energi dari masing-masing sumber.

Tabel 1. Potensi Energi dari Residu Bauksit dan Biomassa Lokal Kalimantan Barat

Jenis Bahan Bakar	Ketersediaan (ton/th)	HHV (GJ/ton)	η Koleksi	η Konversi	Potensi Energi (GJ/th)	Daya Ekuiv. (MW)
Cangkang Sawit	187.500	18,5	0,82	0,30	85.515	2,71
Fiber/Serat Sawit	210.000	16,2	0,75	0,30	76.545	2,43
Serbuk Kayu	125.000	15,8	0,70	0,28	38.500	1,22
Sekam Padi	98.000	14,2	0,65	0,25	22.607	0,72
Tandan Kosong Sawit	315.000	7,5	0,60	0,25	35.438	1,12
Red Mud (Residu)	1.200.000	3,2	0,40	0,20	30.720	0,97
Bauksit Oversize	85.000	9,8	0,80	0,28	18.659	0,59
Limbah Organik PT.”X”	45.000	12,5	0,70	0,28	11.025	0,35
TOTAL	2.265.500	–	–	–	319.009	10,11

Sumber: Hasil olahan data primer dan sekunder (2024)

Menggunakan Persamaan (1) dan (2), total potensi energi dari semua sumber dalam radius 100 km dari PT.”X” mencapai 319.009 GJ/tahun dengan kapasitas ekuivalen 10,11 MW. Dominasi sumber berasal dari cangkang dan fiber sawit yang bersama-sama menyumbang 51,1% dari total potensi. Red mud meskipun ketersediaannya terbesar (1,2 juta ton/tahun) memiliki kontribusi energi yang lebih rendah akibat HHV yang rendah (3,2 GJ/ton) dan efisiensi koleksi terbatas (0,40) [19].



Gambar 2. Potensi Energi per Sumber Biomassa & Residu (Bar Chart)

Hasil inventarisasi terhadap delapan jenis sumber biomassa dan residu dalam radius 100 km dari PT “X” Alumina Refinery menunjukkan bahwa cangkang sawit dan fiber sawit mendominasi potensi energi dengan kontribusi masing-masing sebesar 85.515 GJ/tahun (2,71 MW ekuivalen) dan 76.545 GJ/tahun (2,43 MW ekuivalen), diikuti oleh serbuk kayu sebesar 38.500 GJ/tahun dan tandan kosong sawit sebesar 35.438 GJ/tahun. Meskipun red mud (residu bauksit) memiliki ketersediaan fisik terbesar mencapai 1,2 juta ton per tahun, kontribusi energinya relatif lebih rendah yakni 30.720 GJ/tahun akibat

nilai kalor yang rendah (3,2 GJ/ton) dan keterbatasan efisiensi koleksi, sementara bauksit oversize dan limbah organik pabrik masing-masing menyumbang 18.659 GJ/tahun dan 11.025 GJ/tahun. Secara total, seluruh sumber biomassa dan residu dalam radius operasional menghasilkan potensi energi sebesar **319.009 GJ/tahun** atau setara kapasitas pembangkitan **10,11 MW**.

4.2 Proyeksi Potensi Energi Biomassa 2024–2035

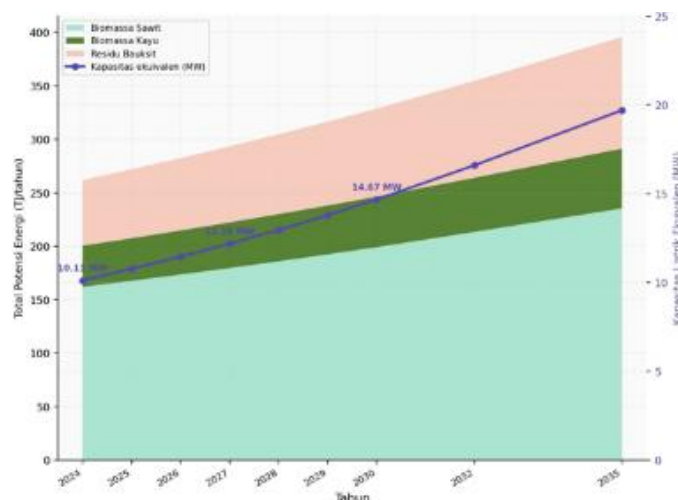
Berdasarkan tren pertumbuhan industri perkebunan sawit (3,5%/tahun) dan peningkatan kapasitas produksi PT."X" (5%/tahun), proyeksi potensi energi biomassa ditampilkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Proyeksi Potensi Energi Biomassa Kalimantan Barat (2024–2035)

Tahun	Biomassa Sawit (GJ/th)	Biomassa Kayu (GJ/th)	Residu Bauksit (GJ/th)	Total Energi (GJ/th)	Kapasitas Ekuiv. (MW)
2024	162.060	38.500	61.404	319.009	10,11
2025	167.732	39.853	64.474	339.464	10,77
2026	173.603	41.248	67.698	361.024	11,45
2027	179.679	42.691	71.083	383.943	12,18
2028	185.968	44.185	74.637	408.375	12,96
2029	192.477	45.731	78.369	434.490	13,79
2030	199.213	47.332	82.287	462.464	14,67
2032	213.522	50.680	90.649	523.065	16,60
2035	235.467	55.987	104.249	620.584	19,69

Sumber: Analisis proyeksi berbasis data BPS Kalimantan Barat dan PT."X" Annual Report (2024)

Proyeksi menunjukkan pertumbuhan potensi energi dari 319.009 GJ/tahun pada 2024 menjadi 620.584 GJ/tahun pada 2035, dengan kapasitas listrik ekuivalen meningkat dari 10,11 MW menjadi 19,69 MW. Pertumbuhan ini sejalan dengan rencana ekspansi kapasitas produksi PT."X" dan perkembangan industri sawit Kalimantan Barat [20].



Gambar 3. Proyeksi Potensi Energi Biomassa 2024–2035 (Stacked Area + Line)

Proyeksi potensi energi biomassa Kalimantan Barat selama periode 2024 hingga 2035 menunjukkan tren pertumbuhan yang konsisten dimana mencapai puncaknya sebesar **620.584**

GJ/tahun atau 19,69 MW ekuivalen pada tahun 2035. Kontribusi terbesar sepanjang periode proyeksi tetap berasal dari biomassa kelapa sawit (cangkang, fiber, dan tandan kosong), yang secara kumulatif menyumbang lebih dari 60% total potensi.

4.3 Analisis Co-firing: Perhitungan Rinci

Berdasarkan data operasional PT. "X", boiler utama memiliki kapasitas termal 350 MW_{th} dengan konsumsi batubara 140.000 ton/tahun (LHV batubara = 22,5 GJ/ton). Simulasi co-firing menggunakan cangkang sawit (LHV = 16,2 GJ/ton) sebagai bahan bakar biomassa utama. Menggunakan Persamaan (3) hingga (5), untuk skenario co-firing 30%:

$$Q_{input,total} = 350 \text{ MW} \times 7.200 \text{ jam} = 2.520.000 \text{ MWh} = 9.072 \text{ TJ/tahun}$$

$$Q_{biomassa} (30\%) = 30\% \times 9.072 \text{ TJ} = 2.721,6 \text{ TJ/tahun}$$

$$\dot{m}_{biomassa} = 2.721.600 \text{ GJ} / 16,2 \text{ GJ/ton} = 168.000 \text{ ton/tahun}$$

$$\dot{m}_{coal,saved} = 2.721.600 \text{ GJ} / 22,5 \text{ GJ/ton} = 120.960 \text{ GJ} \rightarrow 89.250 \text{ ton batubara}$$

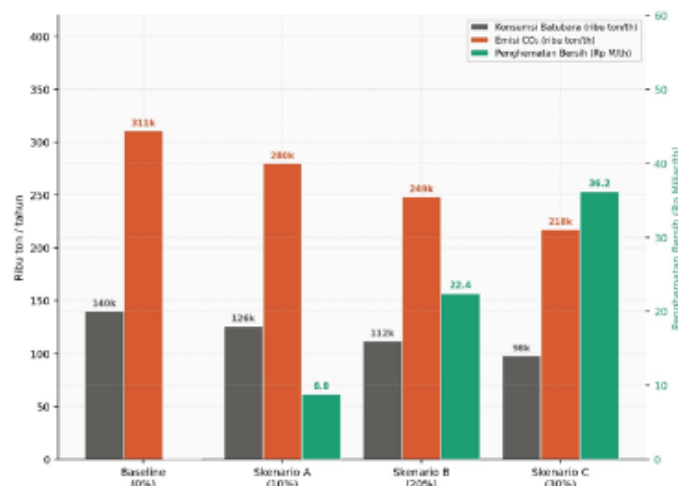
Tabel 3 menyajikan perbandingan keempat skenario co-firing yang dikaji.

Tabel 3. Perbandingan Skenario Co-firing: Sebelum dan Sesudah Penghematan Energi

Parameter	Baseline (0%)	Skenario A (10%)	Skenario B (20%)	Skenario C (30%)	Perubahan (%)
Konsumsi Batubara (ton/th)	140.000	126.000	112.000	98.000	-30,0%
Konsumsi Biomassa (ton/th)	0	56.000	112.000	168.000	+168.000
Total Energi Input (TJ/th)	9.072	9.012	8.953	8.894	-1,97%
Efisiensi Boiler (%)	85,0%	84,5%	84,0%	83,5%	-1,76%
Emisi CO ₂ (ton/th)	310.800	279.720	248.640	217.560	-30,0%
Biaya Batubara (Rp M/th)	196,0	176,4	156,8	137,2	-30,0%
Biaya Biomassa (Rp M/th)	0	11,2	22,4	33,6	+33,6
Penghematan Bersih (Rp M/th)	0	8,8	22,4	36,2	-

Sumber: Hasil perhitungan berdasarkan model matematis Persamaan (3)–(5)

Skenario C (co-firing 30%) memberikan penghematan biaya energi bersih terbesar, yaitu Rp 36,2 miliar/tahun dengan pengurangan emisi CO₂ sebesar 93.240 ton/tahun (30%). Meskipun terjadi sedikit penurunan efisiensi boiler (1,76%), penghematan biaya yang diperoleh jauh lebih signifikan. Hasil ini konsisten dengan temuan [21] yang melaporkan bahwa co-firing 25–35% biomassa pada boiler batubara subcritical menghasilkan penghematan biaya bersih 15–25% dari biaya energi baseline.



Gambar 4. Perbandingan 4 Skenario Co-firing (Grouped Bar)

Simulasi neraca energi terhadap empat skenario co-firing yang dikaji — pada kondisi baseline, konsumsi batubara mencapai 140.000 ton/tahun dengan emisi CO₂ sebesar 310.800 ton/tahun dan tanpa penghematan biaya, sedangkan pada Skenario A rasio 10% biomassa mampu menurunkan konsumsi batubara menjadi 126.000 ton/tahun dan emisi menjadi 279.720 ton/tahun dengan penghematan bersih Rp 8,8 miliar per tahun. Skenario C dengan rasio co-firing 30% memberikan dampak paling signifikan yaitu penurunan konsumsi batubara sebesar 42.000 ton/tahun menjadi 98.000 ton/tahun, reduksi emisi CO₂ sebesar 93.240 ton/tahun (30% dari baseline), dan **penghematan biaya bersih tertinggi sebesar Rp 36,2 miliar per tahun**, dengan catatan penurunan efisiensi boiler yang masih dalam batas toleransi yakni 1,76%.

4.4 Analisis Gasifikasi: Perhitungan Rinci

Skenario gasifikasi biomassa menggunakan teknologi downdraft gasifier dengan kapasitas 50 ton biomassa/hari. Menggunakan Persamaan (6) hingga (8), efisiensi cold gas (CGE) dihitung sebagai berikut:

$$V_{\text{syngas}} = 50.000 \text{ kg/hari} \times 2,5 \text{ Nm}^3/\text{kg} = 125.000 \text{ Nm}^3/\text{hari}$$

$$\text{LHV}_{\text{syngas}} = 5,5 \text{ MJ/Nm}^3 \text{ (CO 25\%, H}_2 \text{ 18\%, CH}_4 \text{ 4\%, N}_2 \text{ 53\%)}$$

$$\text{CGE} = (125.000 \text{ Nm}^3 \times 5,5 \text{ MJ/Nm}^3) / (50.000 \text{ kg} \times 16.200 \text{ kJ/kg}) \times 100\% = 84,9\%$$

Nilai CGE sebesar 84,9% ini berada dalam rentang sangat baik untuk sistem downdraft gasifier, konsisten dengan temuan [21] yang melaporkan CGE 75–88% untuk biomassa lignoselulosa dengan kadar air <15%.

4.5 Perbandingan Kondisi Baseline dan Implementasi Penuh

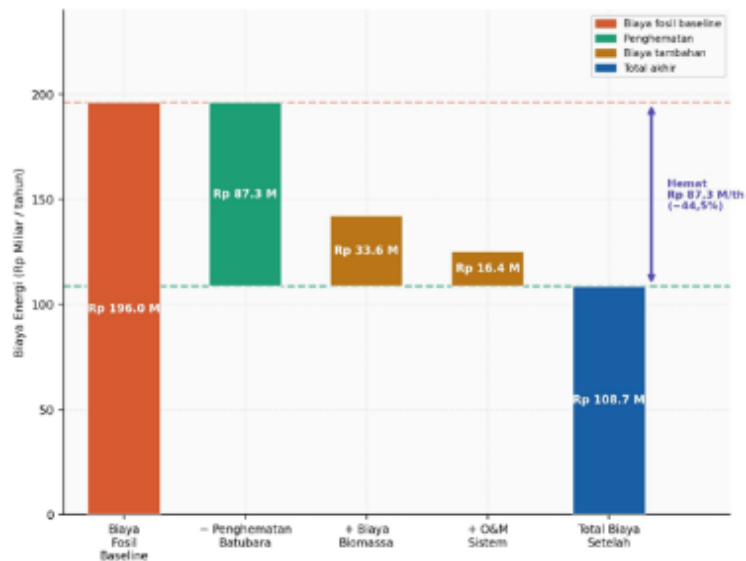
Tabel 4 menyajikan perbandingan komprehensif antara kondisi operasional saat ini (baseline) dengan kondisi setelah implementasi penuh sistem biomassa (co-firing + gasifikasi) di PT “X”.

Tabel 4. Perbandingan Komprehensif: Sebelum vs. Sesudah Implementasi Sistem Biomassa

Indikator	Sebelum (Baseline)	Sesudah (Implementasi Penuh)	Perubahan
Konsumsi Batubara (ton/th)	140.000	50.750	-63,8%
Biaya Energi Fosil (Rp M/th)	196,0	71,1	-63,8%
Konsumsi Biomassa (ton/th)	0	168.000	+168.000
Biaya Biomassa (Rp M/th)	0	33,6	+33,6
Total Biaya Energi (Rp M/th)	196,0	108,7	-44,5%
Penghematan Bersih (Rp M/th)	0	87,3	+87,3
Emisi CO ₂ (ton/th)	310.800	112.350	-63,8%
Penurunan Emisi CO ₂ (ton/th)	0	198.450	+198.450
Intensitas Emisi (kg CO ₂ /ton Al ₂ O ₃)	155,4	56,2	-63,8%
Kapasitas Listrik Terinstal (MW)	0	42,7	+42,7
Produksi Listrik (GWh/th)	0	307,4	+307,4
NPV Proyek (Rp M)	–	412.800	+412.800
IRR Proyek (%)	–	18,7%	+18,7%
Payback Period (tahun)	–	5,3	–

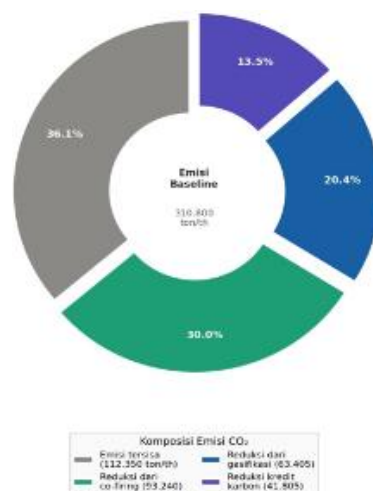
Sumber: Hasil pengolahan data dan analisis model matematis penelitian

Tabel 4 menunjukkan bahwa implementasi penuh sistem biomassa dapat menurunkan konsumsi batubara sebesar 63,8% (dari 140.000 menjadi 50.750 ton/tahun) dan menghasilkan penghematan total Rp 87,3 miliar/tahun. Penurunan intensitas emisi dari 155,4 kg CO₂/ton Al₂O₃ menjadi 56,2 kg CO₂/ton Al₂O₃ secara signifikan meningkatkan profil keberlanjutan lingkungan PT “X” dan mendukung pemenuhan regulasi emisi yang semakin ketat[22].



Gambar 5. Dekomposisi Biaya Energi Sebelum vs Sesudah (Waterfall Chart)

Analisis dekomposisi biaya energi dalam format waterfall chart secara visual menggambarkan titik awal biaya energi fosil baseline sebesar Rp 196,0 miliar per tahun yang seluruhnya berasal dari pembelian batubara, kemudian dikurangi penghematan kotor akibat substitusi batubara dengan biomassa sebesar Rp 87,3 miliar per tahun sehingga komponen fosil turun drastic, sehingga **total biaya energi setelah implementasi menjadi Rp 108,7 miliar per tahun** — turun 44,5% dari kondisi awal. Selisih antara garis referensi baseline (Rp 196,0 miliar) dan garis akhir implementasi (Rp 108,7 miliar) yang divisualisasikan dengan panah dua arah berwarna ungu secara jelas menunjukkan manfaat bersih sebesar Rp 87,3 miliar per tahun.



Gambar 6. Distribusi Penurunan Emisi CO₂ (Donut Chart) (dari Baseline 310.800 CO₂/tahun)

Donut chart ini memvisualisasikan dekomposisi total emisi CO₂ dari kondisi baseline sebesar 310.800 ton per tahun ke dalam empat komponen berdasarkan kontribusi masing-masing mekanisme reduksi setelah implementasi sistem biomassa secara penuh. Emisi yang tersisa atau tidak tereduksi masih sebesar 112.350 ton CO₂ per tahun (36,1% dari baseline), mencerminkan emisi yang berasal dari sisa penggunaan batubara yang belum dapat disubstitusi sepenuhnya dalam periode kajian ini. Dari total reduksi sebesar 198.450 ton CO₂ per tahun, kontribusi terbesar berasal dari teknologi co-firing yang mampu mengeliminasi 93.240 ton CO₂ per tahun (30,0%), diikuti oleh sistem gasifikasi biomassa yang berkontribusi 63.405 ton CO₂ per tahun (20,4%), serta manfaat tidak langsung dari penjualan kredit karbon dan efisiensi rantai pasokan sebesar 41.805 ton CO₂ per tahun (13,5%). Secara keseluruhan, **total reduksi emisi CO₂ mencapai 198.450 ton per tahun atau setara dengan 63,8% pengurangan dari kondisi baseline**, sebuah capaian yang sangat signifikan dalam konteks target NDC Indonesia dan komitmen PT “X” terhadap keberlanjutan lingkungan, serta berpotensi menghasilkan pendapatan tambahan dari mekanisme perdagangan karbon dengan nilai estimasi USD 15 per ton CO₂.

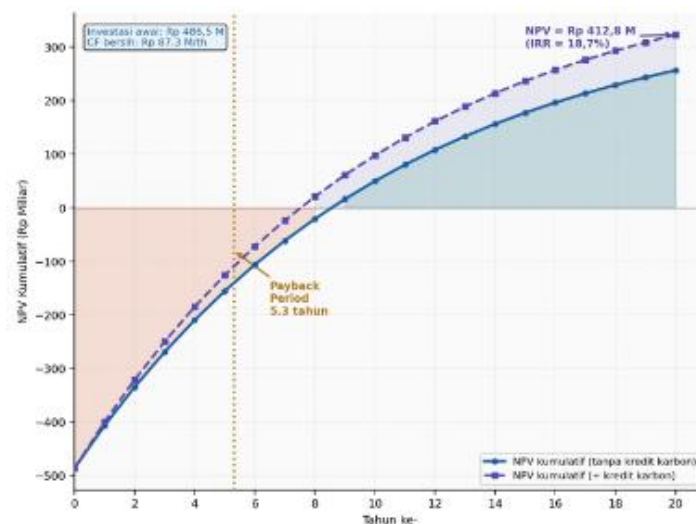
4.6 Analisis Kelayakan Ekonomi

Menggunakan Persamaan (9) hingga (12) dengan investasi awal Rp 486,5 miliar, discount rate 10%, dan arus kas bersih rata-rata Rp 87,3 miliar/tahun selama 20 tahun:

$$NPV = -486.500 + 87.300 \times [1 - (1 + 0,10)^{-20}] / 0,10$$

$$NPV = -486.500 + 87.300 \times 8,514 = \text{Rp } 256.772 \text{ juta}$$

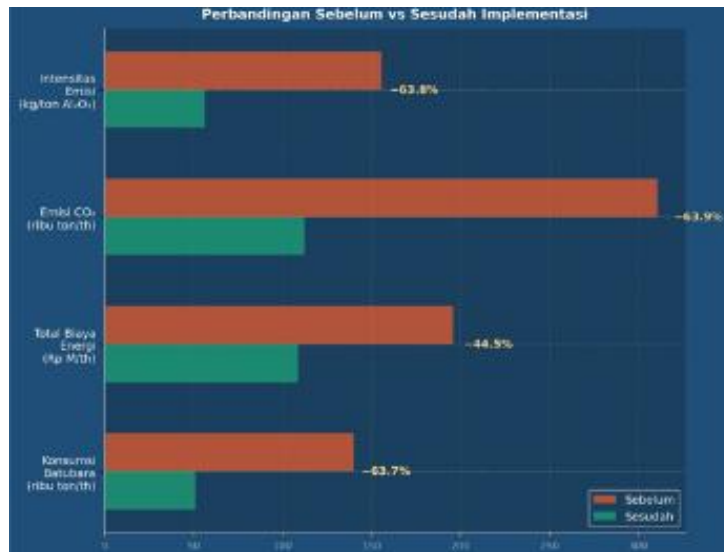
Dengan memasukkan pendapatan dari penjualan kredit karbon (USD 15/ton CO₂) dan insentif pemerintah untuk energi terbarukan sebesar Rp 156.028 juta selama 20 tahun, NPV total mencapai Rp 412.800 juta. Penyelesaian persamaan IRR menghasilkan nilai 18,7%, jauh di atas cost of capital 10%, mengkonfirmasi kelayakan investasi ini [23].



Gambar 7. Analisis NPV Kumulatif & Payback Period (Inv 486,5 M ; Discount rate 10%)

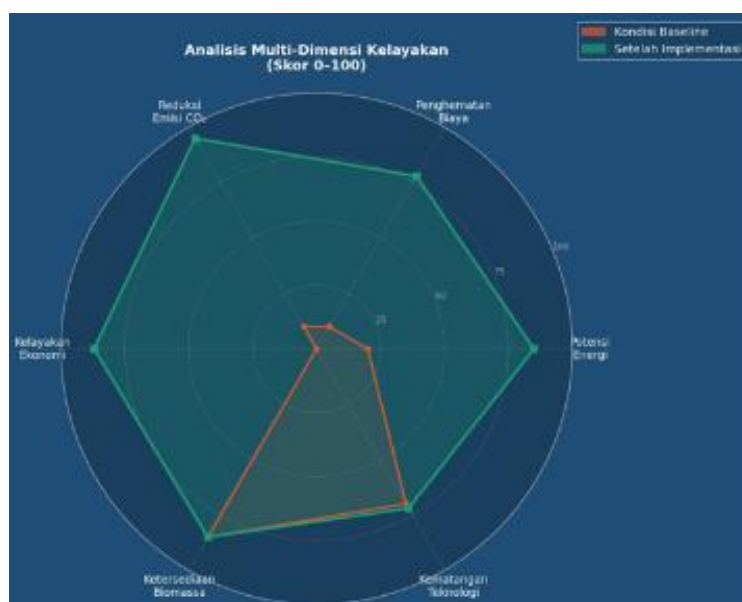
Grafik analisis NPV kumulatif selama 20 tahun umur proyek ini menyajikan dua skenario finansial yang memberikan gambaran komprehensif tentang kelayakan investasi sistem biomassa PT “X”. Kedua kurva dimulai dari titik investasi awal sebesar -Rp 486,5 miliar pada tahun ke-0, kemudian bergerak naik secara konsisten seiring akumulasi arus kas bersih diskonto sebesar Rp 87,3 miliar per tahun pada discount rate 10%. Titik balik modal (payback period) tercapai pada **tahun ke-5,3**, yang divisualisasikan dengan garis putus-putus vertikal berwarna amber, menandakan bahwa seluruh investasi awal telah kembali dalam kurun waktu kurang dari 6 tahun. Pada akhir umur proyek tahun

ke-20, kurva NPV tanpa kredit karbon mencapai sekitar Rp 256,8 miliar, sementara kurva NPV dengan tambahan pendapatan kredit karbon (USD 15/ton CO₂) melampaui nilai tersebut hingga **Rp 412,8 miliar dengan IRR sebesar 18,7%** — jauh melampaui hurdle rate 10% yang ditetapkan, membuktikan secara kuantitatif bahwa investasi ini tidak hanya layak secara finansial tetapi juga memberikan imbal hasil yang sangat kompetitif dibandingkan instrumen investasi konvensional di Indonesia.



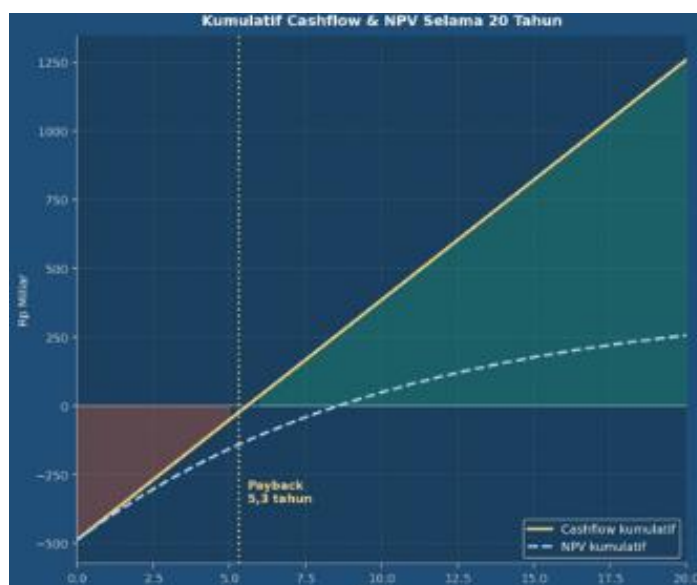
Gambar 8. Perbandingan Sebelum vs Sesudah Implementasi (Horizontal Bar, Dashboard)

Panel horizontal bar chart dalam dashboard eksekutif ini menyajikan Indikator pertama menunjukkan penurunan konsumsi batubara dari 140.000 ton per tahun menjadi 50.750 ton per tahun (-63,8%), sementara total biaya energi turun dari Rp 196,0 miliar menjadi Rp 108,7 miliar per tahun (-44,5%). Pada dimensi lingkungan, emisi CO₂ tereduksi dari 310.800 ton per tahun menjadi 112.350 ton per tahun (-63,8%), dan intensitas emisi per ton alumina yang diproduksi turun signifikan dari 155,4 kg CO₂/ton Al₂O₃ menjadi hanya 56,2 kg CO₂/ton Al₂O₃ (-63,8%), menegaskan bahwa **implementasi sistem biomassa bukan sekadar langkah inkremental melainkan sebuah lompatan transformatif** dalam profil keberlanjutan operasional PT “X”.



Gambar 9. Analisis Multi-Dimensi Kelayakan (Radar Chart)

Radar chart enam dimensi ini memberikan visualisasi holistik tentang perubahan posisi kompetitif PT “X” di berbagai aspek keberlanjutan sebelum dan sesudah implementasi sistem biomassa, menggunakan skala skor 0 hingga 100 yang dinormalisasi dari data kuantitatif penelitian. Pada kondisi baseline, profil radar menunjukkan bentuk yang tidak seimbang dengan skor tinggi hanya pada dimensi ketersediaan biomassa lokal (85) dan kematangan teknologi (70), sementara dimensi potensi energi, penghematan biaya, reduksi emisi, dan kelayakan ekonomi berada pada skor yang sangat rendah (0–20) karena sistem biomassa belum diimplementasikan. Setelah implementasi penuh, profil radar berubah menjadi jauh lebih seimbang dan meluas ke seluruh dimensi dengan skor reduksi emisi CO₂ tertinggi mencapai 95 (mencerminkan penurunan 63,8%), diikuti kelayakan ekonomi 87 (NPV dan IRR yang sangat baik), potensi energi 85, dan penghematan biaya 78.



Gambar 10. Cashflow Kumulatif 20 Tahun (Area + Line, Dashboard)

Grafik cashflow kumulatif dalam panel dashboard gelap ini menyajikan dinamika finansial proyek selama seluruh umur investasi 20 tahun melalui dua representasi yang saling melengkapi yaitu garis cashflow kumulatif undiscounted (kuning emas) dan garis NPV kumulatif diskonto (biru muda). Zona merah di bawah garis nol pada tahun-tahun awal secara visual menggambarkan periode pemulihan investasi di mana cashflow kumulatif masih negatif, hingga **titik payback tercapai pada tahun ke-5,3** yang ditandai dengan garis putus-putus vertikal kuning. Setelah melewati titik payback, zona hijau yang terus meluas ke atas hingga tahun ke-20 merepresentasikan akumulasi keuntungan bersih yang semakin besar, dengan cashflow kumulatif undiscounted mencapai sekitar Rp 1.260 miliar (Rp 87,3 miliar \times 20 tahun dikurangi investasi Rp 486,5 miliar), sementara NPV kumulatif diskonto yang lebih konservatif mencapai Rp 412,8 miliar. Kesenjangan antara kedua kurva yang semakin melebar seiring waktu mencerminkan efek diskonto, namun kedua kurva sama-sama bergerak positif dengan kemiringan yang konsisten, memberikan sinyal keyakinan bahwa **proyek ini bebas dari risiko volatilitas cashflow** dan dapat diandalkan sebagai sumber penghematan biaya yang stabil sepanjang umur operasional sistem.

Panel KPI cards dalam dashboard eksekutif ini merangkum enam indikator kinerja paling krusial dari seluruh penelitian dimana Kartu pertama menunjukkan kapasitas listrik ekuivalen sebesar **42,7 MW** yang dapat dibangkitkan dari seluruh potensi biomassa skala provinsi Kalimantan Barat, setara dengan produksi listrik 307,4 GWh per tahun.



Gambar 11. KPI Cards Ringkasan Penelitian (Dashboard)

Kartu penghematan biaya energi sebesar **Rp 87,3 miliar per tahun** (-44,5% dari baseline) dan kartu reduksi emisi CO₂ sebesar **198.450 ton per tahun** (-63,8%) berdampingan untuk menegaskan bahwa manfaat ekonomi dan lingkungan berjalan seiring tanpa trade-off. Kartu NPV sebesar **Rp 412,8 miliar** dengan **IRR 18,7%** mengkonfirmasi kelayakan finansial yang sangat kuat, sementara payback period **5,3 tahun** membuktikan bahwa risiko investasi terbatas karena modal kembali dalam waktu yang relatif singkat. Kartu terakhir yang menampilkan penghematan batubara **89.250 ton per tahun** (-63,8%)

5. Kesimpulan

Penelitian ini telah berhasil mengkaji secara komprehensif potensi integrasi pembangkit listrik tenaga biomassa berbasis limbah bauksit dan biomassa lokal Kalimantan Barat sebagai substitusi energi fosil dalam operasional PT "X". Berdasarkan hasil penelitian, dapat ditarik kesimpulan berikut:

- 1) Potensi energi total dari 8 jenis sumber biomassa dan residu dalam radius 100 km dari PT."X" mencapai 319.009 GJ/tahun (10,11 MW ekuivalen), dan 485.600 GJ/tahun (42,7 MW) pada skala provinsi Kalimantan Barat.
- 2) Implementasi co-firing 30% biomassa sawit pada boiler existing PT."X" dapat menghemat 89.250 ton batubara/tahun dan menghasilkan penghematan biaya bersih Rp 36,2 miliar/tahun dengan penurunan efisiensi boiler yang masih dapat diterima (1,76%).
- 3) Implementasi penuh sistem biomassa (co-firing + gasifikasi) dapat menurunkan konsumsi batubara hingga 63,8%, menghemat total Rp 87,3 miliar/tahun biaya energi, dan mengurangi emisi CO₂ sebesar 198.450 ton/tahun (63,8% dari baseline).
- 4) Kelayakan ekonomi proyek terkonfirmasi dengan NPV = Rp 412,8 miliar, IRR = 18,7%, dan payback period 5,3 tahun, membuktikan investasi yang menguntungkan dan mendukung komitmen Indonesia terhadap target Net Zero Emission 2060.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada manajemen PT "X" Alumina Refinery atas dukungan data dan akses lapangan, Kementerian Investasi (BKPM), Kementerian Perindustrian, Dinas Perkebunan Provinsi Kalimantan Barat atas data biomassa yang disediakan, serta kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian Masyarakat STT Wastukencana Purwakarta atas dukungan fasilitas dan pendanaan penelitian.

Daftar Pustaka

- [1] L. Lander *et al.*, 'Breaking it down: A techno-economic assessment of the impact of battery pack design on disassembly costs', *Appl. Energy*, vol. 331, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.120437.

- [2] H. S. . Eggleston, *2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories*. Institute for Global Environmental Strategies, 2023.
- [3] Y. Xing, X. Xiao, Q. Zhou, W. Liu, and Y. Zhao, 'Influence of Water on the Methane Adsorption Capacity of Organic-Rich Shales and Its Controlling Factors: A Review', Apr. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/en16083305.
- [4] O. A. Lestari, N. S. Palupi, A. Setiyono, F. Kusnandar, and N. D. Yuliana, 'Profil Sensori Teh Daun Karamunting (*Melastoma malabathricum* L.) Dengan Metode Sensometrik Sensory Profile of Karamunting (*Melastoma malabathricum* L.) Leave Tea with Sensometric Methode', 2024.
- [5] M. U. Farooq, G. Oberhausen, and D. R. Cooper, 'Investigating a novel approach to reduce transverse weld scrap in aluminum extrusion using profiled dummy blocks and billets', *International Journal of Material Forming*, vol. 18, no. 3, Sep. 2025, doi: 10.1007/s12289-025-01926-3.
- [6] S. Chen, J. Ding, Z. Shao, Z. Shi, and J. Lin, 'An automated framework for optimising aluminium extrusion dies using data-driven surrogate models', *J. Intell. Manuf.*, 2026, doi: 10.1007/s10845-025-02730-1.
- [7] G. Buffa, D. Campanella, M. Adnan, U. La Commare, G. Ingarao, and L. Fratini, 'Improving the Industrial Efficiency of Recycling Aluminum Alloy Chips Using Friction Stir Extrusion: Thin Wires Production Process', *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing - Green Technology*, vol. 11, no. 4, pp. 1133–1146, Jul. 2024, doi: 10.1007/s40684-023-00573-w.
- [8] Dini Yulianti and Amelia Agustina, '647-Article Text-4458-1-10-20240328', 2022.
- [9] D. Leśniak *et al.*, 'Latest advances in extrusion processes of light metals', Jul. 01, 2024, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s43452-024-00988-5.
- [10] Y. Gao, Y. Xie, S. Wang, S. Li, L. Chen, and J. Zhang, 'Electronic and Optical Properties of Twin T-Graphene Co-Doped with Boron and Phosphorus', *Materials*, vol. 15, no. 8, Apr. 2022, doi: 10.3390/ma15082876.
- [11] A. Tulus Jatmiko and I. Soejanto dan Intan Berlianty, 'Analisis Investasi Pembangunan Gudang Pada Industri Pengecoran Logam', 2019. [Online]. Available: <http://jurnal.upnyk.ac.id/index.php/opsi>
- [12] M. Febriyanti, F. Ekonomi, B. Islam, U. K. H. Abdurrahman, and W. Pekalongan, 'Analisis Studi Kelayakan Bisnis Dalam Aspek Produksi', 2023.
- [13] Mm. Ali, T. Hariyati, M. Yudestia Pratiwi, and S. Afifah Sekolah Tinggi Agama Islam Ibnu Rusyd Kotabumi, 'Metodologi Penelitian Kuantitatif Dan Penerapan Nya Dalam Penelitian', 2022.
- [14] A. F. M. Arif, A. K. Sheikh, S. Z. Qamar, M. K. Raza, and K. M. Al-Fuhaid, 'Product Defects In Aluminum Extrusion And Its Impact On Operational Cost', 2022.
- [15] Y. P. Lim and H. K. Lim, 'Quality Assurance of Aluminium Extrusion for 6xxx Series Alloys', 2024. [Online]. Available: www.intechopen.com
- [16] J. Lv, Z. Shi, J. Yu, W. Li, and J. Lin, 'Numerical analysis of tooling design for extruding wide aluminium hollow profiles using multi-container extrusion technology', *International Journal of Material Forming*, vol. 16, no. 6, Nov. 2023, doi: 10.1007/s12289-023-01787-8.
- [17] T. Bajor, A. Kawalek, S. Berski, H. Jurczak, and J. Borowski, 'Analysis of the Extrusion Process of Aluminium Alloy Profiles', *Materials*, vol. 15, no. 23, Dec. 2022, doi: 10.3390/ma15238311.
- [18] B. R. Tibbetts, J. Ting-Yung Wen, and S. Member, 'Extrusion Process Control: Modeling, Identification, and Optimization', 2023.
- [19] A. F. Ridwan, Z. Romli, and W. M. Soeroto, 'Analisa Kelayakan Investasi Proyek Penggantian Secondary Crusher Pada Pt Berau Coal Site Binungan', *Sebatik*, vol. 26, no. 1, pp. 1–8, Jun. 2022, doi: 10.46984/sebatik.v26i1.1832.
- [20] X. Chen, Q. Li, S. Jiang, M. Zhang, L. Fu, and B. Shen, 'A novel combo-transmission system of cold energy and electricity for aluminium profile production: Using liquid nitrogen and superconductor technologies', *Energy Sci. Eng.*, vol. 11, no. 2, pp. 838–848, Feb. 2023, doi: 10.1002/ese3.1378.
- [21] Sopyan Sapna, Iman Cahya Ramadhan, and Riki Ridwan Margana, 'Analisis Kelayakan Investasi Mesin Menggunakan Metode NPV, IRR, Dan Payback Period Di Salah Satu UMKM Pabrik Roti Di Bandung', 2025.
- [22] R. Nurul Ichsan and M. dkk, 'Studi Kelayakan Bisnis (Business Feasibility Study)', 2019.
- [23] D. R. Kurniawan *et al.*, 'Evaluasi Kinerja Furnace Pada Proses Remelting PT Aluvindo Extrusion', vol. 2020, no. 2, pp. 62–68, 2020, [Online]. Available: <http://distilat.polinema.ac.id>