



Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit untuk Pembangkit Listrik di PT. X

M Abdul Aziz^{1*}, Saleh Al Amin², Andi Arif Setiawan³, Yudi Irwansi⁴

^{1,3} Program Studi Sains Lingkungan, Universitas PGRI Palembang

^{2,4} Program Studi Teknik Elektro, Universitas PGRI Palembang

Alamat: Jl. Jend. A. Yani Lorong Gotong Royong, 9/10 Ulu, Kec. Seberang Ulu II, Kota Palembang, Sumatera Selatan, Indonesia, 30116

*Penulis korespondensi: irwansiyudi@univpgri-palembang.ac.id

Abstract. *The use of palm oil waste as boiler fuel is one of the innovative solutions in supporting the use of renewable energy while reducing the environmental impact of palm oil industry waste. Waste such as palm shells, mesocarp fibers, and empty oil palm bunches have high energy potential through direct combustion and other thermal technologies. This study aims to evaluate the potential use of palm oil waste as boiler fuel based on its calorific value, combustion efficiency, and environmental impact. The methods used include analysis of the physical and chemical characteristics of waste, boiler performance tests, and exhaust gas emission evaluation. The results show that palm oil waste has a high calorific value (15–20 MJ/kg), which makes it an efficient alternative fuel. In addition, the use of this waste is able to reduce dependence on fossil fuels while minimizing carbon emissions, thereby supporting the greenhouse gas emission reduction target. From an operational perspective, the use of palm oil waste in industrial boilers can increase combustion efficiency by up to 75–85%, depending on fuel conditions and boiler design. This makes palm oil waste not only economically valuable, but also strategic in supporting the transition to clean energy. Another advantage is that waste management becomes more targeted, because solid waste that is usually only an environmental burden can be reused as an energy source. However, some of the challenges that need to be considered include relatively high ash levels, the potential for corrosion in boiler equipment, and the need for emission control technology to comply with environmental standards. With the right mitigation strategy, palm oil waste can be processed into sustainable and environmentally friendly energy.*

Keywords: *palm oil waste; renewable energy; Boiler; combustion efficiency; Sustainability*

Abstrak. Pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler merupakan salah satu solusi inovatif dalam mendukung penggunaan energi terbarukan sekaligus mengurangi dampak lingkungan dari limbah industri kelapa sawit. Limbah seperti cangkang sawit, serat mesokarp, dan tandan kosong sawit memiliki potensi energi yang tinggi melalui pembakaran langsung maupun teknologi termal lainnya. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler berdasarkan nilai kalor, efisiensi pembakaran, dan dampak lingkungannya. Metode yang digunakan mencakup analisis karakteristik fisik dan kimia limbah, uji performa boiler, serta evaluasi emisi gas buang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa limbah kelapa sawit memiliki nilai kalor tinggi (15–20 MJ/kg), yang menjadikannya bahan bakar alternatif yang efisien. Selain itu, pemanfaatan limbah ini mampu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil sekaligus meminimalkan emisi karbon, sehingga mendukung target pengurangan emisi gas rumah kaca. Dari sisi operasional, penggunaan limbah kelapa sawit pada boiler industri dapat meningkatkan efisiensi pembakaran hingga 75–85%, tergantung pada kondisi bahan bakar dan desain boiler. Hal ini menjadikan limbah kelapa sawit tidak hanya bernilai ekonomis, tetapi juga strategis dalam mendukung transisi menuju energi bersih. Keuntungan lainnya adalah pengelolaan limbah menjadi lebih terarah, karena limbah padat yang biasanya hanya menjadi beban lingkungan dapat dimanfaatkan kembali sebagai sumber energi. Namun, beberapa tantangan yang perlu diperhatikan meliputi kadar abu yang relatif tinggi, potensi korosi pada peralatan boiler, serta kebutuhan teknologi pengendalian emisi agar sesuai dengan standar lingkungan. Dengan adanya strategi mitigasi yang tepat, limbah kelapa sawit dapat diolah menjadi energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Oleh karena itu, pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai bahan bakar boiler merupakan langkah penting untuk mendukung ekonomi sirkular sekaligus menjaga keberlanjutan energi di masa depan.

Kata kunci: limbah kelapa sawit; energi terbarukan; boiler; efisiensi pembakaran; keberlanjutan

1. LATAR BELAKANG

Zaman sekarang dunia mengalami perubahan iklim global yang berdampak pada bencana global. United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) mengemukakan bahwa Indonesia berkomitmen dalam memberikan kontribusi terhadap solusi perubahan iklim global. Berbagai solusi diberikan untuk menanggulangi perubahan isu iklim global. Solusi pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) yang merupakan penyebab terjadinya pemanasan global berasal dari emisi proses pembakaran bahan bakar fosil (minyak bumi dan batu bara) serta akibat penggundulan dan pembakaran hutan, yakni dengan memanfaatkan limbah biomassa pertanian sebagai sumber energy yang ramah lingkungan. Pemerintah mendorong pembangunan proyek pembangkit listrik ramah lingkungan guna mencapai target pengurangan emisi GR) dari sektor energi. Sementara itu, Kebutuhan energi Indonesia terus meningkat dari tahun ke tahun. Tahun 2009 konsumsi energi nasional sebesar 865,4 juta SBM dan mengalami peningkatan rata-rata 2,2% pertahun (Talla, dkk, 2013).

Pemerintah akan terus mendorong pembangunan sejumlah proyek pembangkit listrik berbasis energi terbarukan (EBT) yaitu seperti tenaga air (PLTA) dan biomassa (PLTB). Bauran Energi Nasional mencatat kontribusi EBT baru mencapai 12,52%. Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2019 – 2028, target Bauran Energi Nasional dalam pembangkitan tenaga listrik EBT naik mencapai 23% pada tahun 2025. Pemanfaatan energi terbarukan tergolong masih rendah yaitu berkisar (1,9%) 8215,5 MW. Salah satu potensi EBT menjadi energi bisa berkisar sebesar 443.208 MW, energy terbarukan tersebut yaitu bersumber dari limbah biomassa (Tanbar, dkk, 2021)

Biomassa merupakan bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis, berupa produk maupun buangan, contoh biomassa antara lain adalah tanaman, pepohonan, rumput, ubi, limbah pertanian, limbah hutan, tinja, dan kotoran ternak. Biomassa dapat digunakan sebagai sumber energi (bahan bakar). Biomassa yang umum digunakan sebagai bahan bakar adalah yang masih memiliki nilai ekonomis (Parinduri dan Parinduri, 2020).

Kesadaran akan manfaat energi terbarukan yang bersumber dari alam terus digiatkan penerapannya. Krisis bahan bakar fosil mendorong peningkatan permintaan akan energi terbarukan. Bioenergi adalah sumber energi terbarukan yang menjanjikan karena ketersediaannya melimpah dan dapat dikonversi menjadi berbagai bentuk bahan bakar. Bioenergi adalah salah satu energi terbarukan yang diperoleh dari sumber biologis, seperti biomassa. Unsur kimia seperti karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), belerang (S), abu, dan air merupakan komposisi umum biomassa. Limbah pertanian biasanya digunakan sebagai sumber daya biomassa seperti sekam padi, jerami, batok kelapa, cangkang, tandan

kosong sawit, dan limbah kayu. Nilai kalor tandan kosong sebesar 2900 kal/g dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar. (Praevia & Widayat, 2022).

2. KAJIAN TEORITIS

Industri kelapa sawit menghasilkan dua jenis limbah utama, yaitu limbah padat dan limbah cair. Limbah padat terdiri dari tandan kosong (Empty Fruit Bunch/EFB), cangkang (shell), dan serat (fiber), sedangkan limbah cair dikenal sebagai Palm Oil Mill Effluent (POME) (Yulianti, 2020). Limbah padat umumnya memiliki nilai kalor yang cukup tinggi, sehingga berpotensi sebagai bahan bakar alternatif dalam pembangkit listrik.

Limbah ini dibedakan menjadi dua jenis, yaitu limbah pengolahan dan limbah dasar pengelolaan limbah cair. Limbah padat yang di hasilkan ialah buah kosong yang dikeluarkan dari perontokan setelah tandan buah matang dipisahkan dari buahnya yaitu (cangkang dan fiber). Berikut jenis-jenis limbah padat kelapa sawit adalah sebagai berikut (Yatno, 2016).

Sistem pada boiler terdiri dari sistem bahan bakar, sistem air umpan, dan sistem steam. sistem bahan bakar adalah semua peralatan yang berperan untuk menyediakan bahan bakar yang digunakan pada proses pembakaran didalam dapur boiler. Sistem air umpan berperan untuk menyediakan air umpan untuk boiler sesuai dengan kebutuhan produksi uap. Sistem steam ini berperan untuk mengumpulkan dan mengontrol produksi uap pada boiler (Rahardja, dkk, 2022).

Penggunaan biomassa sebagai bahan bakar sangat memerlukan tindakan khusus. Hal ini disebabkan oleh karakteristik biomassa yang berbeda dengan bahan bakar fosil yang digunakan sebagai bahan bakar. Salah.satu..cara untuk mengurangi dampak negatif II-7 penggunaan biomassa sebagai bahan bakar adalah dengan melakukan pretreatment. Ada beberapa perlakuan awal yang dapat dilakukan dengan metode mekanis, termal, kimia, biologis, atau gabungan (Endah, 2019).

Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm) memanfaatkan proses pembakaran limbah organik untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi yang kemudian menggerakkan turbin (Susanto, 2019). Di pabrik kelapa sawit, serat dan cangkang kelapa sawit biasanya digunakan sebagai bahan bakar boiler untuk memproduksi uap yang dimanfaatkan dalam proses pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) dan dapat diintegrasikan dengan sistem turbin uap untuk pembangkitan listrik.

Direct Co-Firing Pada konfigurasi ini, biomassa (sebagai bahan bakar sekunder) dimasukkan bersamaan dengan batu bara (sebagai bahan bakar primer) ke dalam boiler yang sama. Direct co-firing lebih umum digunakan karena paling murah. Pada direct co-firing

sendiri, ada dua pendekatan yang dapat dilakukan yang pertama adalah pencampuran dan perlakuan awal terhadap biomassa dan batu bara dilakukan bersamaan sebelum diumpankan ke pembakar. Yang kedua, perlakuan awal biomassa dan batu bara dilakukan secara terpisah, kemudian baru diumpankan ke pembakar (Noraisha, dkk, 2021).

Parallel Co-Firing Pada metode ini memerlukan investasi pembangunan boiler berbahan bakar biomassa yang terpisah, kemudian uap yang dihasilkan dari boiler biomassa diumpankan ke dalam sistem uap boiler berbahan bakar batu bara eksisting. Pendekatan ini menggunakan boiler biomassa yang terpisah dari boiler batu bara yang memungkinkan pemanfaatan biomassa lebih maksimal. Walaupun konfigurasi ini membutuhkan investasi yang lebih besar dari pada direct co-firing, konfigurasi ini memiliki kelebihan tersendiri. Dengan menggunakan konfigurasi ini, sangatlah mungkin untuk digunakan bahan bakar dengan kandungan logam alkali dan klorin tinggi dan abu dari hasil pembakaran batu bara serta biomassa akan dihasilkan terpisah (raevia, dkk, 2022)

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif kualitatif. Metode ini dipilih untuk menggambarkan secara mendalam proses, teknik, serta manfaat pemanfaatan limbah kelapa sawit menjadi energi listrik di PT. X. Data yang diperoleh dianalisis secara naratif untuk menghasilkan gambaran komprehensif mengenai sistem pembangkit listrik berbasis biomassa.

Penelitian dilaksanakan di PT. X, sebuah perusahaan yang bergerak di bidang pengolahan kelapa sawit dan memanfaatkan limbahnya sebagai sumber energi listrik. Waktu penelitian direncanakan selama 3 bulan, meliputi tahap pengumpulan data, observasi lapangan, wawancara, serta analisis.

Teknik pengambilan data ini dilakukan beberapa cara yaitu:

a. Metode Observasi

Metode pengumpulan data ini dilakukan dengan cara mengadakan penelitian langsung ke lapangan untuk melihat secara langsung limbah dan peralatan yang mengubah limbah biomassa tandan kosong kelapa sawit menjadi energi Listrik

b. Metode dokumen

Metode ini dilaksanakan melalui tanya jawab secara langsung melalui narasumber yang menangani dan menguasai bidang pengolahan limbah TKKS.

c. Metode literature

Metode ini dengan cara memperoleh data-data dengan membaca dan mempelajari buku-buku maupun lewat situs-situs yang ada hubungannya dengan masalah yang akan dibahas.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Perhitungan

Perhitungan pemakaian bahan bakar

Untuk dapat mengetahui debit uap pada boiler sehingga diperlukan perhitungan pemakaian bahan bakar yang mana kapasitas boiler 45 ton/jam

a. Perhitungan kebutuhan bahan bakar

$$M_s = 13\% \times 45 \text{ ton/jam}$$

$$= 5,85 \text{ ton/jam}$$

$$= 5.850 \text{ kg/jam}$$

$$M_c = 7\% \times 45 \text{ ton/jam}$$

$$= 3,15 \text{ ton/jam}$$

$$= 3.150 \text{ kg/jam}$$

b. Perhitungan rasio bahan bakar

$$\begin{aligned} \text{Rasio serat} &= \frac{M_s}{M_s + M_c} \times 100\% \\ &= \frac{5,85}{5,85 + 3,15} \times 100\% \\ &= 65\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Rasio cangkang} &= \frac{M_c}{M_c + M_s} \times 100\% \\ &= \frac{3,15}{3,15 + 5,85} \times 100 \\ &= 35\% \end{aligned}$$

c. Nilai pembakaran bahan bakar

$$\begin{aligned} N_{pa \text{ fiber}} &= 8080 \times C + 34500 \times (H_2 - O_2/8) \\ &= (8080 \times 0,4015) + (34500 \times (0,0425 - (\frac{0,3010}{8}))) \\ &= 3244,12 + (34500 \times (0,0425 - 0,0376)) \\ &= 3413,17 \text{ Kkal / Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{pb \text{ fiber}} &= N_{pa \text{ fiber}} - (9 \times H_2) - 586 \\ &= 3413,17 - (9) (0,0425) - 586 \\ &= 2826,8 \text{ Kkal / Kg} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_{pa \text{ cangkang}} &= 8080 \times C + 34500 \times (H_2 - O_2/8) \\ &= (8080 \times 0,5134) + (34500 \times (0,0325 - (\frac{0,4115}{8}))) \\ &= 4148,27 + (34500 \times (0,0325 - 0,0514)) \\ &= 3496,22 \text{ Kkal/Kg} \end{aligned}$$

$$N_{pb \text{ cangkang}} = N_{pa \text{ cangkang}} - (9 \times H_2) - 586$$

$$\begin{aligned}
 &= 3496,22 - (9 \times 0,0325) - 586 \\
 &= 2909,92 \text{ Kkal/Kg} \\
 N_{pbc} &= \frac{M_s \times (N_{pbf}) + M_c \times (N_{pbc})}{M_s + M_c} \\
 &= \frac{0,65 \times (2826,8 \text{ Kkal / Kg}) + 0,35 \times (2909,92 \text{ Kkal/Kg})}{0,65 + 0,35} \\
 &= 1837,42 \text{ Kkal/kg} + 1018,47 \text{ Kkal/kg} \\
 &= 2855,89 \text{ Kkal/kg bahanbakar}
 \end{aligned}$$

Setelah didapatkan nilai pembakaran bawah sebesar 2855,89 Kkal/kg, dari nilai yang didapatkan dari perhitungan tersebut digunakan untuk perhitungan debit uap boiler.

d. Debit uap yang dihasilkan boiler

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{h \times G_{bb} \times NO}{h_{uap} - h_{air}} \\
 &= \frac{(0,75) \times 9000 \frac{\text{Kg}}{\text{jam}} \times 2855,89 \text{ Kkal/kg}}{672,38 \text{ Kkal/kg} - 75,34 \text{ Kkal/kg}} \\
 &= \frac{19277,25}{597,04} \\
 &= 32,288 \text{ Kg Uap / Jam}
 \end{aligned}$$

Perhitungan energi Listrik pada produksi limbah biomassa

Untuk limbah yang dihasilkan sebesar 56 ton/jam sehingga dapat dihitung berapa banyaknya produk silimbah biomassa sebagai berikut:

a. Perhitungan produksi limbah biomassa

$$\begin{aligned}
 \text{Serat} &= 13\% \times 56 \text{ ton/jam/ha} \\
 &= 7,28 \text{ ton/jam/ha} \\
 &= 7280 \text{ kg/jam/ha} \\
 \text{Cangkang} &= 7\% \times 56 \text{ ton/jam/ha} \\
 &= 3,92 \text{ ton/jam/ha} \\
 &= 3920 \text{ kg/jam/ha}
 \end{aligned}$$

b. Perhitungan kalor dari biomassa per hektar

Untuk menghitung kalor dari limbah biomassa dapat menggunakan nilai kalor (calorific value) masing – masing komponen sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{Serat} &= 19,1 \text{ Mj/kg dengan berat kering } 0,7 \\
 \text{Cangkang} &= 20,1 \text{ Mj/kg} \\
 \text{Perhitungan sebagai berikut:} \\
 \text{Serat} &= 7280 \text{ kg/jam} \times 19,1 \text{ Mj/kg} \times 0,7
 \end{aligned}$$

$$= 97333,6 \text{ Mj}$$

$$\text{Cangkang} = 3920 \text{ kg/jam} \times 20,1 \text{ Mj/kg}$$

$$= 78792 \text{ Mj}$$

Total kalor yang dihasilkan sebesar 176125,6 Mj.

c. Energi Listrik yang dihasilkan dari produksi limbah biomassa

Dari hasil kalor yang dihasilkan sebesar 176125,6 Mj dapat dihasilkan energi Listrik dari produksi limbah biomassa sebesar 119220 Kwh atau setara dengan 4967,5 Kw.

Dimana: 1 Mj = 0,277778 kwh dan 1 kwh = 0,041667 Kw

Perhitungan pembangkit generator

Generator dengan turbin uap, dimana uapnya di peroleh dari boiler. Komposisi produksi uap dari boiler adalah 45 Ton / Jam dengan komposisi sebagai berikut:

60 % Atau 27 Ton/Jam di gunakan untuk di perebusan biji sawit\

40 % Atau 18 Ton /Jam di gunakan untuk di turbin

Jadi perhitungan pembangkitan tegangan di turbin adalah dengan standar sebagai berikut:

$$\text{Turbin} = 40\% \times 45 \text{ ton/jam}$$

$$= 18000 \text{ kg/jam}$$

$$= \frac{18000}{24} \times 1 \text{ kw}$$

$$= 750 \text{ kw}$$

Perhitungan Analisa system pembebanan

Untuk memperoleh nilai daya Listrik pada setiap stasiun dengan tegangan terukur 380volt dan arus ampere sesuai dengan data yang didapat dan $\cos\varphi$ sebesar 0,85 sehingga dapat mengetahui daya terhitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos \varphi$$

$$P = \sqrt{3} \times 380 \times 47,571 \times 0,85$$

$$= 26,613 \text{ kw}$$

Tabel 1. hasil perhitungan daya Listrik dari seluruh stasiun.

Station	Daya terpasang (kw)	Daya terhitung (kw)
Kantor	40 kw	26,613
Rebusan	70 kw	95,218
Preasing dan treashing	150 kw	128,332
Loading ramp	80 kw	45,016
Kernel	300 kw	156,643
Landscape	29 kw	49,455
Total	669 kw	501,277

a. Analisis penggunaan energi Listrik dalam kwh pada station

Pada stasiun kantor daya terpasang 40 Kw dan daya terhitung 26,613 Kw dengan waktu pengoperasian selama 24 jam, untuk menghitung energi Listrik

$$\begin{aligned}
 W_{tp} &= P \times t \\
 &= 40 \text{ Kw} \times 24 \text{ Jam} \\
 &= 40000 \text{ Watt} \times 24 \text{ Jam} \\
 &= 960.000 \text{ Wh} \\
 &= 960 \text{ Kwh}
 \end{aligned}$$

Energi terhitung

$$\begin{aligned}
 W_{th} &= P \times t \\
 &= 26,613 \text{ Kw} \times 24 \text{ Jam} \\
 &= 26,613 \text{ Watt} \times 24 \text{ Jam} \\
 &= 638,712 \text{ Kwh}
 \end{aligned}$$

Kecukupan daya

Daya yang di dihasilkan dari generator sebesar 750 Kw yang terpakai 501,277 Kw

Jadi $750 \text{ Kw} - 501,277 \text{ Kw} = 248,723 \text{ Kw}$

Analisa

Jadi kapasitas generator adalah 1800 Kw sedangkan yang di bangkitkan oleh uapsebesar 750 dan x 750

$$\begin{aligned}
 \text{Jadi } &\frac{750}{1800} \times 100 \% \\
 &= \frac{750}{1800} \times 100\% = 41 \%
 \end{aligned}$$

Bila di bandingkan dengan pemakaian daya oleh beban maka kelebihan energi listrik yang di bangkitkan adalah 105 Kw Sistem pembebanan pabrik berupa

Kantor	: Lampu, ac, kulkas
Rebusan	: Kondensor, sistem pengatur suhu dan tekanan
Preasing dan treashing	: Mesin pengepresan,screw
Loading ramp	: hidrolic system,ramp door
Kernel	:Mesin pemecah kernel, mesin penggiling kernel
Landscape	:Lampu Sorot, lampu taman, Lampu jalan

B. Pembahasan

Berdasarkan dari perhitungan dapat diperoleh sebagai berikut:

- Dari perhitungan kebutuhan bahan bakar serat sebesar 5,85 ton/jam dan cangkang sebesar 3,15 ton/jam serta dari rasio pembakaran serat 65% dan cangkang 35% diperoleh nilai pembakaran bahan bakar sebesar 2855,89 Kkal/kg dengan debit uap yang diperoleh sebesar 32285 Kg uap/jam.
- Produksi limbah yang didapatkan sebesar 56 ton/jam/ha dapat diperoleh produksi limbah biomassa untuk serat sebesar 7,28 ton/jam dan 3,92 ton/jam cangkang dengan nilai kalor yang dihasilkan sebesar 176125,6 Mj serta didapatkan energi Listrik yang diperoleh sebesar 4967,5 Kw.
- Dari perhitungan pembangkit generator dengan komposisi bailer sebesar 45 ton/jam dapat diperoleh energi Listrik sebesar 750 Kw
- Dari Analisa system pembebanan di setiap stasiun diperoleh total daya yang terpasang sebesar 669 Kw dengan total daya yang terhitung sebesar 501,277 Kw.
- Untuk kecukupan daya dari perhitungan pembangkit generator sebesar 750 Kw dan daya yang terhitung sebesar 501,227 Kw artinya untuk kecukupan daya yang ada tercukupi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Limbah kelapa sawit memiliki potensi energi yang besar, terutama pada bagian cangkang, serat, dan tandan kosong yang mengandung energi tinggi sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler dalam industri kelapa sawit. Selain itu, limbah kelapa sawit tergolong sebagai biomassa yang termasuk sumber energi terbarukan dan lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Pemanfaatan limbah ini juga berkontribusi dalam pengurangan limbah organik di pabrik, sehingga dapat menekan akumulasi limbah

sekaligus menurunkan emisi gas rumah kaca jika dibandingkan dengan limbah yang dibiarkan membusuk atau dibakar secara terbuka. Lebih lanjut, pemanfaatan limbah kelapa sawit sebagai bahan bakar dapat mendukung proses pembangkitan tegangan generator dengan sistem turbin uap dari boiler serta proses pembebanan listrik pada generator, selama penggunaannya tetap sesuai dengan spesifikasi generator yang ada agar sistem dapat beroperasi dengan aman dan efisien.

DAFTAR REFERENSI

- Alkusma, Y. M., Hermawan, H., & Hadiyanto, H. J. J. I. L. U. (2016). Pengembangan potensi energi alternatif dengan pemanfaatan limbah cair kelapa sawit sebagai sumber energi baru terbarukan di Kabupaten Kotawaringin Timur. *Jurnal Ilmu Lingkungan Undip*, 14(2), 96–102. <https://doi.org/10.14710/jil.14.2.96-102>
- Dewi, R., Djufri, U., & Wijaya, H. (2022). Pemanfaatan biomassa padat kelapa sawit sebagai energi baru terbarukan di PLTU pabrik kelapa sawit PT. Perkebunan Nusantara VI Unit Usaha Bunut. *Journal of Electrical Power Control and Automation (JEPCA)*, 5(1), 17. <https://doi.org/10.33087/jepca.v5i1.71>
- Faisal, M. (2024). Eksperimen pembakaran dalam boiler untuk evaluasi kinerja dan emisi menggunakan bahan bakar padat kelapa sawit. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(3), 10175–10183.
- Farisi, F. A., Budiyono, & Setiani, O. (2018). Pengaruh sulfur dioksida (SO₂) pada udara ambien terhadap risiko kejadian pneumonia pada balita. *Jurnal Kesehatan Masyarakat (e-Journal)*, 6(4), 439–446.
- Ginanjar, T., Lubis, G. S., Simanjuntak, Y. M., & Teknik Mesin, J. (n.d.). Analisa kebutuhan bahan bakar boiler dengan melakukan uji kalori pada pabrik kelapa sawit PT. Sentosa Prima Agro.
- Guangul, F. M., Sulaiman, S. A., & Ramli, A. (2014). Study of the effects of operating factors on the resulting producer gas of oil palm fronds gasification with a single throat downdraft gasifier. *Renewable Energy*, 72, 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.07.022>
- Haryanti, A., Norsamsi, N., Sholiha, P. S. F., & Putri, N. P. (2014). Studi pemanfaatan limbah padat kelapa sawit. *Konversi*, 3(2), 20–29. <https://doi.org/10.20527/k.v3i2.161>
- Laila, L., & Qoderi, M. Y. (2019). Analisis kebutuhan energi pabrik kelapa sawit Sungai Rungau Mill. *Journal of Applied Science*, 1(1). <https://doi.org/10.36870/japps.v1i1.7>
- Mahlia, T. M. I., Abdulmuin, M., Alamsyah, T. M. I., & Mukhlisien, D. (2001). An alternative energy source from palm wastes industry for Malaysia and Indonesia. *Energy Conversion and Management*, 42(18), 2109–2118. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)00166-7](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)00166-7)
- Nugraha, E. L. (2018). Studi integrasi torrefaction sebagai pre-treatment tandan kosong kelapa sawit pada co-firing biomassa dengan pendekatan computational fluid dynamics.
- Parinduri, L., & Parinduri, T. (2020). Konversi biomassa sebagai sumber energi terbarukan. *Journal of Electrical Technology*, 5(2), 88–92.

- Praevia, M. F., & Widayat. (2022). Analisis pemanfaatan limbah tandan kosong kelapa sawit sebagai co-firing pada PLTU batubara. *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan*, 3(1), 28–37. <https://doi.org/10.14710/jebt.2022.13367>
- Pranoto, B., Pandin, M., Fithri, S. R., & Nasution, S. (2013). Biomass potential map as a database of national scale biomass energy development. *Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan*, 12(2), 123–130.
- Rahardja, B., dkk. (2022). Water tube boiler pabrik kelapa sawit kapasitas 45 ton/jam. Bekasi: Politeknik Kelapa Sawit Citra Widya Edukasi.
- Suganal, S., & Hudaya, G. K. (2020). Bahan bakar co-firing dari batubara & biomassa tertorefaksi. *Journal of Electrical Technology*, 5(2), 88–92.
- Talla, H., Amijaya, H., Harijoko, A., & Huda, M. (2013). Karakteristik batubara dan pengaruhnya terhadap proses pencairan. *Reaktor*, 14(4), 267–271. <https://doi.org/10.14710/reaktor.14.4.267-271>
- Tanbar, F., Purba, S., Samsudin, A. S., Supriyanto, E., Aditya, I. A., PT PLN, et al. (2021). Analisa karakteristik pengujian co-firing biomassa sawdust pada PLTU type pulverized coal boiler sebagai upaya bauran renewable energy. *Jurnal Offshore*, 5(2), 2549–8681.
- Warsito, J., Sabang, S. M., & Mustapa, K. (2016). Pembuatan pupuk organik dari limbah tandan kosong kelapa sawit. *Jurnal Akademika Kimia*, 5(1), 8–15. <https://doi.org/10.22487/j24775185.2016.v5.i1.7994>
- Winaya, I. N. S., & Susila, I. B. A. D. (2010). Co-firing sistem fluidized bed berbahan bakar batubara dan ampas tebu. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, 4(2), 180–188.
- Wulandari, S., Sumanto, S., & Saefudin, S. (2020). Pengelolaan biomassa tanaman dalam bioindustri perkebunan mendukung pengembangan bioenergi. *Perspektif*, 18(2), 135. <https://doi.org/10.21082/psp.v18n2.2019.135-149>
- Yacob, N. S., Mohamed, H., & Shamsuddin, A. H. (2021). Investigation of palm oil wastes characteristics for co-firing with coal. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 23, 34–42. <https://doi.org/10.37934/araset.23.1.3442>
- Yatno. (2016). Studi pemanfaatan limbah padat kelapa sawit sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga uap guna memenuhi kebutuhan energi listrik pada proses pengolahan kelapa sawit di PTPN IV Usaha Adolina.