

Makalah Penelitian

Analisis Kinerja Sistem Pembangkit Listrik Industri Pabrik Kelapa Sawit Di PT Palem Segar Lestari Desa Tepian Nunukan Barat Kabupaten Nunukan Kalimantan Utara

Andri Supriadi¹, Dino Erivianto², Siti Anisah³

^{1,2,3} Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Panca Budi
email: andriabjar@gmail.com¹, derivianto@gmail.com², sitianisah@dosen.pancabudi.ac.id³

Corresponding Author

ABSTRACT

Palm oil mills produce biomass in the form of fibre and shells that have the potential to be utilised as an energy source for internal power generation. This study aims to analyse the performance of the biomass-based power generation system at the PT Palem Segar Lestari Palm Oil Mill in terms of generator capacity suitability, energy efficiency, and operational stability. The research method used is a descriptive quantitative approach through the measurement of operational parameters and technical performance analysis based on thermodynamic principles and energy balance. The analysis was conducted on the mill's processing capacity, process steam requirements, biomass heat energy, boiler steam production, and steam turbine power. The results showed that at an operating capacity of around 45 tonnes of fresh fruit bunches per hour, the minimum steam requirement reached $\pm 27,000$ kg/hour, and the power generation system was capable of producing electricity according to the mill's needs with an electricity consumption intensity of 15–17 kW/tonne of fresh fruit bunches. Overall, the biomass power generation system at PT Palem Segar Lestari demonstrates effective performance in supporting independent factory operations with potential for optimisation in fuel management and boiler efficiency.

Keywords: power plant efficiency, PKS, biomass, boiler, turbine, PT Palem Segar Lestari

ABSTRAK

Pabrik kelapa sawit menghasilkan biomassa berupa fiber dan cangkang yang berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi untuk pembangkit listrik internal. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja sistem pembangkit listrik berbasis biomassa di Pabrik Kelapa Sawit PT Palem Segar Lestari ditinjau dari kesesuaian kapasitas pembangkit, efisiensi energi, dan stabilitas operasional. Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif deskriptif melalui pengukuran parameter operasional dan analisis kinerja teknik berbasis prinsip termodinamika dan neraca energi. Analisis dilakukan terhadap kapasitas olah pabrik, kebutuhan uap proses, energi panas biomassa, produksi uap boiler, dan daya turbin uap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kapasitas operasi sekitar 45 ton TBS/jam, kebutuhan uap minimum mencapai ± 27.000 kg/jam, dan sistem pembangkit mampu menghasilkan daya listrik sesuai kebutuhan pabrik dengan intensitas konsumsi listrik sebesar 15–17 kW/ton TBS. Secara keseluruhan, sistem pembangkit listrik biomassa di PT Palem Segar Lestari menunjukkan kinerja yang efektif dalam mendukung operasional pabrik secara mandiri dengan potensi optimasi pada pengelolaan bahan bakar dan efisiensi boiler.

Kata Kunci: Efisiensi pembangkit, PKS, biomassa, boiler, turbin, PT Palem Segar Lestari

1. Pendahuluan

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor strategis di Indonesia karena



Lisensi
Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

kontribusinya terhadap ekspor dan pembangunan wilayah. Namun, proses pengolahan tandan buah segar menghasilkan limbah padat dan cair dalam jumlah besar yang berpotensi menimbulkan dampak lingkungan apabila tidak dikelola dengan baik. Biomassa kelapa sawit seperti cangkang, serat, dan tandan kosong, serta limbah cair POME (*Palm Oil Mill Effluent*), memiliki potensi energi yang tinggi dan dapat dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik internal pabrik (*Ahmed et al., 2015*). Pemanfaatan limbah ini berperan penting dalam mengurangi ketergantungan industri terhadap energi fosil sekaligus meningkatkan efisiensi operasional pabrik.

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa POME dapat diolah melalui proses anaerobik untuk menghasilkan biogas yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar mesin gas atau generator listrik (*Ahmed et al., 2015*). Selain itu, kombinasi pemanfaatan biogas dan biomassa padat seperti cangkang dan serat dilaporkan mampu meningkatkan stabilitas sistem pembangkit listrik, khususnya pada pabrik kelapa sawit yang berlokasi jauh dari jaringan listrik nasional (*ScienceDirect Review, 2019*). Di sisi lain, biomassa padat telah lama digunakan sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan uap penggerak turbin, dengan tingkat efisiensi yang relatif baik apabila kadar air bahan bakar dapat dikendalikan (*Erivianto et al., 2022*).

Meskipun demikian, beberapa jenis biomassa seperti tandan kosong memiliki kadar air yang tinggi sehingga memerlukan pra-pengolahan, seperti pengeringan atau densifikasi, agar nilai kalor dan kestabilan pembakaran dapat ditingkatkan (*Briquetting Study, 2020*). Berbagai studi juga melaporkan permasalahan teknis dalam sistem pembangkit berbasis biomassa, antara lain ketidakstabilan pasokan bahan bakar akibat variasi kadar air, risiko slagging dan fouling pada boiler, serta keterbatasan kapasitas pengolahan POME yang menyebabkan produksi biogas belum optimal (*JCEIB Review, 2021*).

Dari perspektif lingkungan, pemanfaatan limbah sawit sebagai sumber energi dinilai sebagai strategi yang efektif untuk menurunkan emisi gas rumah kaca. Penangkapan metana dari POME dapat mengurangi emisi, sementara pembakaran biomassa secara termal memiliki jejak karbon yang lebih rendah dibandingkan bahan bakar fosil karena biomassa tergolong energi terbarukan (*WIREs Energy & Environment, 2022*). Sejalan dengan hal tersebut, pemerintah Indonesia mendorong pemanfaatan biomassa dan limbah industri sebagai bagian dari kebijakan transisi energi nasional, termasuk melalui program co-firing dan pengembangan energi terbarukan berbasis limbah (*Kementerian ESDM, 2024*).

Walaupun potensi energi biomassa dan POME di pabrik kelapa sawit sangat besar, kajian teknis yang membahas kinerja nyata sistem pembangkit listrik pada level pabrik tertentu masih terbatas, terutama pada pabrik yang berlokasi di wilayah perbatasan. Sebagian besar literatur masih berfokus pada potensi nasional atau kajian skala laboratorium, sehingga belum sepenuhnya menggambarkan kondisi operasional aktual di lapangan (*JCEIB Review*, 2021).

Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengkaji sistem pembangkit listrik berbasis biomassa padat dan biogas POME di PT. Palem Segar Lestari yang berlokasi di Desa Tepian, Nunukan Barat, Kalimantan Utara. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran kondisi eksisting pembangkit, tingkat efisiensi sistem, serta tantangan dan potensi pengembangan pembangkit listrik berbasis limbah kelapa sawit sebagai sumber energi berkelanjutan di wilayah perbatasan.

2. Tinjauan Pustaka

2.1 Sistem Pembangkit Listrik pada Pabrik Kelapa Sawit

Pabrik kelapa sawit (PKS) umumnya mengoperasikan sistem pembangkit listrik mandiri yang memanfaatkan limbah padat dan cair hasil proses pengolahan kelapa sawit. Limbah padat seperti serabut (fiber), cangkang (shell), dan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi, yang selanjutnya menggerakkan turbin uap dan generator listrik (Erivianto et al., 2016; Michel, 2022). Sistem pembangkit ini tidak hanya memasok kebutuhan listrik internal pabrik, tetapi juga meningkatkan efisiensi energi karena uap yang dihasilkan dimanfaatkan kembali untuk proses produksi seperti sterilisasi dan pressing.

Konfigurasi pembangkit listrik pada PKS umumnya berbasis siklus uap sederhana yang terdiri atas boiler, turbin uap, dan generator. Kinerja sistem sangat dipengaruhi oleh karakteristik biomassa, khususnya nilai kalor, kadar air, dan homogenitas bahan bakar, yang menentukan efisiensi pembakaran dan kualitas uap yang dihasilkan (Erivianto et al., 2022). Variasi tekanan dan temperatur uap masuk ke turbin juga dilaporkan berpengaruh signifikan terhadap efisiensi isentropik turbin dan output daya listrik (Sinaga et al., 2022).

2.2 Integrasi Biogas POME sebagai Sumber Energi

Selain biomassa padat, PKS modern mulai mengintegrasikan pemanfaatan limbah cair Palm Oil Mill Effluent (POME) sebagai sumber energi terbarukan. POME dapat diolah melalui proses anaerobik untuk menghasilkan biogas yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar generator listrik atau sebagai pendukung pembakaran pada boiler (Sucahyo et al., 2023). Pemanfaatan biogas dari POME meningkatkan fleksibilitas sistem pembangkit dan mengurangi ketergantungan pada biomassa padat. Studi empiris menunjukkan bahwa pembangkit listrik berbasis biogas di PKS mampu mencapai efisiensi termal sekitar 40%, sehingga secara teknis layak untuk mendukung kebutuhan energi pabrik (Purba et al., 2024).

2.3 Komponen Utama dan Faktor Penentu Kinerja Pembangkit



Lisensi

Lisensi Internasional Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0.

Pembangkit listrik berbasis biomassa di PKS terdiri atas sistem penanganan bahan bakar, boiler, turbin uap, generator, serta sistem kontrol dan pengendalian emisi. Setiap komponen saling terkait dan menentukan performa keseluruhan sistem (Michel, 2022). Pra-pengolahan biomassa, seperti pengeringan dan homogenisasi bahan bakar, terbukti mampu meningkatkan stabilitas pembakaran dan mengurangi permasalahan *fouling* serta *slagging* pada *boiler* (Erivianto et al., 2022).

Kinerja *boiler* dipengaruhi oleh rasio udara–bahan bakar, desain burner, dan pengelolaan abu, sementara kinerja turbin uap sangat bergantung pada kualitas dan kestabilan suplai uap dari boiler (Sinaga et al., 2022). Selain faktor teknis, keandalan dan *availability* pembangkit juga ditentukan oleh sistem pemeliharaan, monitoring operasional, dan konsistensi suplai biomassa. Penerapan monitoring berkelanjutan dan *predictive maintenance* dilaporkan mampu meningkatkan *availability* pembangkit secara signifikan (Putra et al., 2023; Purba et al., 2024).

2.4 Studi Preseden

Sejumlah penelitian terdahulu telah membahas potensi dan kinerja pembangkit listrik berbasis biomassa pada PKS, baik dari sisi kelayakan teknis, neraca energi, maupun efisiensi sistem. Nuryadi et al. (2019) dan Sulaiman et al. (2018) menunjukkan bahwa biomassa sawit seperti fiber dan cangkang mencukupi untuk memenuhi kebutuhan listrik internal pabrik. Studi lain menekankan analisis kinerja aktual boiler dan turbin pada PKS tertentu serta melaporkan variasi efisiensi yang dipengaruhi oleh kondisi operasional dan kualitas biomassa (Hidayat et al., 2021).

Di sisi lain, beberapa penelitian menyoroti potensi nasional biomassa sawit dan pemanfaatan POME sebagai sumber biogas untuk pembangkit listrik (Sri Wahyuni et al., 2024; Sucahyo et al., 2023). Namun demikian, sebagian besar studi tersebut masih berfokus pada estimasi potensi atau analisis parsial, dan belum banyak yang mengkaji kinerja nyata sistem pembangkit terintegrasi biomassa padat dan biogas POME pada level operasional pabrik tertentu, khususnya di wilayah perbatasan dengan keterbatasan infrastruktur dan sistem kelistrikan mandiri.

Berdasarkan kajian pustaka tersebut, penelitian ini diarahkan untuk mengevaluasi kinerja sistem pembangkit listrik berbasis biomassa padat dan biogas POME pada skala pabrik, guna menjembatani kesenjangan antara potensi teoritis dan kondisi operasional aktual di lapangan.



3. Bahan dan Metode

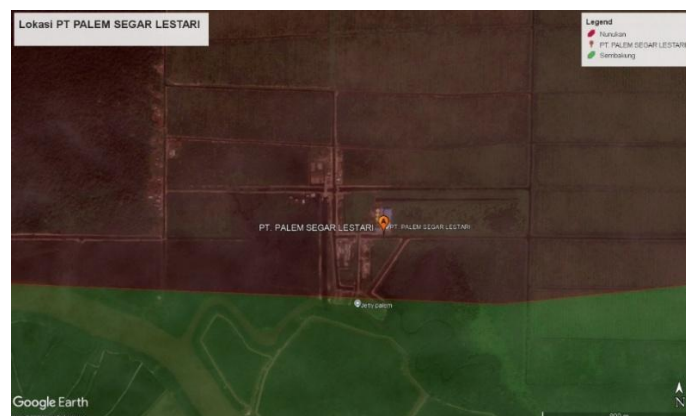
Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif untuk menganalisis kinerja sistem pembangkit listrik berbasis biomassa pada pabrik kelapa sawit. Pendekatan ini digunakan untuk mengevaluasi performa teknis pembangkit melalui pengukuran parameter operasional dan perhitungan efisiensi komponen utama sistem, yaitu boiler, turbin uap, dan sistem pembangkit secara keseluruhan.

Pendekatan kuantitatif deskriptif memungkinkan analisis kinerja sistem berdasarkan data numerik hasil pengukuran aktual di lapangan dan perhitungan matematis berbasis prinsip termodinamika (Sugiyono, 2021; Creswell, 2018). Metode ini banyak digunakan dalam evaluasi pembangkit listrik biomassa di pabrik kelapa sawit (Sinaga et al., 2022; Purba et al., 2024).

3.1 Lokasi Penelitian

Penelitian dilaksanakan di PT Palem Segar Lestari yang berlokasi di Desa Tepian, Kecamatan Sembakung, Kabupaten Nunukan, Provinsi Kalimantan Utara. Pabrik ini mengoperasikan sistem pembangkit listrik mandiri berbasis biomassa kelapa sawit untuk memenuhi kebutuhan energi proses produksi. Lokasi penelitian dipilih karena ketersediaan biomassa yang berkelanjutan serta karakteristik wilayah perbatasan yang bergantung pada pembangkit internal.

Peta Citra Lokasi PT Palem Segar Lestari dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1 Peta Citra Lokasi PT Palem Segar Lestari

Sumber: Hasil Analisis

3.2 Teknik Pengumpulan Data



Tabel 1. Data Primer dan Sekunder

No	Jenis Data	Parameter	Nilai Data	Satuan	Sumber Data	Teknik Pengumpulan
1	Primer	Kapasitas olah TBS	35-50	ton	Unit proses PKS	Pencatatan jumlah TBS yang diolah
2	Primer	Waktu pengolahan TBS	50-70	menit	Unit proses PKS	Observasi dan pencatatan waktu proses
3	Primer	Kapasitas operasi efektif	45	ton/jam	Unit proses PKS	Derjungan dari data aktual
4	Primer	Kebutuhan daya listrik pabrik	675-765	kW	Unit generator	Pengukuran menggunakan power meter
5	Primer	Tekanan uap boiler	20	bar	Unit boiler	Pengukuran menggunakan pressure gauge
6	Primer	Temperatur uap boiler	320	°C	Unit boiler	Pengukuran menggunakan thermocouple
7	Primer	Laju aliran uap	±27.000	kg/jam	Pipa uap utama	Pengukuran menggunakan steam flow meter
8	Primer	Konsumsi fiber	4.000	kg/jam	Area boiler	Pencatatan operasional
9	Primer	Konsumsi cangkang	1.500	kg/jam	Area boiler	Pencatatan operasional
10	Sekunder	Nilai kalor fiber	2.311	kcal/kg	Literatur/PKS	Studi literatur
11	Sekunder	Nilai kalor cangkang	3.479,1	kcal/kg	Literatur/PKS	Studi literatur
12	Sekunder	Efisiensi boiler	±73	%	Spesifikasi & literatur	Studi dokumen
13	Sekunder	Efisiensi turbin uap	±70	%	Spesifikasi & literatur	Studi dokumen
14	Sekunder	Entalpi air umpan	420	kJ/kg	Tabel uap	Studi literatur
15	Sekunder	Entalpi uap masuk turbin	±2.800-3.000	kJ/kg	Tabel uap	Studi literatur

No	Jenis Data	Parameter	Nilai Data	Satuan	Sumber Data	Teknik Pengumpulan
16	Sekunder	Entalpi uap keluar turbin	±2.300-2.500	kJ/kg	Tabel uap	Studi literatur

Sumber: Hasil Pengumpulan Data

3.3 Variabel dan Parameter Penelitian

Variabel penelitian meliputi parameter operasional dan indikator kinerja pembangkit listrik biomassa. Parameter yang diukur antara lain tekanan uap, temperatur uap, laju aliran uap, konsumsi bahan bakar biomassa, daya listrik terbangkitkan, dan jam operasi mesin. Indikator kinerja utama yang dianalisis adalah efisiensi boiler, efisiensi turbin uap, dan efisiensi sistem pembangkit secara keseluruhan.

3.4 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan menggunakan metode analisis kinerja teknik (engineering performance analysis) dengan pendekatan neraca energi dan prinsip termodinamika untuk



mengevaluasi kinerja sistem pembangkit listrik biomassa. Perhitungan dilakukan berdasarkan data operasional aktual yang diperoleh dari lapangan.

Kapasitas olah aktual pabrik dihitung berdasarkan jumlah TBS yang diolah dan waktu proses menggunakan persamaan.

$$Q_{TBS} = \frac{M_{TBS}}{t} \times 60 \dots\dots\dots (1)$$

Keterangan :

Q_{TBS} = kapasitas olah aktual pabrik (ton/jam)

M_{TBS} = massa TBS yang diolah (ton)

t = waktu pengolahan (menit)

Kebutuhan uap proses ditentukan berdasarkan kapasitas olah aktual dan konsumsi uap spesifik pabrik kelapa sawit, dengan persamaan:

$$m_{uap} = Q_{TBS} \times k_{uap} \dots\dots\dots (2)$$

Keterangan:

m_{uap} = laju aliran uap proses (kg/jam)

k_{uap} = konsumsi uap spesifik (kg uap/ton TBS)

Energi panas total bahan bakar biomassa dihitung berdasarkan laju konsumsi dan nilai kalor masing-masing jenis biomassa menggunakan persamaan:

$$Q_{bb} = \sum^n (m_i \times LHV_i) \dots\dots\dots (3)$$

Keterangan :

Q_{bb} = energi panas total bahan bakar biomassa (kJ/jam)

m_i = laju konsumsi biomassa ke- i (kg/jam)

LHV_i = nilai kalor bawah biomassa ke- i (kJ/kg)

i = jenis biomassa (fiber dan cangkang)

Produksi uap aktual boiler dihitung berdasarkan energi panas bahan bakar dan efisiensi boiler dengan persamaan:



$$m_{uap} = \frac{\eta_{boiler} \times Q_{bb}}{h_{uap} - h_{air}} \dots\dots\dots (4)$$

Daya mekanik turbin uap dihitung berdasarkan laju aliran uap dan selisih entalpi uap masuk dan keluar turbin menggunakan persamaan:

$$P_{turbin} = m_{uap}(h_{in} - h_{out}) \times \eta_{turbin} \dots\dots\dots (5)$$

Keterangan:

P_{turbin} = daya mekanik turbin (kW)

h_{in} = entalpi uap masuk turbin (kJ/kg)

h_{out} = entalpi uap keluar turbin (kJ/kg)

η_{turbin} = efisiensi turbin uap

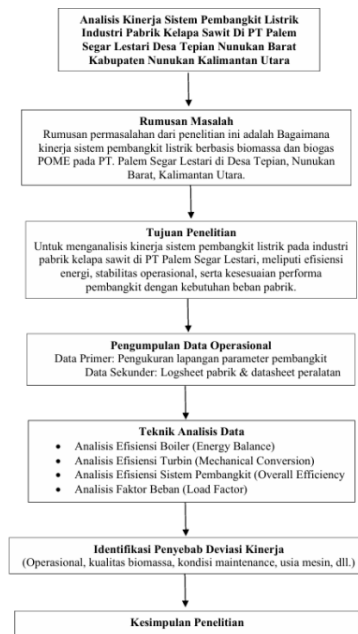
Intensitas konsumsi listrik dihitung menggunakan persamaan:

$$IKE = \frac{P_{listrik}}{Q_{TBS}} \dots\dots\dots (6)$$

Keterangan:

IKE = intensitas konsumsi listrik (kW/ton TBS)

3.5 Kerangka Berpikir Penelitian



Gambar 4. Kerangka Berpikir

Sumber: Komponen Penelitian



4. Hasil

A. Gambaran Umum Sistem Pembangkit Listrik di PKS PT Palem Segar Lestari

Pabrik Kelapa Sawit (PKS) PT Palem Segar Lestari berlokasi di Desa Tepian, Kecamatan Nunukan Barat, Kabupaten Nunukan, Provinsi Kalimantan Utara. Pabrik ini dirancang dengan kapasitas olah maksimum sebesar 60 ton Tandan Buah Segar (TBS) per jam, dengan variasi operasi aktual pada kapasitas 30 TPH, 45 TPH, dan 60 TPH sesuai ketersediaan bahan baku dan kondisi operasional. Seluruh kebutuhan energi listrik dan uap proses dipenuhi secara mandiri melalui sistem pembangkit listrik berbasis biomassa.

Sistem pembangkit yang digunakan merupakan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) skala industri dengan bahan bakar biomassa berupa serat (fiber) dan cangkang (shell) yang dihasilkan dari proses pengolahan kelapa sawit. Energi panas hasil pembakaran biomassa di dalam boiler dimanfaatkan untuk menghasilkan uap bertekanan yang selanjutnya digunakan secara simultan untuk kebutuhan proses pengolahan TBS dan sebagai penggerak turbin uap untuk pembangkitan energi listrik.

Berdasarkan data operasional, konsumsi energi listrik pabrik berada pada kisaran 15–17 kW per ton TBS. Dengan demikian, pada kapasitas operasi 45 TPH, kebutuhan daya listrik berkisar antara 675–765 kW, sedangkan pada kapasitas maksimum 60 TPH kebutuhan listrik meningkat hingga 900–1.020 kW. Energi listrik tersebut digunakan untuk mengoperasikan unit-unit utama pabrik, seperti sterilizer, thresher, digester, screw press, clarifier, ripple mill, conveyor, serta sistem pendukung lainnya.

Selain listrik, sistem boiler juga menyuplai uap untuk proses pengolahan TBS dengan kebutuhan spesifik sebesar 550 kg uap per ton TBS. Pada kapasitas 45 TPH, total kebutuhan uap proses mencapai sekitar 24.750 kg/jam, sedangkan pada kapasitas 60 TPH meningkat hingga 33.000 kg/jam. Sebagian uap tersebut juga digunakan untuk menggerakkan turbin uap dengan kebutuhan spesifik sebesar 27 kg uap per kW listrik yang dihasilkan.

Secara keseluruhan, sistem pembangkit listrik di PKS PT Palem Segar Lestari merupakan sistem kogenerasi terintegrasi yang dirancang untuk mendukung efisiensi energi, keberlanjutan operasional, serta pengurangan biaya energi melalui pemanfaatan biomassa internal pabrik.

B. Analisis Kapasitas Olah dan Kebutuhan Uap

Berdasarkan data operasional, diketahui bahwa pada salah satu kondisi operasi pabrik mengolah 50 ton TBS dalam waktu 50 menit.

Perhitungan kapasitas olah:

$$Q_{TBS} = \frac{50}{50} \times 60 = 60 \text{ ton/jam} \dots\dots\dots (1)$$



Namun berdasarkan batas desain dan operasi aktual, kapasitas kerja efektif pabrik dibatasi pada 45 ton/jam. Nilai ini digunakan sebagai dasar perhitungan kebutuhan uap proses.

Dengan asumsi konsumsi uap spesifik pabrik kelapa sawit sebesar 600 kg uap/ton TBS (nilai konservatif literatur):

$$m'_{uap} = 45 \times 600 = 27.000 \text{ kg/jam} \dots\dots\dots (2)$$

Hasil ini menunjukkan bahwa pada kapasitas 45 TPH, sistem boiler harus mampu menyuplai uap minimum sebesar 27 ton/jam agar proses produksi dan pembangkitan listrik dapat berjalan simultan. Nilai ini konsisten dengan standar konsumsi uap pada PKS berkapasitas menengah.

C. Analisis Energi Panas Biomassa

Jenis bahan bakar yang digunakan adalah fiber dan cangkang. Nilai kalor berdasarkan data lapangan dan literatur:

- Fiber: 2.311 kcal/kg
- Cangkang: 3.479,1 kcal/kg

laju konsumsi bahan bakar:

- Fiber: 4.000 kg/jam
- Cangkang: 1.500 kg/jam

Konversi nilai kalor ke kJ/kg:

$$\text{Fiber: } 2.311 \times 4,186 = 9.674 \text{ kJ/kg}$$

$$\text{Cangkang: } 3.479,1 \times 4,186 = 14.565 \text{ kJ/kg}$$

Energi panas total bahan bakar:

$$Q_{bb} = (4.000 \times 9.674) + (1.500 \times 14.565) \dots\dots\dots (3)$$

$$Q_{bb} = 38.696.000 + 21.847.500$$

$$Q_{bb} = 60.543.500 \text{ kJ/jam}$$

Cangkang memberikan kontribusi energi yang lebih besar per satuan massa dibandingkan fiber. Kombinasi keduanya memungkinkan fleksibilitas operasi boiler dan menjaga kestabilan pembangkitan uap.

D. Analisis Produksi Uap Boiler

Berdasarkan data yang diperoleh:

- Efisiensi boiler: 73%
- Entalpi uap jenuh: 2.780 kJ/kg
- Entalpi air umpan: 420 kJ/kg



Selisih entalpi:

$$\Delta h = 2.780 - 420 = kJ/kg$$

Produksi uap aktual:

$$\dot{m}_{uap} = \frac{0,73 \times 60.543.500}{2.360} \dots\dots\dots (A)$$

$$\dot{m}_{uap} = \frac{44.196.755}{2.360}$$

$$\dot{m}_{uap} = 18.728 \text{ kg/jam}$$

Produksi uap dari energi biomassa berada di bawah kebutuhan teoritis 27.000 kg/jam. Hal ini menjelaskan perlunya optimasi rasio bahan bakar, peningkatan efisiensi boiler, atau pemanfaatan cangkang tambahan untuk menjaga kestabilan suplai uap.

E. Analisis Daya Turbin Uap

Asumsi parameter turbin:

- Laju uap ke turbin: 18.728 kg/jam
- Selisih entalpi turbin: 500 kJ/kg
- Efisiensi turbin: 70%

Konversi laju uap ke kg/detik:

$$\dot{m} = \frac{18.728}{3.600} = 5,20 \text{ kg/detik}$$

Daya mekanik turbin:

$$P_{turbin} = 5,20 \times 500 \times 0,70 \dots\dots\dots (5)$$

$$P_{turbin} = 1.820 \text{ kW}$$

Dengan asumsi efisiensi generator 90%, daya listrik:

$$P_{listrik} = 1.820 \times 0,90 = 1.638 \text{ kW}$$

Daya listrik teoritis yang dihasilkan lebih besar dibandingkan kebutuhan aktual pabrik (675–765 kW). Hal ini menunjukkan bahwa sistem memiliki cadangan kapasitas yang penting untuk mengantisipasi fluktuasi beban dan penurunan kualitas biomassa.

F. Analisis Intensitas Konsumsi Listrik

Dengan beban pabrik rata-rata 720 kW dan kapasitas olah 45 ton/jam:



$$IKE = \frac{720}{45} = 16 \text{ kW/ton TBS} \dots\dots\dots (6)$$

Nilai intensitas konsumsi listrik sebesar 16 kW/ton TBS menunjukkan bahwa sistem pembangkitan internal bekerja secara efisien dan masih berada dalam rentang normal industri kelapa sawit, yaitu 15–18 kW/ton TBS.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan kapasitas olah dan kebutuhan uap, diketahui bahwa pada kapasitas operasi sekitar 45 ton TBS/jam, sistem memerlukan suplai uap minimum sebesar ±27.000 kg/jam untuk mendukung proses produksi dan pembangkitan listrik secara simultan. Hasil analisis energi menunjukkan bahwa kombinasi biomassa fiber dan cangkang mampu menyediakan energi panas yang mencukupi, meskipun pada kondisi tertentu diperlukan pengaturan rasio bahan bakar untuk menjaga kecukupan produksi uap. Perhitungan daya turbin menunjukkan bahwa sistem pembangkit mampu menghasilkan daya listrik yang sesuai dengan kebutuhan aktual pabrik, dengan intensitas konsumsi listrik berada pada kisaran 15–17 kW/ton TBS, yang masih berada dalam rentang efisiensi industri kelapa sawit. Secara keseluruhan, sistem pembangkit listrik biomassa di PT Palem Segar Lestari telah beroperasi secara efektif dan andal dalam memenuhi kebutuhan energi internal pabrik, dengan potensi optimasi lebih lanjut pada pengelolaan bahan bakar dan efisiensi boiler.

REFERENSI

- [1] Aziz, N., Yusoff, S., & Azhari, A. (2019). Performance evaluation of biomass boiler in palm oil mill cogeneration system. *Journal of Cleaner Production*, 234, 453–462.
- [2] Badan Pengelola Dana Perkebunan Kelapa Sawit (BPDPKS). (2022). *Statistik Industri Sawit Nasional*. Jakarta: BPDPKS.
- [3] Basiron, Y., & Simeh, M. A. (2020). Energy efficiency and cogeneration in the palm oil industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 118, 109526.
- [4] Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2015). *Thermodynamics: An engineering approach* (8th ed.). McGraw-Hill Education.
- [5] Creswell, J. W. (2018). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (5th ed.). SAGE Publications.
- [6] Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE). (2023). *Statistik Energi Baru Terbarukan Indonesia*. Jakarta: Kementerian ESDM.
- [7] Erivianto, D., Dani, A., & Gunawan, H. (2022). Pengolahan biomassa tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan bakar pembangkit listrik tenaga uap. *Jurnal Indonesia Sosial Teknologi*, 3(1), 162–171.
- [8] Erivianto, D., Abhi P., B., & Notosudjono, D. (2016). Penggunaan limbah padat kelapa sawit untuk menghasilkan tenaga listrik pada existing boiler. *Sainstech*, 26(2), 8593.
- [9] Hadi, M., Abdullah, S., & Ramadhan, I. (2021). Boiler performance evaluation in biomass-based power generation at palm oil mill. *Journal of Energy Systems Engineering*, 9(2), 77–85.
- [10] Malaysian Palm Oil Board (MPOB). (2021). *Palm Biomass Energy Utilization Report*. Kuala Lumpur: MPOB.



- [11] Mahlia, T. M. I., Abdulmuin, M. Z., Alamsyah, T. M. I., & Mukhlisien, D. (2020). Dynamic operation of biomass-based cogeneration systems in palm oil mills. *Energy Reports*, 6, 191–201.
- [12] Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (2019). *Fundamentals of engineering thermodynamics* (9th ed.). Wiley.
- [13] Napitupulu, J., Purba, L., & Marbun, A. (2021). Kinerja sistem ketel uap berbahan bakar biomassa pada PKS. *Jurnal Rekayasa Energi*, 4(1), 23–34.
- [14] Purba, D. P., Sihombing, R., & Tampubolon, H. (2024). Efficiency performance evaluation of biomass power plant in palm oil mill industry. *Journal of Renewable Bioenergy Engineering*, 12(1), 45–55.
- [15] Rahman, M. M., Hasan, M. M., & Mahlia, T. M. I. (2021). Operational stability of biomass-based power plants in agro-industries. *Energy Reports*, 7, 412–421.
- [16] Saidur, R., Abdelaziz, E. A., Demirbas, A., Hossain, M. S., & Mekhilef, S. (2018). A review on biomass as a fuel for boilers. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(5), 2262–2289.
- [17] Simanjuntak, E., Prakoso, F., & rekan lainnya. (2023). Analisis performa boiler berbahan bakar kombinasi fiber–cangkang di pabrik kelapa sawit. *Jurnal Energi & Teknologi Mesin*, 5(1), 90–102.
- [18] Sinaga, J. A., Manurung, B., & Simanjuntak, R. (2022). Boiler and turbine performance analysis in biomass power generation system at palm oil mill. *Energy Conversion and Utilization Journal*, 8(3), 211–220.
- [19] Sucahyo, H., Lukman, K., Ridlo, S., Puspita, D., & Rosmala, D. (2023). Pemanfaatan limbah cair POME sebagai bahan bakar boiler pada industri kelapa sawit. *Media Ilmiah Penelitian dan Pengembangan Industri*, 17(1), 11–22.
- [20] Sugiyono. (2021). *Metode penelitian kuantitatif, kualitatif, dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- [21] Umar, R., et al. (2022). *Indonesia Palm Oil Biomass Potential Review*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- [22] Yulianto, D., & Prakoso, F. (2020). Evaluasi efisiensi termal pembangkit biomassa. *Jurnal Energi Terbarukan*, 12(3), 129–138

