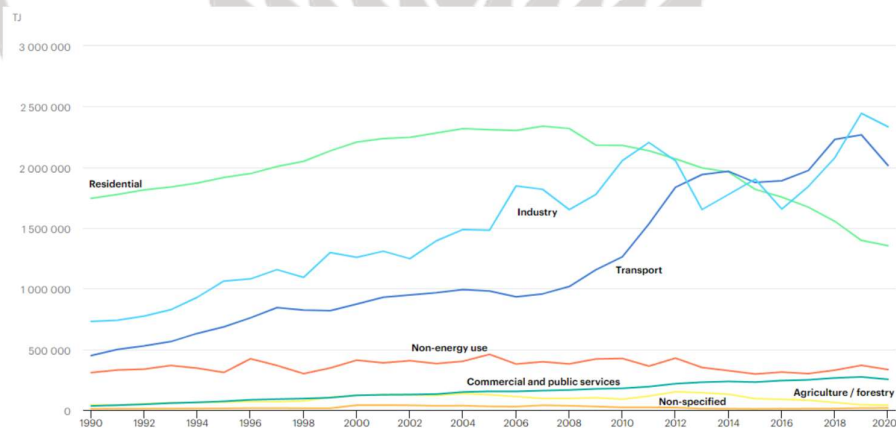


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Energi di Indonesia

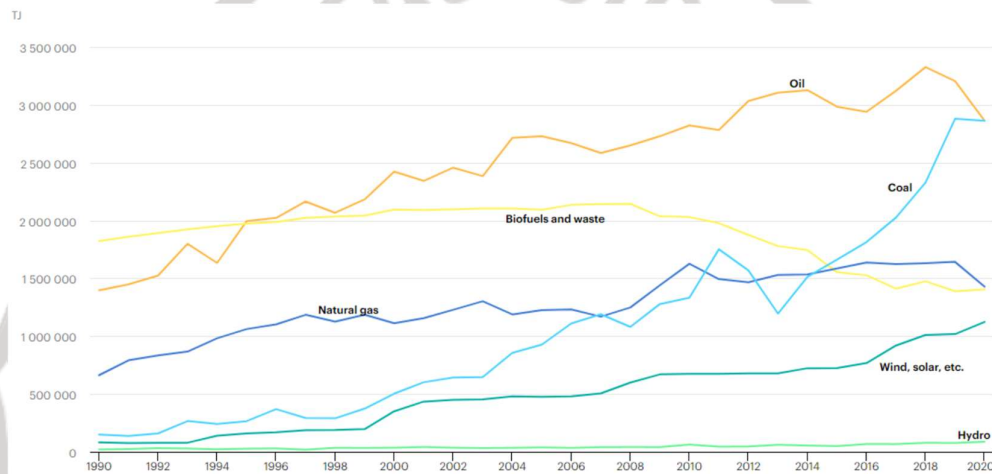
Indonesia merupakan salah satu negara dengan luas wilayah dan populasi terbesar di dunia. Sebagai negara tropis, Indonesia diberkahi dengan berbagai macam komoditas, di antaranya adalah sumber daya untuk industri energi. Ada berbagai jenis sumber energi, termasuk yang terbarukan seperti biomassa, angin, dan energi matahari serta yang tidak terbarukan seperti uranium, batu bara, dan gas alam. Meskipun ada banyak variasi, intensitasnya masih sedikit. Cadangan minyak bumi di Indonesia berukuran kecil. Pasokan batubara dan gas alam diperkirakan akan segera habis. Di sisi lain, penggunaan sumber energi baru dan terbarukan berjalan relatif lambat (Kao *et al.*, 2021).

Laju produksi minyak bumi di Indonesia telah menurun secara signifikan. Cadangan gas alam dan batu bara yang telah terbukti juga semakin berkurang dari waktu ke waktu. Produksi minyak mentah telah menurun dari 315 juta barel pada tahun 2012 menjadi 240 juta barel pada tahun 2021 (INDONESIA ENERGY OUTLOOK 2022, 2022). Sumur-sumur produksi minyak yang sudah tua menjadi penyebab turunnya produksi, sementara sumur-sumur produksi baru masih langka. Saat ini, Indonesia mengimpor minyak mentah, terutama dari Timur Tengah, untuk memasok kebutuhan kilang-kilang minyak. Indonesia memiliki ketergantungan sekitar 43% pada impor minyak.



Gambar 2. 1 Total Final Consumption (TFC) berdasarkan sektor
(Indonesia - Negara & Wilayah - IEA, 2022)

Gambar 2.1 menunjukkan total konsumsi akhir energi untuk setiap sektor yang berkontribusi. Dapat dilihat bahwa permintaan energi meningkat setiap tahunnya. Pada tahun 2020, sektor industri mendominasi permintaan energi, diikuti oleh sektor transportasi. Hal ini disebabkan oleh pertumbuhan dan perkembangan industri yang pesat di Indonesia. Hal ini cukup memprihatinkan karena sumber energi utama di Indonesia, yaitu bahan bakar fosil, ketersediaannya semakin menipis, sementara kebutuhan energi terus meningkat.



Gambar 2. 2 Total energy supply (TES) berdasarkan sumbernya (Indonesia - Negara & Wilayah - IEA, 2022)

Gambar 2.2 menunjukkan ketergantungan Indonesia pada minyak dan batubara sebagai sumber energi utama. Gambar tersebut menunjukkan bahwa minyak masih menjadi pemasok energi utama, diikuti oleh batu bara dan gas alam. Energi terbarukan yang memberikan kontribusi terbesar terhadap pasokan energi adalah bahan bakar nabati dan sampah, diikuti oleh angin, matahari, dan air. Pembakaran bahan bakar untuk menghasilkan energi meninggalkan gas-gas seperti karbon dioksida (CO_2), nitrogen oksida (NO_x), dan sulfur oksida (SO_x) yang meningkatkan konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer. Masalah ini mengakibatkan efek pemanasan global yang telah menjadi perhatian dunia, oleh karena itu, sumber energi baru yang lebih berkelanjutan perlu ditemukan (Kao *et al.*, 2021).

Sumber energi terbarukan yang berpotensi besar dikembangkan di Indonesia adalah biomassa. Potensi ini didukung oleh luasnya sektor pertanian dan perkebunan yang menghasilkan limbah biomassa dalam jumlah melimpah. Di

antara berbagai sumber biomassa tersebut, limbah kelapa sawit menjadi salah satu yang paling potensial karena Indonesia merupakan produsen kelapa sawit terbesar di dunia (Direktorat Jenderal Perkebunan, 2024).

Salah satu limbah biomassa kelapa sawit yang tersedia secara berkelanjutan adalah pelepah kelapa sawit yang dihasilkan dari kegiatan pemangkasan rutin. Ketersediaannya yang melimpah dan kandungan energinya yang cukup tinggi menjadikan pelepah kelapa sawit berpotensi dimanfaatkan sebagai bahan bakar biomassa padat dalam bentuk chip maupun pelet. Oleh karena itu, diperlukan kajian mengenai karakteristik dan kelayakan pemanfaatannya sebagai sumber energi biomassa (Onochie *et al.*, 2017; Sitorus *et al.*, 2025).

2.2 Limbah Pelepah Kelapa Sawit

Limbah pelepah kelapa sawit merupakan salah satu hasil sampingan yang dihasilkan dari proses panen kelapa sawit. Di Indonesia, khususnya di Sumatera Utara, industri kelapa sawit telah menjadi salah satu pilar ekonomi yang signifikan. Namun, pertumbuhan industri ini juga menghasilkan limbah yang cukup besar, di mana pelepah kelapa sawit menjadi salah satu komponen utama. Limbah ini sering kali dibuang atau dibakar, yang dapat menyebabkan masalah lingkungan seperti pencemaran udara dan penurunan kualitas tanah (Sari *et al.*, 2020).



Gambar 2. 3 Pelepah kelapa Sawit yang dijadikan sampel pengujian

Pelepah kelapa sawit, yang terdiri dari serat bahan organik, memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan dalam berbagai sektor. Salah satu pemanfaatan yang paling menjanjikan adalah sebagai bahan baku pakan ternak. Penelitian menunjukkan bahwa pelepah kelapa sawit dapat diolah menjadi pakan yang bergizi, yang dapat mengurangi ketergantungan peternak pada pakan komersial yang lebih

mahal (Hassan *et al.*, 2019). Selain itu, pelepah yang kaya akan serat dapat membantu meningkatkan kesehatan pencernaan hewan ternak.

Selain sebagai pakan ternak, limbah pelepah kelapa sawit juga dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku kompos. Proses pengomposan pelepah dapat mengurangi volume limbah dan menghasilkan pupuk organik yang bermanfaat untuk meningkatkan kesuburan tanah (Mardiana *et al.*, 2021). Penggunaan pupuk organik dari limbah ini dapat mengurangi penggunaan pupuk kimia, yang sering kali berdampak negatif terhadap lingkungan.

Limbah pelepah kelapa sawit juga memiliki potensi sebagai sumber energi terbarukan. Melalui proses pirolisis atau pembakaran, pelepah dapat diubah menjadi biomassa yang dapat digunakan untuk menghasilkan listrik atau bahan bakar alternatif (Suhardi *et al.*, 2022). Pemanfaatan limbah ini sebagai sumber energi tidak hanya membantu mengurangi emisi karbon, tetapi juga memberikan alternatif energi yang lebih ramah lingkungan.

Limbah pelepah kelapa sawit merupakan hasil sampingan dari kegiatan pemanenan kelapa sawit yang tersedia dalam jumlah besar di wilayah penghasil kelapa sawit, termasuk Sumatera Utara. Ketersediaan bahan baku yang melimpah dan berkelanjutan dari luas perkebunan mencapai 1,357 juta hektar menjadi modal utama pengembangan industri ini, ketersediaan pelepah kelapa sawit dipengaruhi oleh populasi tanaman per satuan luas. Pada perkebunan kelapa sawit menghasilkan, jarak tanam yang umum digunakan adalah sekitar 9 m × 9 m dengan pola segitiga sama sisi sehingga menghasilkan populasi sekitar 136–148 pohon per hektar. Setiap pohon dipangkas secara berkala sebanyak sekitar 20–26 pelepah per tahun mengikuti kegiatan panen, sehingga menghasilkan biomassa pelepah yang tersedia secara berkelanjutan sebagai sumber bahan baku bioenergi. Potensi pelepah sawit mencapai sekitar 27,6 juta ton segar per tahun (estimasi berdasarkan data dari BPS Tahun 2025), atau 7,2 juta ton bahan kering (setara ~2-2,5% dari total biomassa sawit nasional yang >300 juta ton/tahun), berdasarkan estimasi 20-22 pelepah/pohon/tahun dengan bobot rata-rata 7 kg/pelepah (BPS, 2025).

Pelepah kelapa sawit merupakan biomassa lignoselulosa yang memiliki berbagai alternatif pemanfaatan. Selain sebagai bahan baku bioenergi, pelepah sawit telah banyak dimanfaatkan sebagai pakan ternak ruminansia setelah melalui

proses pencacahan, fermentasi, maupun perlakuan kimia untuk meningkatkan kecernaannya. Pelepah sawit juga dimanfaatkan sebagai bahan baku kompos atau pupuk organik karena mengandung unsur hara yang dapat dikembalikan ke lahan perkebunan. Namun demikian, pemanfaatan tersebut sangat bergantung pada kebutuhan masing-masing perusahaan perkebunan. Oleh karena itu, dalam penelitian ini diasumsikan bahwa pelepah sawit yang digunakan merupakan biomassa residu yang belum dimanfaatkan untuk kebutuhan lain sehingga dapat dialokasikan sebagai bahan baku produksi chip maupun pelet biomassa tanpa mengganggu pemanfaatan eksisting (Kusmiati *et al.* 2024).

Berdasarkan data Direktorat Jenderal Perkebunan, luas perkebunan kelapa sawit di Provinsi Sumatera Utara mencapai sekitar 1,36 juta hektar. Dengan asumsi populasi rata-rata 143 pohon/ha dan pemangkasan 22 pelepah/pohon/tahun, maka potensi pelepah yang dihasilkan mencapai sekitar 4,28 miliar pelepah/tahun. Dengan berat rata-rata pelepah 7 kg, diperoleh potensi biomassa sekitar 30 juta ton biomassa segar per tahun. Perhitungan tersebut menjadi dasar estimasi ketersediaan bahan baku dalam penelitian ini. Pemanfaatan limbah kelapa sawit bukan hanya menawarkan solusi atas permasalahan limbah organik, tetapi juga memberikan nilai tambah ekonomi dan mendukung prinsip keberlanjutan dalam pengelolaan sumber daya. Limbah kelapa sawit dapat dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, di antaranya:

1. Pelepah kelapa sawit memiliki nilai kalor hingga 17,2 MJ/kg, menjadikannya bahan baku yang layak untuk diolah menjadi biomassa Pelet sebagai bahan bakar alternatif (Rahman *et al.*, 2020).
2. Limbah ini dapat diolah menjadi pupuk organik melalui proses pengomposan, membantu meningkatkan kesuburan tanah sekaligus mengurangi penggunaan pupuk kimia (Mardiana *et al.*, 2021).
3. Kandungan serat yang tinggi dalam pelepah kelapa sawit menjadikannya bahan baku potensial untuk pakan ternak, yang dapat membantu mengurangi ketergantungan pada pakan komersial (Hassan *et al.*, 2019).
4. Dengan teknologi Peletisasi, pelepah kelapa sawit dapat diolah menjadi bahan bakar yang lebih padat, hemat tempat, dan efisien dalam transportasi serta penyimpanan (Sari *et al.*, 2020).

Berdasarkan berbagai hasil penelitian dan praktik pengelolaan perkebunan kelapa sawit di Indonesia, sebagian besar pelepah hasil pemangkasan masih dibiarkan di lahan sebagai mulsa untuk mempertahankan kelembapan dan memperbaiki kandungan bahan organik tanah. Sebagian lainnya dimanfaatkan sebagai pakan ternak maupun bahan baku kompos, sedangkan pemanfaatan sebagai bahan baku bioenergi masih relatif kecil. Oleh karena itu penelitian ini diarahkan untuk mengevaluasi peluang peningkatan nilai tambah pelepah sawit melalui konversi menjadi chip dan pelet biomassa (Kusmiati *et al.* 2024).

Tabel 2. 1 Pemanfaatan Pelepah Kelapa Sawit

Pemanfaatan	Estimasi
Dibiarkan sebagai mulsa	±70–80%
Pakan ternak	±10–20%
Kompos	±5–10%
Energi biomassa	<5%

2.3 Bahan Bakar Biomassa Pelepah Sawit

2.3.1 Chip biomassa

Chip biomassa merupakan bentuk bahan bakar padat yang diproduksi dengan proses yang relatif sederhana. Untuk menjadi chip, pelepah sawit kering alami hanya diproses dengan dicacah menggunakan mesin pencacah (chipper), sehingga penyusutan yang terjadi sangat kecil. Dari pelepah sawit 3 kg diperoleh chip pelepah sawit sebanyak 2,7-2,9 kg atau dengan rendemen sekitar 90-95%, yang menunjukkan bahwa kehilangan masa selama proses pencacahan relatif rendah (Abdullah, N., & Sulaiman, F., 2013).

Keunggulan chip biomassa adalah proses produksi yang sederhana dan biaya investasi yang lebih rendah karena tidak memerlukan tahapan densifikasi. Chip dapat langsung dihasilkan dari proses pencacahan pelepah kering. Namun demikian, chip biomassa memiliki densitas energi yang lebih rendah dibandingkan pelet, sehingga memerlukan volume penyimpanan dan transportasi yang lebih besar. Selain itu, kandungan kadar air chip cenderung lebih tinggi, yang dapat mempengaruhi efisiensi pembakaran (IEA, *Bioenergy*, 2021).

2.3.2 Pelet Biomassa

Pelet biomassa merupakan bahan bakar padat yang diproduksi melalui proses densifikasi. Produksi pelet biomassa dari pelepah kelapa sawit pada dasarnya dapat dilakukan oleh beberapa pelaku usaha, yaitu perusahaan perkebunan kelapa sawit yang melakukan diversifikasi usaha, industri pengolahan biomassa independen, koperasi atau kelompok usaha masyarakat di sekitar perkebunan, serta perusahaan energi yang memanfaatkan biomassa sebagai bahan bakar boiler maupun pembangkit listrik. Pada penelitian ini diasumsikan bahwa produksi pelet dilakukan oleh unit usaha pengolahan biomassa yang memperoleh pasokan pelepah dari area perkebunan kelapa sawit di Kabupaten Asahan. Dengan demikian analisis teknis dan ekonomi disusun berdasarkan perspektif produsen pelet biomassa. Pembuatan pelet dari limbah pelepah kelapa sawit melibatkan beberapa tahap, yaitu pengumpulan, pengeringan, penggilingan, dan pencetakan (Peleting). Pertama, pelepah kelapa sawit yang telah dikumpulkan perlu dikeringkan untuk mengurangi kadar airnya, sehingga meningkatkan efisiensi proses pembuatan pelet. Pada penelitian ini proses pengeringan dilakukan secara bertahap. Pelepah sawit yang telah dicacah terlebih dahulu dikeringkan secara alami di bawah sinar matahari selama 2–3 hari hingga kadar air menurun. Selanjutnya dilakukan pengeringan menggunakan oven pada suhu $105 \pm 2^{\circ}\text{C}$ hingga berat konstan sebelum proses penggilingan dan peletisasi. Tahapan ini bertujuan memperoleh kadar air yang memenuhi persyaratan SNI sehingga menghasilkan pelet dengan kualitas pembakaran yang baik. Setelah itu, pelepah yang telah kering digiling menjadi serbuk halus. Proses penggilingan ini penting untuk meningkatkan luas permukaan bahan, yang akan memudahkan proses kompresi saat pembuatan pelet (Obernberger & Thek, 2010).

Setelah bahan siap, serbuk pelepah kelapa sawit kemudian dicetak menggunakan mesin pelet (Peletizer). Proses ini melibatkan pemanasan dan kompresi tinggi, yang akan mengubah serbuk menjadi bentuk pelet yang padat. Untuk produksi pelet, dari 3 kg pelepah sawit kering alami hanya menghasilkan pelet sebanyak 2–2,2 kg, atau rendemen sebesar 66–73%. Penurunan rendemen ini disebabkan oleh hilangnya fraksi halus selama proses penggilingan serta reduksi kadar air dan penyusutan volume akibat densifikasi (Stelte *et al.*, 2012).



Gambar 2. 4 Mesin Produksi Pembuat Pelet

Pelet yang dihasilkan memiliki densitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan bentuk aslinya, sehingga lebih efisien untuk transportasi dan penyimpanan. Bentuk pelet berbentuk silinder dengan diameter berkisar antara 4 hingga 30 mm. Diameter pelet yang umum adalah 6-10 mm (kecil), 20 mm (sedang), dan 30 mm (besar). Pelet dianggap ramah lingkungan karena ketika dibakar tidak menimbulkan asap berlebih dan emisi yang membahayakan lingkungan (Oberberger & Thek, 2010).



Gambar 2. 5 Produk Pelet dari Pelepah Kelapa Sawit

Sebagai persyaratan standar, target densitas pelet berkisar antara 1,2-1,3 g/cm³. Setelah proses densifikasi, peningkatan densitas dapat dicapai 2-7 kali lipat dari densitas bahan baku. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi sifat-sifat pelet, seperti kandungan air, ukuran partikel dan senyawa kimia, terutama kandungan lignin karena kemampuannya mengikat partikel (Kaliyan & Morey, 2009).

2.3.3 Perbandingan Chip dan Pelet

Perbedaan utama antara chip dan pelet biomassa terletak pada proses produksi, karakteristik fisik, dan aplikasinya. Tabel 2.2 menjelaskan detail perbedaan bahan

bakar biomassa chip dan pelet. Pemilihan antara chip atau pelet bergantung pada kebutuhan aplikasi, skala produksi, dan kelayakan ekonomi. Chip lebih cocok untuk pemanfaatan lokal dengan investasi terbatas, sementara Pelet lebih sesuai untuk aplikasi industri dan pasar ekspor yang memerlukan standar kualitas tinggi.

Tabel 2. 2 Perbandingan karakteristik chip dan pelet biomassa

Aspek	Chip Biomassa	Pelet Biomassa
Proses Produksi	Pencacahan sederhana	Proses Produksi
Rendemen	90-95%	80-90%
Investasi	Lebih rendah (hanya chipper)	Lebih tinggi (perlu Peletizer)
Densitas Energi	Lebih rendah	Lebih tinggi (1,2-1,3 g/cm ³)
Kadar Air	Cenderung lebih tinggi	Lebih rendah dan terkontrol
Transportasi	memerlukan volume lebih besar	Lebih efisien, volume lebih kecil
Aplikasi	Boiler skala kecil-menengah, pembakaran lokal	Boiler industri, ekspor, aplikasi standar tinggi

Sumber: Obernberger & Thek, 2010; Basu, 2018

2.4 Karakteristik Bahan Bakar Biomassa

2.4.1 Analisis Proksimat

Analisis proksimat merupakan pengujian untuk mengetahui komposisi fisik bahan bakar yang meliputi kadar air (*moisture content*), kadar abu (*ash content*), zat mudah menguap (*volatile matter*), dan karbon tetap (*fixed carbon*). Parameter-parameter ini sangat penting dalam menentukan kualitas pembakaran biomassa yang digunakan dalam berbagai sistem konversi energi (*International Energy Agency*, 2022).

- Kadar Air (Moisture Content)

Kadar air memengaruhi nilai kalor efektif bahan bakar. Kadar air yang tinggi akan menurunkan efisiensi pembakaran karena sebagian energi digunakan untuk menguapkan air. Menurut SNI 8951:2020 untuk biomassa industri, kadar air maksimal yang diperbolehkan adalah $\leq 12\%$.

- Kadar Abu (Ash Content)

Kadar abu menunjukkan kandungan mineral anorganik dalam biomassa. Kadar abu yang tinggi dapat menyebabkan masalah operasional seperti pembentukan

slagging dan fouling pada sistem pembakaran. SNI 8951:2020 menetapkan batas maksimal kadar abu sebesar $\leq 5\%$.

- Volatile Matter

Volatile matter adalah zat yang mudah menguap saat pemanasan. Kandungan volatile matter yang tinggi memudahkan penyalaan awal (ignition) dan menghasilkan nyala api yang lebih panjang, namun dapat menurunkan durasi pembakaran fase arang. Menurut SNI 8951:2020, kandungan volatile matter maksimal adalah $\leq 80\%$.

- Karbon Tetap (Fixed Carbon)

Karbon tetap adalah sisa setelah volatile matter dilepaskan. Kandungan karbon tetap yang tinggi mengindikasikan durasi pembakaran yang lebih lama pada fase arang. SNI 8951:2020 menetapkan nilai minimal karbon tetap sebesar $\geq 14\%$.

2.4.2 Analisis Ultimat

Analisis ultimat dilakukan untuk mengetahui komposisi unsur kimia utama dalam bahan bakar biomassa yang meliputi karbon (C), hidrogen (H), nitrogen (N), oksigen (O), sulfur (S), dan klorin (Cl). Hasil analisis ini dapat disajikan dalam tiga basis data: as received (AR) yang menggambarkan kondisi sampel saat diterima, dry basis (DB) yang menunjukkan komposisi setelah kandungan air dihilangkan, dan dry ash free (DAF) yang menunjukkan komposisi unsur murni setelah air dan abu dihilangkan (*International Energy Agency*, 2022).

- Karbon (C)

Karbon merupakan unsur utama yang berkontribusi pada nilai kalor biomassa. Semakin tinggi kandungan karbon, semakin tinggi nilai kalor yang dihasilkan. Biomassa lignoselulosa umumnya memiliki kandungan karbon sekitar 45-50% (dry basis)

- Hidrogen (H)

Hidrogen juga berperan dalam menghasilkan energi saat pembakaran. Kandungan hidrogen pada biomassa umumnya berkisar 5-7%.

- Oksigen (O)

Oksigen dalam biomassa berada dalam kondisi teroksidasi, sehingga menurunkan nilai kalor dibandingkan bahan bakar fosil. Kandungan oksigen biomassa umumnya cukup tinggi, sekitar 40-45%.

- Nitrogen (N), Sulfur (S), dan Klorin (Cl)

Unsur-unsur minor ini memiliki implikasi terhadap emisi dan operasional sistem pembakaran. Nitrogen dapat membentuk emisi NO_x , sulfur dapat membentuk SO_x , dan klorin dapat menyebabkan korosi. SNI 8951:2020 menetapkan batas maksimal sulfur dan klorin masing-masing $\leq 0,10\%$

2.4.3 Nilai Kalor (Heating Value)

Nilai kalor merupakan parameter yang menunjukkan jumlah energi yang dilepaskan per satuan massa bahan bakar saat pembakaran sempurna. Nilai kalor dinyatakan sebagai Higher Heating Value (HHV) dan Lower Heating Value (LHV) (*International Energy Agency, 2022*).

- Higher Heating Value (HHV)

HHV menggambarkan total energi yang dilepaskan selama pembakaran sempurna bahan bakar, termasuk panas kondensasi uap air. HHV diukur dengan mengasumsikan semua produk pembakaran didinginkan hingga suhu awal dan uap air yang terbentuk terkondensasi.

HHV diperoleh menggunakan Bomb Calorimeter

$$HHV = \frac{(W + C)(T_2 - T_1) - e}{m}$$

dimana

W = water equivalent

C = kapasitas kalor kalorimeter

M = massa sampel

e = correction factor

- Lower Heating Value (LHV)

LHV menunjukkan energi bersih yang dapat dimanfaatkan setelah dikurangi energi yang digunakan untuk menguapkan air yang terbentuk selama pembakaran. LHV lebih mencerminkan kondisi aktual dalam aplikasi pembakaran praktis.

LHV diperoleh menggunakan Bomb Calorimeter

$$LHV = HHV - 2,442 \times (9H + M)$$

Menurut SNI 8951:2020 untuk biomassa industri, nilai HHV minimal yang dipersyaratkan adalah $>16,5 \text{ MJ/kg}$ (setara dengan $>3.942 \text{ kcal/kg}$) [14]. Nilai kalor

biomassa pelepah sawit dilaporkan berkisar antara 16-18 MJ/kg, menjadikannya kompetitif sebagai bahan bakar alternatif.

Nilai Higher Heating Value (HHV) selalu lebih tinggi dibandingkan Lower Heating Value (LHV) karena HHV memperhitungkan panas laten hasil kondensasi uap air yang terbentuk selama proses pembakaran, sedangkan LHV mengasumsikan uap air tersebut tetap berada dalam fase gas sehingga energi laten tidak dimanfaatkan. Oleh karena itu nilai HHV selalu lebih besar daripada LHV untuk seluruh jenis biomassa.

2.4.4 Analisis Abu dan Kandungan Mineral

Analisis abu merupakan parameter penting dalam evaluasi kualitas bahan bakar biomassa karena berpengaruh langsung terhadap performa pembakaran, pembentukan slagging dan fouling, serta stabilitas operasi sistem termal. Analisis abu meliputi konsentrasi alkali dalam abu, komposisi oksida mineral, serta karakteristik titik leleh abu (*International Energy Agency*, 2022).

- Konsentrasi Alkali

Unsur alkali seperti natrium (Na) dan kalium (K) diketahui berperan penting dalam perilaku abu biomassa selama proses pembakaran. Unsur-unsur tersebut dapat bereaksi dengan komponen mineral lain, membentuk senyawa silikat alkali bertitik leleh rendah yang meningkatkan kecenderungan pembentukan slagging dan fouling pada permukaan tungku dan penukar panas. Keberadaan senyawa ini menurunkan temperatur leleh abu serta mempercepat pembentukan deposit selama proses pembakaran biomassa.

- Komposisi Oksida Mineral

Komposisi mineral utama dalam abu biomassa terdiri atas silika (SiO_2), kalsium oksida (CaO), magnesium oksida (MgO), kalium oksida (K_2O), natrium oksida (Na_2O), dan oksida lainnya. SNI 8951:2020 menetapkan batas maksimal $\text{Na}_2\text{O} \leq 5\%$ dan $\text{K}_2\text{O} \leq 20\%$. Kandungan kalium yang tinggi dapat menurunkan temperatur leleh abu melalui pembentukan senyawa silikat alkali bertitik leleh rendah.

- Titik Leleh Abu

Titik leleh abu diukur melalui tiga parameter yaitu deformation temperature (suhu mulai deformasi), softening temperature (suhu pelunakan), dan flow

temperature (suhu mengalir). Parameter ini menunjukkan ketahanan termal abu terhadap deformasi dan pelelehan. Semakin rendah temperatur deformasi dan pelunakan abu, semakin besar potensi pembentukan deposit, slagging, dan fouling pada sistem pembakaran biomassa

Fouling merupakan pembentukan lapisan deposit abu pada permukaan perpindahan panas boiler akibat kondensasi atau pengendapan senyawa volatil selama proses pembakaran biomassa. Senyawa alkali seperti kalium (K) dan natrium (Na), terutama dalam bentuk K_2O dan Na_2O , dapat bereaksi dengan silika sehingga membentuk senyawa bertitik leleh rendah yang mudah menempel pada permukaan pipa boiler. Akumulasi deposit tersebut menyebabkan penurunan efisiensi perpindahan panas, peningkatan kehilangan tekanan (pressure drop), serta meningkatkan frekuensi penghentian operasi untuk pembersihan boiler.

2.4.5 Standar Kualitas Biomassa

SNI 8951:2020 merupakan standar nasional Indonesia untuk pelet kayu sebagai bahan bakar industri. Meskipun standar ini spesifik untuk pelet kayu, parameter yang ditetapkan dapat dijadikan acuan untuk biomassa padat lainnya termasuk chip dan pelet dari pelepah sawit. Parameter kualitas yang ditetapkan dalam SNI 8951:2020 (Tabel 2.3). Standar ini menjadi acuan penting untuk menilai kelayakan chip dan pelet pelepah sawit sebagai bahan bakar industri. Biomassa yang memenuhi standar ini dapat digunakan pada berbagai aplikasi pembakaran industri seperti boiler pembangkit listrik, industri semen, dan pabrik kertas

Tabel 2. 3 Persyaratan kualitas biomassa

Parameter	Satuan	Persyaratan
Kadar Air	%	≤ 12
Kadar Abu	%	≤ 5
Volatile Matter	%	≤ 80
Karbon Tetap	%	≥ 14
Nilai Kalor (HHV)	MJ/kg	$> 16,5$
Sulfur	%	$\leq 0,10$
Klorin	%	$\leq 0,10$
Natrium Oksida (Na_2O)	%	≤ 5
Kalium Oksida (K_2O)	%	≤ 20

2.5 Kelayakan Ekonomi Produksi Biomassa

Dari sisi teknis, produksi Pelet biomassa melibatkan beberapa tahapan penting, termasuk pre-treatment, pengeringan, penggilingan, pencampuran dengan perekat, dan pencetakan. Setiap tahap membutuhkan evaluasi untuk memastikan efisiensi proses. Adhiana dan Prakoso (2020) menekankan pentingnya penilaian kapasitas berdasarkan waktu kerja, jumlah mesin, dan output. Misalnya, kapasitas produksi dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$\text{Kapasitas Produksi} = (\text{Output per Mesin per Jam}) \times (\text{Jam Operasional per Hari}) \times (\text{Hari Operasional per Tahun}) \quad (1)$$

Efisiensi proses juga dinilai dengan membandingkan output aktual dengan jumlah bahan baku yang digunakan. Tahapan ini memastikan bahwa proses produksi berjalan dengan optimal dan meminimalkan pemborosan. Sejalan dengan hal ini, penelitian menunjukkan bahwa pemrosesan biomassa harus memperhatikan desain sistem agar efisien dalam konsumsi energi dan minim limbah (Koido *et al.*, 2022). Efisiensi pemrosesan dapat ditingkatkan dengan penggunaan teknologi baru seperti gasifikasi atau pengeringan bertingkat (Haditanto *et al.*, 2024).

Dalam skala mikro, indikator kelayakan ekonomi usaha Pelet biomassa, seperti *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), *Payback Period* (PBP), dan *Benefit-Cost Ratio* (BCR), dihitung untuk mengevaluasi profitabilitas dan keberlanjutan investasi dalam suatu usaha termasuk usaha produksi Pelet. Sarker *et al.*, (2023) pernah meneliti kelayakan usaha produksi Pelet biomassa dengan menganalisis dua skenario produksi, yaitu dengan aditif eksternal dan tanpa aditif. Penelitian tersebut menggunakan indikator ekonomi NPV, IRR, Payback Period dan, untuk mengevaluasi profitabilitas investasi. Hasil analisis ekonomi mengungkapkan NPV positif sebesar \$13,1 juta untuk skenario dengan aditif dan \$11,1 juta untuk skenario tanpa aditif pada tingkat diskonto 10%, dengan IRR masing-masing sebesar 25% dan 22%, serta *Payback Period* (PBP) selama 2,7 tahun dan 3,1 tahun. Penelitian ini menegaskan pentingnya strategi investasi yang mempertimbangkan indikator ekonomi untuk keberlanjutan industri Pelet biomassa.

Beberapa rumus perhitungan yang digunakan dalam penelitian kelayakan usaha pemanfaatan limbah, seperti yang dijelaskan oleh Haditanto *et al.*, 2024 diantaranya yaitu sebagai berikut:

- Biaya Produksi

Biaya produksi meliputi semua pengeluaran yang dibutuhkan dalam proses produksi, seperti biaya bahan baku, tenaga kerja, dan overhead. Total biaya produksi dihitung dengan rumus:

$$\text{Total Biaya Produksi} = \text{Biaya tetap} + \text{Biaya operasional} \quad (2)$$

- Pendapatan Proyeksi

Pendapatan proyeksi ditentukan berdasarkan estimasi volume penjualan dan harga jual produk. Langkah ini melibatkan survei pasar untuk menentukan harga jual yang kompetitif dan analisis tren penjualan. Pendapatan dihitung dengan rumus:

$$\text{Pendapatan proyeksi} = \text{Harga jual perunit} \times \text{kapasitas} \quad (3)$$

- Net Present Value (NPV)

NPV digunakan untuk menghitung nilai kini bersih dari aliran kas selama periode tertentu dengan mempertimbangkan tingkat diskonto. Rumusnya adalah:

$$\text{NPV} = \sum \frac{R_t}{(1+R)^t} - C_0 \quad (4)$$

Dimana R_t adalah aliran kas pada tahun ke- t , R adalah tingkat diskonto, dan C_0 adalah investasi awal.

- Internal Rate of Return (IRR)

IRR merupakan tingkat discount rate (DR) yang menghasilkan NPV sama dengan 0 yang tuliskan dalam satuan persentase (%). Nilai IRR dihitung dengan:

$$\text{IRR} = i_1 + \frac{\text{NPV}_1}{\text{NPV}_1 - \text{NPV}_2} (i_2 - i_1) \quad (5)$$

Di mana i_1 merupakan Discount rate yang menghasilkan NPV positif, sedangkan i_2 merupakan Discount rate yang menghasilkan NPV negatif

- Payback Period (PBP)

PBP mengukur waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan investasi awal. Nilainya diperoleh dengan menjumlahkan aliran kas tahunan hingga mencapai titik impas dan dihitung dengan:

$$PBP = Tahun\ Terakhir\ Aliran\ Kas\ Negatif + \frac{Nilai\ Aliran\ Kas\ Kumulatif\ Negatif\ Terakhir}{Aliran\ kas\ positif\ tahun\ berikutnya} \quad (6)$$

- *Break Event Point (BEP)*

BEP merupakan kondisi ketika total pendapatan sama dengan total biaya sehingga perusahaan tidak mengalami keuntungan maupun kerugian. Dalam studi kelayakan industri, BEP lebih informatif apabila dinyatakan dalam volume produksi atau volume penjualan dibandingkan persentase, karena menunjukkan jumlah minimum produk yang harus dijual agar seluruh biaya tetap dan biaya variabel dapat tertutupi. Rumus yang digunakan:

$$BEP = \frac{Biaya\ tetap}{Harga\ Jual\ per\ Unit - Biaya\ Variabel\ per\ Unit} \quad (7)$$

- *Benefit-Cost Ratio (BCR)*

BCR mengevaluasi rasio antara nilai manfaat bersih dan nilai biaya bersih proyek. Rumus BCR adalah:

$$BCR = \frac{Present\ Value\ Benefits}{Present\ Value\ Cost} \quad (8)$$