

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *State of the Art Penelitian*

Biopellet dari cangkang kelapa sawit dan tandan kosong kelapa sawit merupakan salah satu bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan. Proses pembuatan biopellet dengan bahan baku cangkang kelapa sawit maupun tandan kosong telah dilakukan beberapa penelitian sebelumnya. Adapun beberapa penelitian sebelumnya mengenai proses pembuatan biopellet terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Penelitian Biopellet Terdahulu

Peneliti	Jenis Biomassa Variasi	Hasil
Muhammad Gifani Al Qadry, dkk. 2018	Cangkang kelapa sawit dan serbuk kayu, dengan rasio perbandingan 100%:0%, 70%:30%, 50%:50%, 30%:70%	Biopellet dengan kualitas terbaik rasio 70% cangkang kelapa sawit dan 30% serbuk kayu, dengan nilai kalor sebesar 4262,67 kal/g.
Miftahul Falah, Novia Nelza 2019	Tandan kosong kelapa sawit (TKKS), dengan variasi perekat amilum 20%, 30%, 40%, dan 50%	Hasil nilai kalor tertinggi 4151,67 kal/g yaitu pada campuran amilum 50%, dengan komposisi 60 TKKS dicampur dengan 40 ml amilum 50%, memenuhi standar SNI 8021:2014.
Fatria Ahmadan, dkk. 2019	Cangkang dan daging biji karet, dengan rasio campuran masing-masing 80:20, 70:30, 60:40, 50:50, 40:60 dan variasi temperature 150°C dan 200°C	Kualitas biopellet terbaik yaitu pada temperature 200°C dengan rasio campuran cangkang dan daging biji karet 80:20, nilai kalor memenuhi SNI 8021:2014 sebesar 5083,4919 kal/gr.
Idral Amri, dkk. 2020	<i>Upgrading Characteristic of Empty Fruit Bunch Biopellet with Addition of Bintaro Fruit as Co-firing</i>	Penambahan buah bintaro pada karakteristik biopellet EFB sesuai standar ISO 17225-6. Karakteristik proksimat dan nilai kalor meningkat, sedangkan sifat densitas biopellet menurun dengan penambahan buah bintaro sebagai <i>co-firing</i> .
N Iskandar, dkk. 2020	<i>The characteristic of biopellet made from teak wood waste due to the influence of variations in material composition and compaction pressure</i>	Biopellet berbahan limbah kayu jati dengan variasi perekat pati singkong 5%, 10%, 15%. Biopellet mengacu pada SNI 8021:2014.
Wahyu Hidayat, dkk. 2020	Tandan kosong kelapa sawit	Kualitas pellet tandan kosong kelapa sawit (TKKS) dapat ditingkatkan

Muhammad Yerizam, dkk. 2020	<i>Production of Bio-Pellet Briquettes from Coconut Shell Waste as Alternative Energy for Household Scale.</i>	melalui torefaksi dengan reaktor <i>Counter-Flow Multi Baffle</i> (COMB). SNI 8675:2018 dengan nilai kalor 18,28 MJ/kg. Biopellet dari limbah tempurung kelapa Dengan variasi suhu 300°C, 400°C, 500°C, 600°C dengan waktu konstan 1 jam. Hasil terbaik pada suhu 500°C dengan nilai kalor 6564,88 kal/g memenuhi SNI 8021:2014.
Ridwan Abdurrahman, dkk. 2020	<i>Bio-pellets Manufacture from Palm Fruit Skin as Renewable Alternative Fuels in Updraft Type Gasification Furnace</i>	Limbah kulit buah sawit dengan nilai kalor 30,6059 MJ/kg memenuhi SNI 8021:2014.
Irma Rani, dkk. 2020	Thya Tandan kosong kelapa sawit	Nilai kalor pellet TKKS sebelum torefaksi sebesar 15,82 MJ/kg, setelah torefaksi menjadi 18,28 MJ/kg memenuhi SNI 8675:2018 pelet biomassa.
Dedi Iskandar, dkk. 2021	Arang tempurung kelapa, serbuk gergaji, dan sekam padi, dengan variasi 40%, 50%, dan 60%, dengan perekat 20%	Hasil biopellet dengan nilai kalor tertinggi 4.571,64 kal/g pada variasi arang tempurung kelapa 60% dengan jenis biomassa serbuk gergaji 40%.
Anurita Selvarajoo, dkk. 2021	<i>Bio-pellet from empty fruit bunch and durian rinds with cornstarch adhesive for potential renewable energy</i>	Biopellet dari tandan kosong kelapa sawit dan kulit durian dengan variasi 100%:0%, 90%:10%, 75%:25%, 50%:50%, 25%:75%, 10%:90%, melalui proses pirolisis. Hasil bio-char tertinggi adalah 40,9% yang diperoleh dari campuran 90% tandan kosong kelapa sawit dan 10% kulit durian pada suhu pirolisis 325°C dengan tingkat pemanasan 5°C/min. Penambahan 1% pati jagung sebagai perekat bio-char berbentuk pellet dengan nilai kalor 22,37 MJ/kg.
Rusdianasari, I Arisetyadhi, L Kalsum, Y Bow, A Syarif, and F Arifin. 2023	<i>Characterization of Empty Fruit Bunch of Palm Oil as Co-firing Biomass Feedstock</i>	Berdasarkan hasil studi akhir, biopellet dari tandan buah kosong meliputi 48,53% C, 6,05% H, 0,32% N, 36,8% O, dan 0,08% Sulphure. Nilai kalor biopellet TKKS adalah 4.583 kkal/kg, dengan nilai Hardgrove Grindability Index (HGI) 78,6 dan Ash Fusion Temperature (AFT) 1100°C.

2.2 Biomassa

Biomassa bersumber dari material organik, tumbuhan, dan hewan meliputi organisme air dan darat, limbah hewan, limbah pertanian dan residu hutan. Unit pembangunan biomassa selama fotosintesis tanaman mengombinasikan CO₂ dari udara dan air dari dalam tanah menjadi karbohidrat. Energi matahari untuk fotosintesis disimpan dalam bentuk ikatan kimia pada komponen struktural biomassa, maka energi matahari merupakan bentuk dari energi biomassa.

Biomassa memainkan peranan penting dalam pemenuhan energi terbarukan di Indonesia. Hal ini sejalan dengan Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional yang menargetkan 23% bauran energi Indonesia pada tahun 2025 berasal dari sumber-sumber terbarukan termasuk biomassa. Biomassa dapat dianggap sebagai solusi yang menarik dan komponen penting dalam diversifikasi sumber energi, karena relatif murah (terutama bila berasal dari limbah pertanian atau kayu) dan tersedia secara luas [16].

Biomassa umumnya dicirikan oleh komposisi organiknya, analisis unsur, analisis proksimat, dan sifat-sifat curahnya seperti nilai kalor dan densitas curah. Komposisi organik meliputi selulosa, hemiselulosa, dan kandungan massa lignin. Analisis unsur biasanya melaporkan karbon, hidrogen, oksigen, nitrogen, dan abu. Elemen lain sering dilaporkan jika ditemukan dalam jumlah tinggi atau penting untuk aplikasi target (seperti belerang untuk pembakaran). Analisis proksimat adalah ukuran kadar air, zat yang mudah menguap, karbon tetap, dan kadar abu. Nilai kalor adalah jumlah energi yang dilepaskan selama pembakaran biomassa sempurna [17].

Biomassa sebagian besar terdiri dari bahan lignoselulosa. Lignoselulosa adalah istilah yang menggambarkan komposit polimer tiga dimensi yang dibentuk oleh tanaman sebagai bahan struktural. Tanaman mengandung berbagai jumlah lignin, selulosa, dan hemiselulosa.

Lignin adalah polimer yang fungsi utamanya adalah untuk memberikan dukungan struktural dan melindungi tanaman dari aktivitas mikroba. Oleh karena itu, lignin adalah produk sampingan umum dari proses biokimia, karena mikroba tidak dapat dengan mudah memanfaatkannya sebagai substrat. Di samping itu, proses termokimia dapat menguraikan lignin meskipun produknya masih sulit diprediksi. Alih-alih pecah menjadi monomernya, dekomposisi lignin cenderung membentuk oligomer dari repolimerisasi

hidrokarbon yang lebih kecil. Oligomer ini dapat digasifikasi atau ditingkatkan secara katalitik ke bahan bakar dan bahan kimia yang diinginkan.

Selulosa adalah polisakarida yang terbuat dari rantai glukosa. Mikroba mengonsumsi selulosa secara efisien, dan mereka dapat mengubahnya menjadi berbagai bahan kimia terutama etanol.

Hemiselulosa terdiri dari sejumlah besar heteropolisakarida yang dibangun dari heksosa, pentosa, dan deoksiheksosa. Hemiselulosa memerlukan perlakuan asam atau enzimatis sebelum gulanya tersedia untuk aktivitas mikroba.

Komposisi organik bahan baku biomassa memiliki dampak signifikan pada jenis proses yang dapat mengubahnya menjadi bahan bakar dan bahan kimia. Proporsi lignoselulosa senyawa organik mempengaruhi jenis dan jumlah senyawa degradasi yang terbentuk selama konversi biomassa secara termokimia. Selain itu, ada efek interaksi antara senyawa ini yang tidak dipahami dengan baik. Oleh karena itu, teknik analisis yang semakin kuat sedang dikembangkan untuk mengukur tidak hanya kuantitas tetapi juga sifat fisik senyawa organik [18].

Analisis proksimat terutama penting dalam aplikasi termokimia, karena menggambarkan evolusi umum produk pembakaran biomassa. Analisis proksimat diukur dengan memanaskan biomassa di bawah suhu terkontrol dan kondisi laju pemanasan. Kehilangan berat total dari menahan suhu biomassa pada 100 ° C mewakili kadar airnya. *Volatile matter* adalah fraksi biomassa yang terurai menjadi gas pada suhu sedang sekitar 400 ° C dalam lingkungan inert. Fraksi yang tersisa merupakan campuran dari karbon padat (*fixed carbon*) dan bahan mineral (*ash*). Kadar abu dapat ditentukan dengan memasukkan oksigen dan membakar bahan karbon yang tersisa.

Analisis *ultimate* sering dilaporkan dalam basis kering, bebas abu (daf) dan sering digunakan untuk memperkirakan sifat biomassa termal. Kinerja termal bahan bakar biomassa sangat bergantung pada nilai kalornya. Nilai kalor adalah entalpi bersih yang dilepaskan pada reaksi bahan bakar dengan oksigen pada kondisi stoikiometri. Dilaporkan berdasarkan nilai kalor yang lebih rendah (LHV) atau nilai kalor yang lebih tinggi (HHV) [18].

2.3 Cangkang Kelapa Sawit

Di Indonesia, kelapa sawit berkembang dengan pesat dan perkebunannya yang banyak tersebar di berbagai wilayah. Wilayah yang paling besar dalam produksi kelapa sawit ada di Pulau Sumatera. Berkembangnya perkebunan kelapa sawit di Indonesia dikarenakan kelapa sawit memberikan kontribusi yang cukup besar terhadap devisa negara. Pada 2003, total devisa yang dihasilkan industri ini mencapai US\$ 2,6 miliar atau 4,3% dari total ekspor Indonesia seluruhnya yang mencapai US\$ 61 miliar [18]. Dari jumlah ketersediaan lahan, Indonesia memiliki potensi untuk menjadi negara penghasil kelapa sawit terbesar di dunia [1].

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis Jacq*) memiliki beberapa varietas, di antaranya *dura*, *pesifera*, dan *tenera* [19]. Taksomomi tumbuhan kelapa sawit tergolong sebagai *ordo palmales*, *famili palmae*, *spesies E. guineensis Jacq*, *E. melanococa* atau *E. oleifera* yang berasal dari Amerika latin. Cangkang sawit adalah bagian berkayu yang ada didalam buah sawit. Bahan ini berwarna coklat tua sampai kehitaman dengan tektur yang cukup keras dan berfungsi sebagai pelindung daging buah biji sawit (*endosperm*). Cangkang kelapa sawit sebagai salah satu limbah padat pengolahan minyak CPO dan PKO, dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi. Dengan kandungan karbon terikat sebesar 20,5%, cangkang kelapa sawit mampu dijadikan sebagai sumber energi alternatif [20].



Gambar 2. Cangkang Kelapa Sawit

Cangkang sawit seperti halnya kayu diketahui mengandung komponen-komponen serat seperti selulosa, hemiselulosa, dan lignin. Cangkang kelapa sawit

mempunyai komposisi kandungan selulosa (26,27%), hemiselulosa (12,61%), dan lignin (42,96%). Kandungan *proximate* dan *ultimate* cangkang kelapa sawit dapat dilihat pada Tabel 2 dan 3.

Tabel 2. Kandungan *Proximate* Cangkang Kelapa Sawit

<i>Analisis Proximate</i>	Kadar %
<i>Moisture Content</i>	5,7
<i>Volatile Matters</i>	73,7
<i>Ash</i>	2,2
<i>Fixed Carbon</i>	18,4

Sumber : [20]

Tabel 3. Kandungan *Ultimate* Cangkang Kelapa Sawit

<i>Analisis Ultimate</i>	Kadar %
C	53,8
H	7,2
O	36,3
N	0,5
S	0,6

Sumber : [20]

2.4 Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) adalah limbah pabrik kelapa sawit yang jumlahnya sangat melimpah. Setiap pengolahan 1 ton TBS (Tandan Buah Segar) akan dihasilkan TKKS sebanyak 22 – 23% TKKS atau sebanyak 220 – 230 kg TKKS. Apabila dalam sebuah pabrik dengan kapasitas pengolahan 100 ton/jam dengan waktu operasi selama jam, maka akan dihasilkan sebanyak 23 ton TKKS [21].

Tandan kosong kelapa sawit merupakan sumber bahan organik yang kaya unsur hara N, P, K, dan Mg. Dalam setiap ton tandan kosong kelapa sawit mengandung hara N 1,5%, P 0,5%, K 7,3%, dan Mg 0,9% yang dapat digunakan sebagai substitusi pupuk pada tanaman kelapa sawit [22]. Tandan kosong kelapa sawit mengandung 41-46,5% selulosa, 25,3-33,8% hemiselulosa dan 27,6-32,5% lignin.

Tandan kosong kelapa sawit (TKKS) adalah potensi biomasa lignoselulosa yang sangat melimpah dari limbah pabrik kelapa sawit (PKS). Volumennya sangat-sangat besar dan belum dimanfaatkan. Tiga komponen utama TKKS adalah selulosa, hemiselulosa dan lignin. Selama ini, tandan kosong hanya dimanfaatkan sebagai penimbun tanah atau terkadang dijadikan pupuk kompos. Sisa tandan kosong kelapa sawit dibiarkan menumpuk. Apabila penumpukan dibiarkan maka tandan kosong kelapa sawit dapat

menimbulkan permasalahan sampah. Tandan kosong dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar karena memiliki nilai kalor sebesar 2900 kal/gram. Potensi pemanfaatan biomassa yang dihasilkan dari pabrik kelapa sawit harus mempertimbangkan beberapa karakteristik utama, praktik, dan jumlah yang tersedia. Evolusi dari pabrik kelapa sawit dari limbah biomassa untuk membuat *biorefinery* membutuhkan biaya yang sangat tinggi untuk pengembangannya. Perkembangan serupa telah dilakukan di Malaysia baru-baru ini dengan menganalisis tujuh teknologi yang memanfaatkan residu kelapa sawit. Teknologi tersebut meliputi produksi etanol, produksi briket, pemulihan metana, biofuel sebagai kombinasi panas listrik, dan pembangkit listrik (CHP). Berdasarkan studi tersebut pengaplikasian sebagai bahan bakar pembangkit merupakan cara yang paling mudah dilakukan [30]. Tandan kosong kelapa sawit dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Tandan Kosong Kelapa Sawit

Kelapa sawit mendominasi perkebunan di Indonesia, terutama wilayah Sumatera dan Kalimantan. Tinggi pohon kelapa sawit mencapai 20 – 24 meter. Setiap pohon dapat menghasilkan 20 tandan buah segar per tahun dengan berat satuan buah mencapai 20 kg. Pabrik kelapa sawit menghasilkan limbah biomassa baik berbentuk padat maupun cair. Biomassa pengolahan pabrik kelapa sawit terdiri dari *Mesocarp Fibre*, *Palm Kernel Shell*, Tandan Kosong Kelapa Sawit (*Empty Fruit Bunch/ TKKS*), dan *Palm Oil Mills Effluent* (POME). Bentuk fisik tandan kosong masih berbentuk seperti tandan atau janjangan. Bentuk fisik seperti ini juga menyulitkan proses pengolahan limbah tandan kosong ini, karena memiliki bentuk, densitas dan kekerasan yang berbeda. Terdapat beberapa teknologi peningkatan kualitas limbah tandan kosong kelapa sawit yang saat ini sedang

berkembang, di antaranya adalah: biopellet, *hydrothermal treatment*, dan *torrefaction*. Metode yang sudah sering dikaji efektif dalam meningkatkan kualitas biomassa baik secara fisis dan kandungan kimia adalah *Hydrothermal Treatment* (HT). Sejumlah penelitian telah mengusulkan proses pencucian biomassa sebelum dijadikan bahan bakar, tujuan pencucian ini adalah untuk menghilangkan elemen bermasalah dari biomassa. Perlakuan hidrotermal (HT) dikenal untuk mengkonversi limbah padat kadar air tinggi menjadi kering, seragam, bubuk, bahan bakar padat seperti batu bara. Selain itu, HT juga dapat menghilangkan anorganik seperti Ca, S, P, Mg, K Fe, dan Mn dari biomassa. Hidrotermal merupakan metode konversi kimia yang digunakan untuk meningkatkan kualitas bahan bakar padat biomassa. Hidrotermal sering disebut dengan proses Torefaksi. Torefaksi atau pengarangan, merupakan perlakuan termal biomassa tanpa adanya oksigen selama kurang lebih 15 – 60 menit pada temperatur 200°C – 300°C dan tekanan atmosferik. Hasilnya, biomassa akan berubah menjadi produk yang menyerupai arang. Transformasi torefaksi adalah proses dengan efisiensi tinggi (konversi 85% – 95%). Perlakuan panas tidak hanya mengubah struktur serat, tetapi juga keuletan dari biomassa. Selama proses torefaksi, biomassa akan mengalami devolatisasi yang menyebabkan penurunan berat, tetapi kandungan energi awal dari biomassa yang telah mengalami torefaksi tersebut tetap terjaga dalam produk padatan sehingga densitas energi dari biomassa menjadi lebih tinggi dibanding biomassa awal. Proses hidrotermal sering juga disebut dengan proses karbonisasi dimana dihasilkan produk berupa char. Perubahan fisik juga terjadi selama proses hidrotermal ini. Struktur tandan kosong yang ulet dan berserat kuat, sebagian besar hancur melalui pemecahan hemiselulosa dan tingkat molekul selulosa menjadi lebih rendah. Hal ini membuat tandan kosong hidrotermal menjadi rapuh dan mudah digiling [30]. Adapun komponen yang ditinjau yaitu kadar air, zat terbang, abu, dan karbon tetap. Analisis proksimat dilakukan untuk mengetahui komponen penyusun bahan bakar padat. Kandungan proksimat dari TKKS dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 4. Kandungan *Proximate* TKKS

Parameter	Kadar
<i>Moisture content (%)</i>	8,2
<i>Ash content (%)</i>	11,05
<i>Volatile content (%)</i>	14,04
<i>Fixed carbon content (%)</i>	66,90
<i>Heating value (cal/gr)</i>	3.832,28

Sumber : [6]

2.5 Biopellet

Dalam dunia perdagangan, standar digunakan sebagai spesifikasi yang disepakati bersama antara penjual dan pembeli atau sebagai pembuka akses pasar. Kesepakatan standar di Indonesia disebut Standar Nasional Indonesia (SNI), sedangkan dalam perdagangan internasional, terdapat standar internasional. Dengan memenuhi standar internasional, produk Indonesia dapat masuk ke pasar dunia.

Banyak peneliti memfokuskan pada penelitian untuk mengubah limbah menjadi bahan bakar baik organik maupun anorganik. Umumnya jarak antar lokasi produksi biomassa seperti hutan, lahan pertanian hingga lokasi industri atau kawasan pemukiman cukup jauh dan membutuhkan logistik yang memenuhi syarat untuk transportasi dan penyimpanan [23][24][25]. Jadi, satu metode canggih yang efektif dan efisien pemanfaatan biomassa untuk energi adalah proses peletisasi [26][27][28].

Biopellet adalah salah satu bentuk bahan bakar alternatif terbentuk dari bahan organik terkompresi atau biomassa. Ada beberapa jenis bahan bakar pellet yang paling umum dan umumnya dibuat dari serbuk gergaji padat yang berasal dari limbah pemotongan kayu, limbah pembuatan mebel dan limbah lainnya. Pellet ini dibuat dengan menghancurkan bahan baku dan dengan bantuan perekat biasanya tapioca, kemudian dilakukan pencetakan dengan alatnya yang bernama *pellet mill*. Biopellet dibuat dalam bentuk silinder dengan diameter 6-12 mm dan panjang 10-30 mm. Peletisasi adalah proses ekstrusi tipe pencetak termoplastik, dimana bahan biomassa diberikan gaya tekan oleh roller internal untuk dapat melewati cetakan silinder yang diam di eksternal ring yang berputar, dan menghasilkan padatan pellet. Salah satu bentuk dari biopellet dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Biopellet

Kerapatan biomassa yang rendah menjadi meningkat, dari 40-250 kg/m³ menjadi 600-800 kg/m³. SNI terkait biopellet yang sudah tersedia di antaranya SNI 8675:2018 pelet biomassa untuk energi, SNI 8021:2020 pelet kayu, SNI 8951:2020 pelet biomassa untuk pembangkit listrik, SNI 8966:2021 bahan bahan jumputan padat untuk pembangkit listrik. Spesifikasi standar biopellet untuk pembangkit listrik (SNI 8951 : 2020) dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Spesifikasi Standar Biopellet untuk Pembangkit Listrik (SNI 8951 : 2020)

Parameter Uji	Satuan, min/maks	Kualitas		
		Premium	Standar	Utilitas
Kadar air	%berat, maks	9,5	10	12
Kadar abu	%berat, maks	1,3	3	4
Kadar volatil	%, maks	72	71	70
Kadar karbon tetap	%, min	17	16	14
Nilai kalor	kkal/kg, min	4.300	4.300	4.040

Potensi manfaat yang dapat diperoleh melalui penerapan limbah perkebunan dan pabrik kelapa sawit menjadi biopellet, telah banyak penelitian yang dilakukan di bidang ini. Teknik dan kondisi proses yang berbeda telah dipelajari, dengan menggunakan berbagai jenis limbah kelapa sawit, menghasilkan pelet biomassa yang dihasilkan dengan kualitas dan kuantitas yang berbeda. Pembuatan biopellet umumnya melibatkan proses pra-perawatan fisik seperti pencucian, pengecilan ukuran dan pengeringan, dan dalam beberapa kasus akan membutuhkan penambahan pengikat atau bahan pengikat yang akan membuat biopellet menjadi lebih padat dan kencang [37]. Salah satu alternatif yang dapat dilakukan untuk meningkatkan kualitas biopellet adalah dengan menggabungkan bahan

baku dengan jenis biomassa lainnya. Adapun beberapa parameter pengujian biopelet di antaranya yaitu kadar air, kadar abu, kadar zat terbang, karbon terikat dan nilai kalor.

Kadar air adalah rasio kandungan air dalam bahan yang hilang selama proses pengeringan dibanding berat awal. Penetapan kadar air bertujuan untuk mengetahui sifat higroskopis biopelet yang dihasilkan. Tinggi dan rendahnya nilai kadar air mempengaruhi nilai kalor. Semakin rendah nilai kadar air maka akan meningkatkan nilai kalor. Rendahnya nilai kadar air akan memudahkan proses dalam penyalaan dan menurunkan jumlah asap saat pembakaran. Abu merupakan bagian yang tersisa dari proses pembakaran yang sudah tidak memiliki unsur karbon. Unsur utama abu adalah silika dan pengaruhnya kurang baik terhadap nilai kalor bakar yang dapat menurunkan kualitas pelet karena unsur silika tidak terbakar pada waktu pembakaran. Kadar zat terbang merupakan zat yang dapat menguap sebagai hasil dekomposisi senyawa-senyawa di dalam suatu bahan selain air. Penggunaan pelet untuk bahan bakar rumah tangga, pelet harus memiliki kadar zat terbang yang rendah agar tidak menimbulkan polusi. Semakin tinggi kadar zat terbang suatu bahan bakar, maka efisiensi pembakaran bahan bakar akan menurun dan asap yang dihasilkan semakin banyak [39].

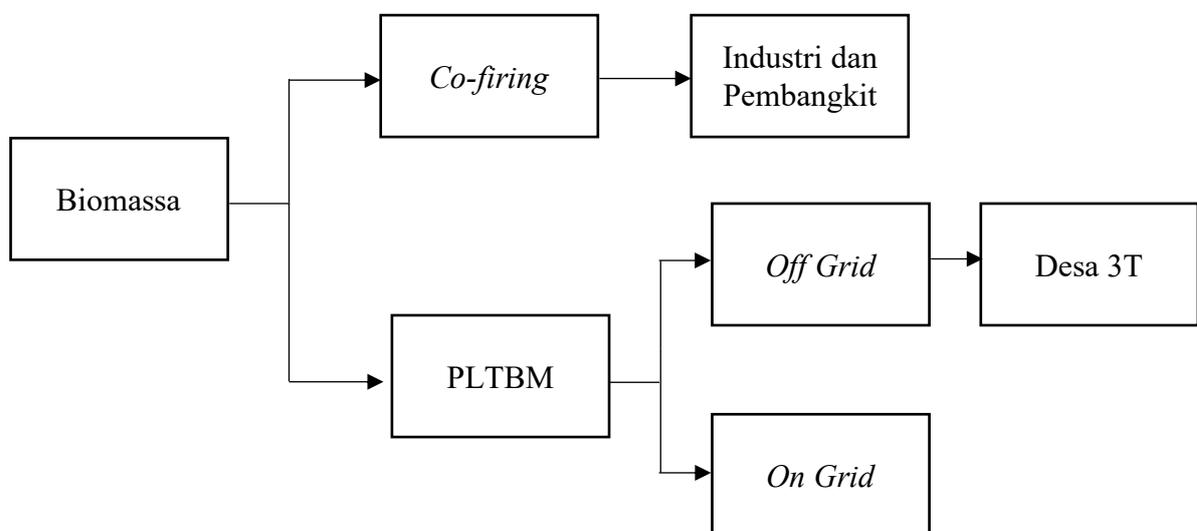
Kadar karbon terikat didefinisikan sebagai fraksi karbon dalam biomassa selain fraksi air, zat terbang dan abu. Besar kecilnya kadar karbon terikat dapat dipengaruhi oleh tinggi rendahnya kadar zat terbang. Semakin tinggi kadar karbon terikat, maka nilai kalor akan semakin tinggi. Nilai kalor merupakan parameter utama kualitas biopelet dan sangat penting dalam menentukan efisiensi suatu bahan bakar. Semakin tinggi nilai kalor bahan bakunya akan berakibat semakin tinggi nilai kalor biopelet yang dihasilkan. Semakin tinggi suhu, maka semakin tinggi nilai kalor biopelet yang dihasilkan [39].

2.6 Co-firing PLTU di Indonesia

Bahan bakar fosil seperti batubara, gas alam dan minyak bumi masih merupakan sumber energi global yang dominan, meskipun berupa sumber energi yang tidak terbarukan dan berkontribusi terhadap perubahan iklim global. Energi fosil tersebut masih akan sulit tergantikan dalam waktu dekat dan diperkirakan akan bertahan setidaknya 19 tahun. Pembangkit listrik berbahan bakar batubara masih menduduki 41% produksi listrik global dan diperkirakan mencapai 44% pada tahun 2030 [29].

Di era Revolusi Industri 4.0, kebutuhan energi khususnya energi listrik menjadi sangat penting. Kita harus mempercepat pengembangan kemampuan energi baru serta terbarukan untuk mencapai bauran nasional di tahun 2025. Upaya pengurangan pasokan bahan bakar fosil dan pencegahan peningkatan emisi gas rumah kaca mendorong ketertarikan yang mendunia pada sistem energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan, antara lain melalui pemanfaatan energi biomassa.

Sehubungan dengan kandungan energi pada biomassa umumnya relatif rendah maka kombinasi bahan bakar biomassa dan batubara menjadi salah satu penyelesaian untuk mempertahankan kandungan energi yang optimal. Kombinasi bahan bakar tersebut dapat melalui cara pembakaran sistem *co-firing* [29]. *Co-firing* merupakan pencampuran bahan bakar biomassa pada furnace boiler PLTU. Selain mengurangi penggunaan bahan bakar fosil yaitu batubara, kombinasi pembakaran batubara dengan biomassa merupakan alternatif yang layak untuk mengurangi emisi tanpa mengganggu efisiensi [38]. Adapun rencana pengembangan peningkatan bauran EBT berbasis biomassa terdapat pada Gambar 5.



Gambar 5. Rencana Pengembangan Peningkatan Bauran EBT Berbasis Biomassa

Co-firing, juga dikenal sebagai *co-combustion*, adalah proses pembakaran dua jenis bahan bakar berbeda dalam perangkat pembakaran yang sama, seringkali dioperasikan dalam ketel pembangkit uap. Dalam pengertian sederhana, pembakaran *co-firing* dari batubara dengan biomassa dapat dipandang sebagai bagian dari sistem yang melengkapi perangkat boiler berbahan bakar batubara [29]. Sebagian batubara dengan bahan bakar renewable untuk kebutuhan bahan bakar di ruang bakar atau boiler. Substitusi mengurangi emisi gas buang batubara. *Co-firing* dianggap sebagai pendekatan jangka pendek yang paling menjanjikan untuk mengurangi CO₂, dengan mitigasi emisi melalui penggunaan biomassa [38].

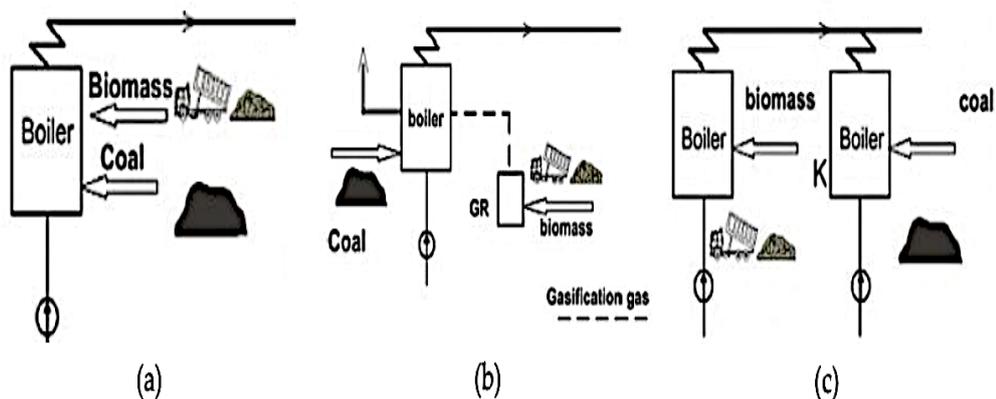
Terdapat tiga metode *co-firing* yang dibedakan berdasarkan mekanisme pencampuran dengan batubaranya.

1) *Direct Co-firing*, merupakan opsi yang paling murah dan yang paling umum diterapkan. Limbah biomassa yang sudah diolah, biopellet atau HT, dicampur melalui peralatan penggiling/grinding dan pengumpan/*feeder* yang sama atau terpisah kemudian dimixing dengan batubara ke dalam boiler yang sama untuk dibakar, maupun menggunakan boiler terpisah.

2) *Indirect Co-firing*, biomassa digasifikasi terlebih dahulu menjadi *syngas*. Kelebihan dari metode ini adalah proses gasifikasi ini meminimalkan dampak pencemaran dari pembakaran langsung.

3) *Paralel 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 batubara eksisting.

Pendekatan ini menggunakan boiler biomassa yang terpisah dari boiler batubara yang memungkinkan pemanfaatan biomassa lebih maksimal, namun biasanya digunakan pada produk sampingan untuk pabrik kertas (kulit kayu, limbah kayu).

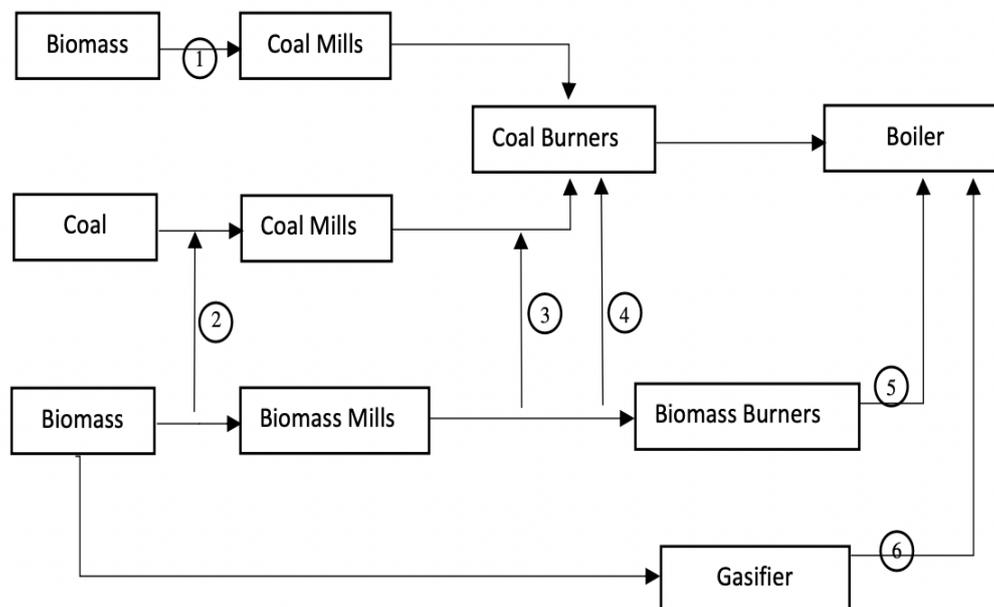


Gambar 6. Metode *Co-firing* [30]

(a) *Direct Co-firing*, (b) *Indirect Co-firing*, (c) *Paralel Co-firing*

Pemanfaatan energi baru terbarukan terus ditingkatkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Salah satu yang didorong dalam RUKN (Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional) 2019-2038 yakni melalui metode *co-firing* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dengan memanfaatkan biomassa sebagai substitusi (campuran) batubara. Sementara untuk hasil hutan jenis kayu jika diekuivalensikan dengan besaran listrik yang dihasilkan, total potensi kayu untuk dijadikan jadi wood pellet sebesar 1.335 Mega Watt electrical (MWe). Potensi tersebut tersebar di Sumatera (1.212 MWe), Kalimantan (44 MWe), Jawa, Madura dan Bali (14 MWe), Nusa Tenggara Barat dan Nusa Tenggara Timur (19 MWe), Sulawesi (21 MWe), Maluku (4 MWe) dan Papua (21 MWe) dengan nilai kalori sebesar 3.300 - 4.400 Cal/gr. Sementara itu, Perusahaan Listrik Negara (PLN) yang menginisiasi aksi korporasi melalui metode *co-firing* menjelaskan, untuk memenuhi kebutuhan 1% *co-firing* di PLTU di Indonesia, maka dibutuhkan biomassa sebanyak 17.470 ton per hari atau 5 juta ton *wood pellet* ton per tahun, ekuivalen dengan 738 ribu ton per tahun pelet sampah.

Berbagai metode pemanfaatan biomassa dan proses *co-firing* yang bisa dilakukan pada pembangkit listrik dijelaskan pada Gambar 7.



Gambar 7. *Biomass Firing and Co-Firing Technology* [40]

Teknologi yang bisa digunakan dalam proses *biomass firing and co-firing technology* yang sesuai Gambar 7 dijelaskan sebagai berikut:

1. Biomassa diproses melalui *coal mill* yang sudah dimodifikasi.
2. *Pre-mixing* biomassa dan batubara, dan proses *milling* melalui *mill pulverizer* dan *coal pipe* eksisting menuju *coal burners*.
3. Biomassa melalui proses *milling* yang terpisah dan diinjeksi ke *coal pipe* eksisting menuju *coal burners*.
4. Injeksi biomassa ke furnace dengan modifikasi pada *coal burners* melalui *dedicated pipe biomass*.
5. Injeksi biomassa ke furnace dengan burner yang didedikasikan untuk biomassa.
6. Gasifikasi dari biomassa, dan pembakaran dengan pada boiler.

Pembakaran biomassa terkenal sebagai zero CO₂ emisi, dengan kata lain metode ini tidak menyebabkan akumulasi nmolekul CO₂ di atmosfer, dan kandungan pada biomassa lebih sedikit sulfur jika dibandingkan dengan batubara. Oleh karena itu,

teknologi *co-firing* batubara dan biomassa diharapkan dapat dengan efektif menurunkan emisi CO₂ dan SO_x, jika dibandingkan dengan bakar fosil [40].

2.7 *Life Cycle Assessment (LCA)*

Life Cycle Assessment (LCA) mulai dikembangkan secara sederhana pada tahun 1970-1980an dan saat ini LCA telah memiliki standar internasional. Awal studi LCA yang dilakukan antara tahun 1969-1972 membahas tentang kemasan dan manajemen limbah. Pada tahun 1973 ketika terjadi krisis minyak membuat LCA semakin berkembang karena ketertarikan terhadap LCA yang semakin tinggi.

LCA merupakan sebuah metode berbasis *cradle to grave* yang digunakan untuk mengetahui jumlah energi, biaya, dan dampak lingkungan yang disebabkan oleh tahapan daur hidup produk dimulai dari saat pengambilan bahan baku sampai dengan produk dimulai dari saat pengambilan bahan baku sampai dengan produk itu selesai digunakan oleh konsumen. LCA mulai dikenal secara luas sekitar 20 tahun yang lalu. Hal ini dapat terlihat dari penggunaan dan penerapan LCA pada berbagai bidang yang dilakukan oleh pihak pemerintahan dan swasta untuk pengambilan keputusan. Peningkatan aplikasi LCA terjadi dikarenakan adanya standar yang telah berlaku secara internasional.

Pada tahun 2006 telah diterbitkan dua standar baru terkait LCA, yaitu ISO 14040 dan ISO 14044. Kedua standar ini menggantikan empat standar yang telah ada sebelumnya, yaitu ISO 14040:1997, ISO 14041:1999, ISO 14042:2000 dan ISO 14043:2000. Metode LCA dilakukan dengan melakukan identifikasi secara kuantitatif dari semua aliran input dan output dari sistem terhadap lingkungan dalam setiap tahap daur hidup (*life cycle*). Tahapan LCA dilakukan berdasarkan *principles and framework* LCA yang ada pada ISO 14044:2006 yang terdiri dari 4 tahap, yaitu definisi tujuan dan ruang lingkup (*goal and scope definition*), analisis inventaris input dan output (*life cycle inventory analysis*), penilaian dampak lingkungan dari semua input dan output (*life cycle impact assessment*), dan interpretasi hasil (*life cycle interpretation*). Pada praktiknya penyesuaian langkah yang ada dalam *framework* ISO tersebut dapat dilakukan sesuai dengan kondisi dan situasi yang ada.

Pengembangan LCA dipicu oleh berbagai pengembangan dan perkembangan masyarakat yang ada. Untuk mempermudah pemahaman dan penyebaran informasi hasil LCA yang dihasilkan untuk masyarakat maka dibuat berbagai penyederhanaan. Salah

satu bentuk penyederhanaan LCA adalah *carbon foot print*. *Carbon foot print* nantinya akan mengacu pada dampak pemanasan global yang merupakan salah satu dampak yang diperhitungkan dalam LCA. *Carbon foot print* adalah emisi gas rumah kaca yang menghubungkan dengan daur hidup sebuah produk yang ada di pasaran. *Carbon foot print* berfungsi sebagai informasi bagi masyarakat agar masyarakat dapat memilih produk yang lebih ramah lingkungan sehingga dapat tercipta konsumsi dan produksi yang berkelanjutan. Menurut, dalam penggunaan LCA terdapat empat pilihan utama untuk menentukan batas-batas sistem yang digunakan berdasarkan standar ISO 14044 di dalam sebuah studi LCA:

1. *Cradle to grave*: termasuk bahan dan rantai produksi energi semua proses dari ekstraksi bahan baku melalui tahap produksi, transportasi dan penggunaan hingga produk akhir dalam siklus hidupnya.
2. *Cradle to gate*: meliputi semua proses dari ekstraksi bahan baku melalui tahap produksi (proses dalam pabrik), digunakan untuk menentukan dampak lingkungan dari suatu produksi sebuah produk.
3. *Gate to grave*: meliputi proses dari penggunaan pasca produksi saja, digunakan untuk menentukan dampak lingkungan dari produk tersebut setelah meninggalkan pabrik.
4. *Gate to gate*: meliputi proses dari tahap produksi saja, digunakan untuk menentukan dampak lingkungan dari langkah produksi atau proses.

Studi LCA membutuhkan dan mengenai input dan output seluruh proses secara lengkap, meliputi bahan baku, proses pembuatan, distribusi, transportasi, konsumsi, hasil samping, dan dampak lingkungan agar mendapatkan hasil yang memuaskan dalam studi. LCA dapat berfungsi sebagai alat untuk perencanaan strategis, pembuatan kebijakan publik, pemasaran serta pengembangan dan peningkatan produk (ISO 2006a).