

Bab 2.

Tinjauan Pustaka

2.1. Pengertian Biomassa

Biomassa merupakan bahan baku bioenergi yang berasal dari makhluk hidup, baik dari tanaman maupun hewan. Energi biomassa adalah "sumber energi panas apa pun yang dihasilkan dari bahan biologis *non-fosil*" [7]. Sedangkan pengertian bioenergi adalah jenis energi yang dihasilkan dari bahan organik, atau biomassa, yang berasal dari tumbuhan [8].

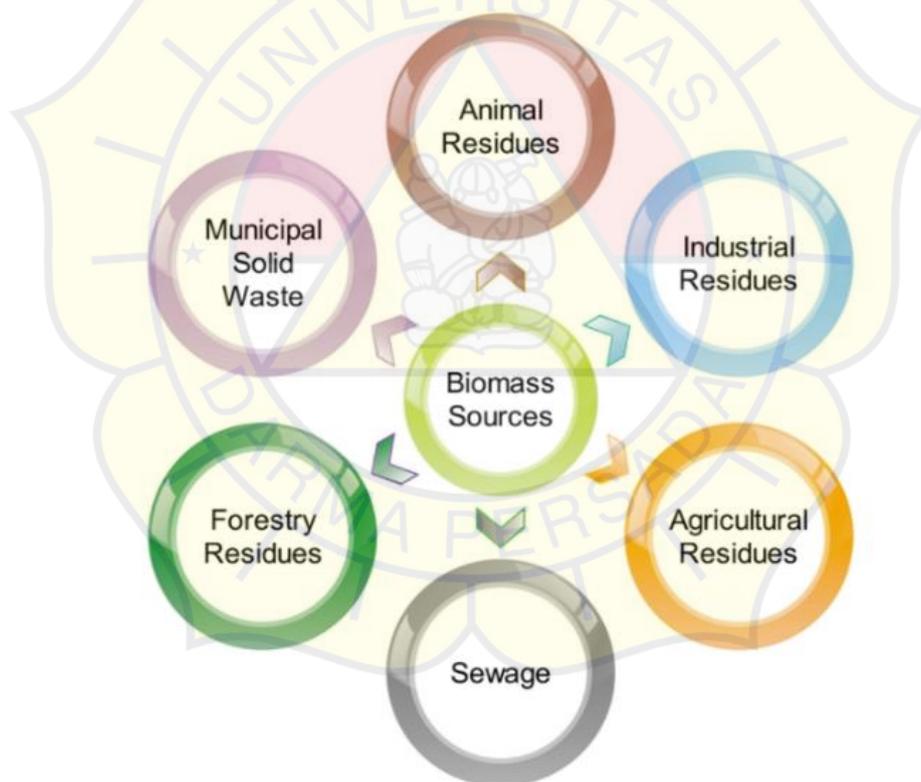
Ephraim, et al., telah merangkum pendapat yang memberikan pengertian yang sama tentang definisi biomassa yang mengacu pada bahan organik yang berasal dari tanaman atau hewan, yaitu semua bahan yang berasal dari biologis yang tidak menjadi fosil [9]. Biomassa kemudian dibagi menjadi dua kelompok besar yaitu biomassa murni termasuk biomassa terestrial (misalnya pohon, tanaman, sayuran, dan buah-buahan) dan biomassa akuatik (misalnya ganggang dan tanaman air).

Biomassa adalah produk padat organik-anorganik biogenik kontemporer (non-fosil) dan kompleks yang dihasilkan oleh proses alamiah dan antropogenik (teknogenik), dan terdiri dari: (1) konstituen alamiah yang berasal dari pertumbuhan vegetasi darat dan air melalui fotosintesis atau yang dihasilkan melalui pencernaan makanan hewan dan manusia; dan (2) produk teknogenik yang diperoleh dari pemrosesan konstituen alamiah di atas [10]. Jadi biomassa adalah bahan baku untuk menghasilkan energi yang disebut bioenergi.

2.2. Sumber dan Tipe Biomassa

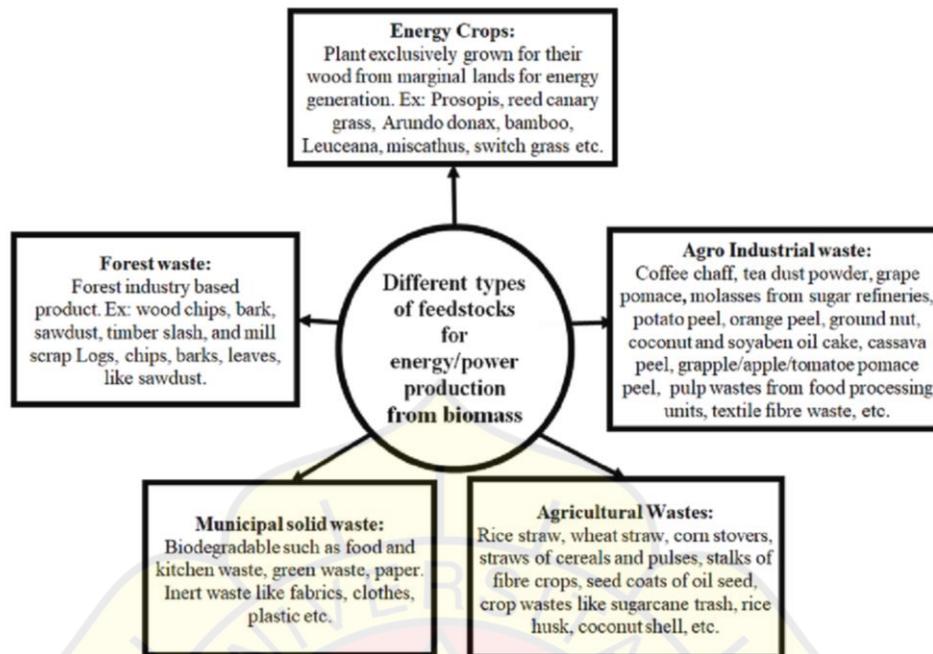
Kendati biomassa berasal dari makhluk hidup, terutama yang berasal dari pertanian, perkebunan, dan kehutanan, maka paradigma yang digunakan adalah pemanfaatan limbah dari proses produksi/industri di bidang tersebut yang mungkin menghasilkan bahan pangan, bahan papan, serta bahan industri untuk farmasi. Penerapan ini akan menghindarkan konflik kepentingan antara penyediaan bahan baku produksi/industri tersebut dengan kepentingan penyediaan bahan bakar bahan

baku *co-firing*. Secara umum sumber bahan baku biomassa yang dapat dikonversi menjadi menjadi bahan bakar (*fuel*) melalui pemanfaatan limbahnya adalah limbah pertanian, limbah perkebunan, limbah peternakan, limbah perikanan dan kelautan, dan limbah kehutanan [11, 12]. Khusus untuk kelautan, biomassa dapat diperoleh secara langsung melalui budidaya algae [13, 14]. Perhatian sumber biomassa juga dapat berasal dari tanaman energi (*energy crops*) yaitu tanaman yang dibudidayakan khusus untuk digunakan sebagai bahan baku biomassa [15, 16]. Adapun limbah dalam bentuk sampah termasuk limbah kota (lumpur limbah, gas TPA), limbah pertanian (ternak, pupuk kandang, residu tanaman pertanian) dan limbah industri (kayu bongkaran, limbah minyak atau lemak) juga merupakan bagian dari bahan baku biomassa [17]. Penjelasan sumber ini diilustrasikan dalam Gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1. Sumber bahan baku biomassa (Tursi, 2019)

Mishra et al (2023) menjelaskan lebih rinci sumber-sumber biomassa melalui pembagian lima kelompok sumber yaitu tanaman energi, limbah industri pertanian, limbah pertanian, sampah kota, dan limbah hutan (Gambar 2.2).



Gambar 2.2. Berbagai jenis sumber daya biomassa digunakan untuk menghasilkan bioenergi (Sumber: [18]).

2.3. Klasifikasi Biomassa

Variasi dan kuantitas serta komposisi biomassa memberikan dasar untuk membuat pengelompokkannya dan tergantung pada tujuan dan ruang lingkungannya. Berdasarkan asal, fungsi dan produk akhir, Tursi membuat klasifikasi biomassa secara umum biomassa dalam dua cara (Tursi, 2019):

1. Pengkategorian berdasarkan jenis biomassa yang ada di alam (berdasarkan ekologi atau jenis vegetasi);
2. Kategorisasi berdasarkan penggunaan dan aplikasi biomassa sebagai bahan baku.

Yang pertama adalah klasifikasi yang paling banyak digunakan dengan membagi biomassa menjadi beberapa kelompok, yaitu :

1. Kayu dan biomassa berkayu
2. Biomassa herba
3. Biomassa akuatik
4. Biomassa kotoran hewan dan manusia
5. Campuran biomassa

Kendati terdapat beberapa pendapat tentang sumber biomassa namun dalam penelitian ini pengelompokan bahan baku biomassa dilakukan berdasarkan kategorisasi limbahnya dan kategorisasi penggunaannya sebagai bioenergi padat. Kategorisasi limbah yang dapat digunakan untuk mendukung industri bioenergi padat adalah limbah aktivitas pertanian, perkebunan, kehutanan, dan sampah kota (*municipal solid waste/MSW*). Sedangkan kategorisasi biomassa berdasarkan penggunaan dan aplikasi tanaman didedikasikan khusus menjadi bahan baku biomassa untuk energi adalah hutan tanaman energi. Rincian sumber biomassa berdasarkan valorisasi dan aktivitas/dedikasi khusus disajikan pada Tabel 1.1.

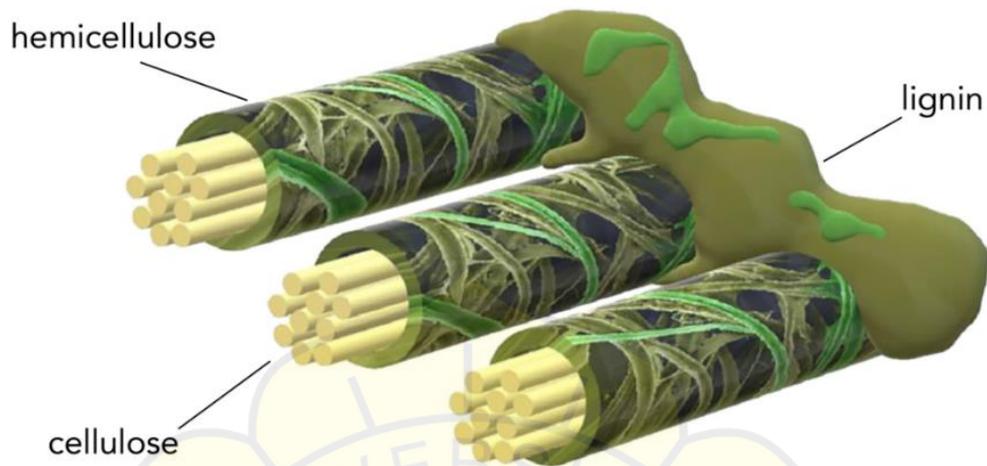
Tabel 1.1. Contoh tipe biomassa berdasarkan valorisasi limbah dan dedikasi penanaman

No	Aktivitas	Contoh Tipe Biomassa
1	Pertanian	Limbah tanaman : tongkol jagung, batang jagung, sekam padi, jerami padi, kacang tanah, batang sorgum
2	Perkebunan	Limbah industri : ampas tebu, daun-pucuk tebu, tandan buah kosong, pelepah sawit, cangkang sawit, serat sawit, batang kelapa sawit, kulit kakao, batok kelapa, sabut kelapa, kulit kopi, pohon karet
3	Kehutanan	Limbah hutan dan industri kehutanan : bambu, kayu beech, pinus, kayu poplar, kayu cemara, pohon willow, rumput liar, semak berduri, bunga tahi ayam, pohon babul, kenaf, pohon belalang hitam
4	Sampah Kota (MSW)	Sampah kota : Refused Derived Fuel (RDF), Solid Recovered Fuel (SRF)
5	Tanaman Energi	Hutan tanaman energi : akasia mangium, kaliandra, gamal, serbuk kayu industri

1.4. Karakteristik dan Komponen Penyusun Biomassa

Biomassa memiliki karakteristik tersendiri sehingga dapat dibedakan antara tipe biomassa. Komponen penyusun yang menjadi penciri biomassa adalah komposisi kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin pada setiap materi dengan fungsinya seperti diilustrasikan pada Gambar 2.3 (Tursi, 2019). Tursi (2019) juga telah

merangkum pengertian ketiga bahan penyusun biomassa termasuk unsur penyusun keempat yaitu tepung (starch) dan menjadi panduan utama kajian ini.



Gambar 2.3. Komponen penyusun biomassa dan fungsinya (Tursi, 2019).

a. Selulosa

Selulosa, polimer linier, adalah karbohidrat kompleks (atau Gambar 2 sumber biomassa yang paling penting. polisakarida) dengan berat molekul tinggi dan maksimum 10.000 unit monomer D-glukosa, yang dihubungkan oleh ikatan β -1,4-glikosidik. Selulosa juga merupakan senyawa organik paling melimpah yang dapat ditemukan di alam (misalnya, 90% dan 50% struktur kapas dan kayu masing-masing dikontribusikan oleh selulosa) yang memiliki fungsi struktural dalam dinding sel tanaman.

b. Hemiselulosa

Hemiselulosa adalah salah satu konstituen utama dinding sel tanaman dan terdiri dari polisakarida bercabang yang heterogen. Hemiselulosa sangat terkait dengan permukaan mikrofibril selulosa. Kandungan dan struktur hemiselulosa berbeda tergantung pada jenis tanaman (Bala et al., 2016). Berbagai unit gula tersusun dengan substituen yang berbeda dan dalam proporsi yang berbeda. Hemiselulosa terurai secara termal antara 180°C dan 350°C, sehingga menghasilkan gas yang

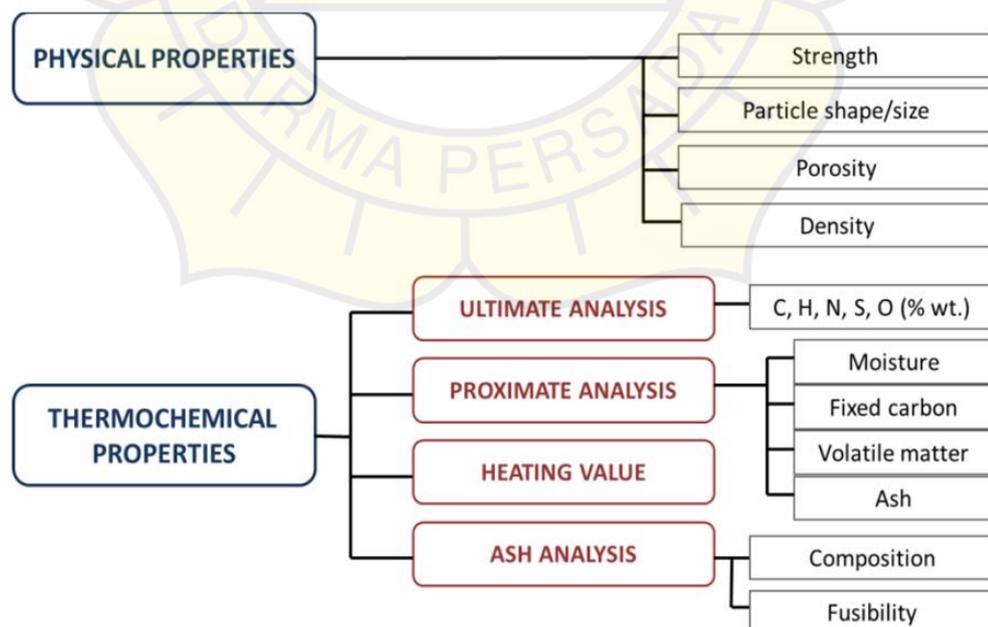
tidak dapat dikondensasi, batu bara, dan berbagai keton, aldehida, asam, dan furan (Carpenter et al., 2014).

c. Lignin

Lignin juga terkandung dalam dinding sel tanaman, dengan fungsi mengikat, menyemen, dan menyatukan serat-serat untuk meningkatkan kekompakan dan ketahanan struktur tanaman. Lignin juga dikenal karena efeknya yang membungkus serat. Oleh karena itu, untuk mengekstrak serat selulosa dari bahan tanaman, degradasi lignin sangatlah penting.

1.5. Karakteristik Sifat Fisik dan Termokimia Biomassa

Kajian karakteristik biomassa juga memerlukan pengetahuan terkait dengan sifat-sifat fisik (*physical properties*) dan sifat-sifat termokimia (*thermochemical properties*) dengan rincian informasi seperti yang disajikan pada Gambar 2.4. Informasi penting dalam sifat-sifat fisik biomassa itu mencakup kekuatan (*strength*), ukuran (*size*), porositas (*porosity*), dan kepadatannya (*density*). Pada sifat-sifat termokimia, mencakup empat analisis yaitu *analisis ultimate*, proximate, nilai panas (*heating value*), dan analisis abu (*ash*).



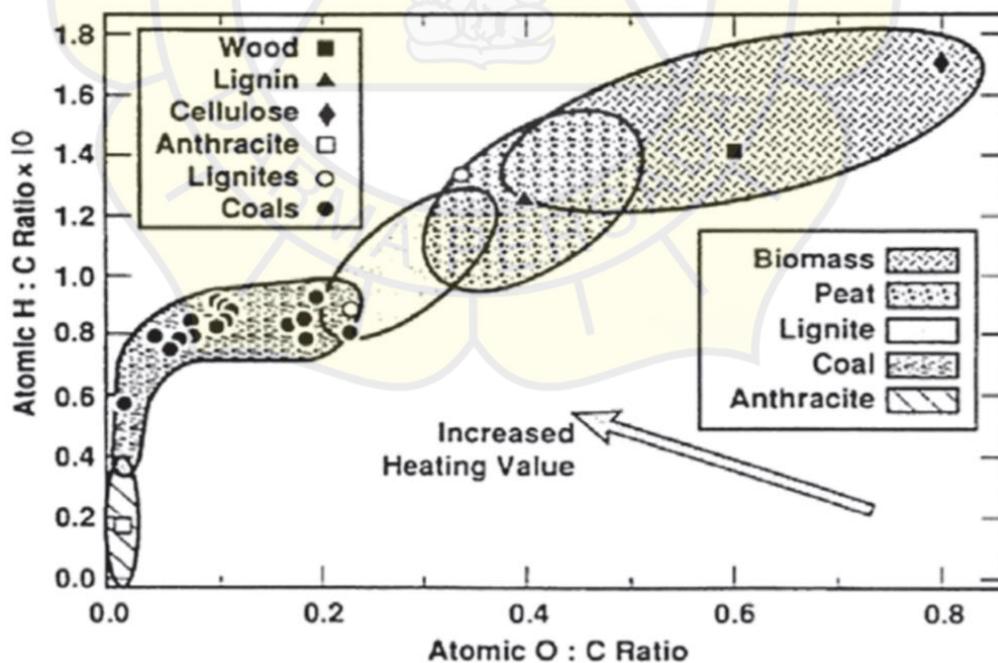
Gambar 2.4. Karakteristik biomassa berdasarkan sifat-sifat fisik dan termokimia.

a. Analisis Proximate

Analisis proksimat (*proximate analysis*) adalah metode untuk mengetahui komponen penyusun bahan bakar padat dari biomassa meliputi kandungan air bawaan, kandungan abu, dan zat terbang dan karbon tetap. Analisis *proximate* juga dapat digunakan untuk menentukan komponen utama dari biomassa, seperti kadar lipid dan protein. Jenis biomassa terkait kapasitas penyimpanan, kandungan energi, dinilai berdasarkan analisis *proximate* ini [19].

b. Analisis Ultimate

Analisis ultimat (*ultimate analysis*) untuk mengetahui elemen organik penyusun bahan bakar padat dengan parameter kandungan/unsur menyatakan komposisi biomassa dalam persentase karbon, hidrogen, nitrogen, oksigen, dan sulfur dalam bentuk unsur. Gambar 2.5 menunjukkan kondisi ideal berbagai bahan yang disajikan dalam diagram perbandingan antara unsur karbon (C) dengan hidrogen (H/C) dan oksigen (O/C). Rincian kisaran perbandingan tersebut disajikan pada Tabel 1.2.



Gambar 2.5. Diagram Kreven kisaran nilai O/C dan H/C dari berbagai bahan dan biomassa

Tabel 1.2. Perbandingan nilai O/C dan H/C dari berbagai bahan

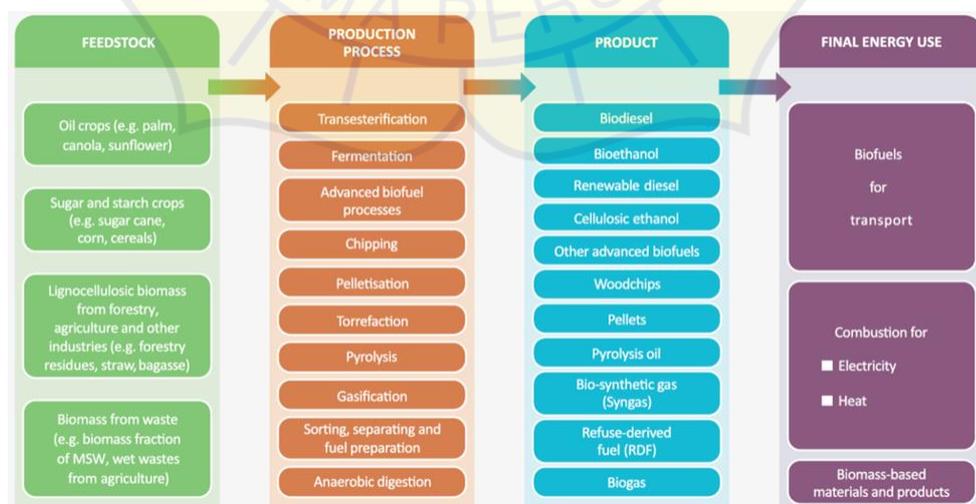
Tipe Material	O/C		H/C	
Biomass	0,35	0,85	1,20	1,70
Peat	0,30	0,50	0,98	1,50
Lignite	0,20	0,36	0,78	1,24
Coal	0,10	0,25	0,39	0,98
Anthracite	0,00	0,02	0,00	0,40

a. Kalori Biomassa

Kalori biomassa merupakan besaran energi yang tersimpan dalam biomassa yang dinyatakan kilo Joule/kg atau Mega Joule per kg (MJ/Kg). Metode pengukuran nilai kalori biomassa umumnya menggunakan Calori bom meter. Metode lain menggunakan pendekatan prediksi dengan memanfaatkan data dari analisis proximate dan ultimate.

b. Teknologi Konversi

Pengubahan biomassa dari bahan baku (*feedstock*) menjadi produk yang dapat dimanfaatkan kandungannya melalui proses konversi dan pemilihan tipe produk yang akan dicapai (Gambar 2.6). Proses-proses yang terlibat dalam konversi biomassa menjadi energi umumnya diklasifikasikan sebagai berikut: konversi termo-kimia; konversi biokimia; konversi fisika-kimia.



Gambar 2.6. Proses konversi biomassa menjadi produk bioenergi dan pemanfaatannya.

c. **Prediksi Kandungan Energi Biomassa**

Karakteristik biomassa dengan kandungan energinya sangat terkait karena rangkaian unsur-unsur yang menjadi penyusun biomassa seperti unsur C, H, O, N, dan S memiliki kandungan energi. Perbedaan komposisi unsur tersebut yang memberikan dampak terjadinya perbedaan kandungan energi pada setiap sumber bahan baku biomassa. Pada kondisi ideal dimana faktor biaya bukan menjadi faktor pembatas maka semua unsur-unsur penyusun biomassa dan kandungan energi dapat diketahui melalui pengujian laboratorium. Namun demikian, terkadang biaya menjadi faktor pembatas dalam analisis tersebut yang berdampak pada ketiadaan informasi kandungan energi biomassa. Menghadapi kondisi seperti ini diperlukan pendekatan empiris dengan menggunakan persamaan-persamaan matematis yang dihasilkan dari berbagai penelitian sebelumnya.

Serangkaian hasil penelitian yang mengkaji hubungan antara kandungan energi (HHV-*Higher Heating Value*) berdasarkan besaran dan komposisi unsur biomassa seperti karbon, hidrogen, dan oksigen akan disajikan pada bagian ini. Berdasarkan riset Özyüğüran & Yaman, (2017), prediksi HHV untuk kumpulan sampel lengkap menemukan perbedaan dari HHV eksperimental dan r^2 (*coefficient of determination*) persamaan ini bervariasi dalam kisaran 0,812-0,837, sedangkan standar penyimpangannya antara 1,469 dan 1,493 MJ/kg. Namun demikian, mengingat jumlah spesies biomassa yang digunakan dalam penelitian ini dan perbedaan sifat-sifatnya, standar deviasi ini mungkin dianggap dalam batas yang dapat diterima.

Dalam studi kandungan karbon, hidrogen, oksigen, dan nilai kalor lebih tinggi (HHV) dari biomassa yang telah dilakukan perlakuan torefikasi (*torrefied*), berdasarkan hasil analisis *proximate* (nilai karbon tetap, bahan mudah menguap, dan abu) dari biomassa mentah akan mengalami perubahan berdasarkan kondisi suhu dan waktu percobaan. Dua puluh tujuh spesies biomassa berbeda yang mewakili beragam bahan biomassa seperti biomassa herba dan kayu, kulit kacang, batu buah, batang dan sekam, pulp, dan residu pertanian telah dikarakterisasi dengan analisis *proximate*. Berbagai persamaan empiris yang mengandung istilah *linier* dan *nonlinier* telah diuji untuk memprediksi nilai kalor (HHV) yang lebih

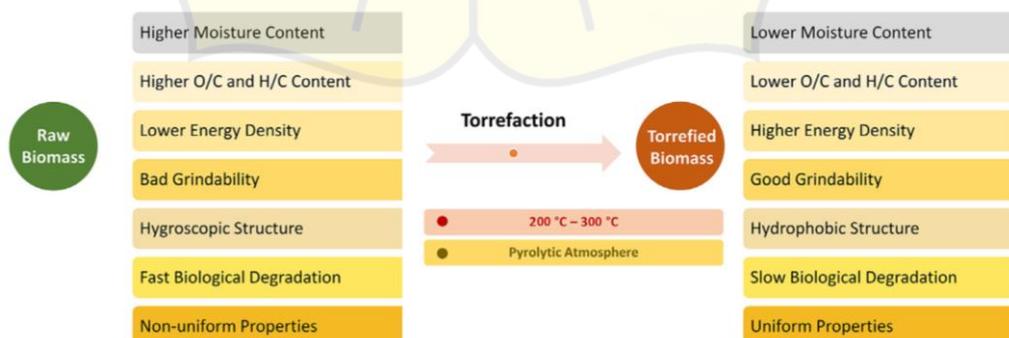
tinggi dari kumpulan sampel lengkap (Tabel 1.3). Kajian ini menggunakan bahan baku biomassa dan produk yang dihasilkan melalui proses torefaksi (Gambar 2.7).

Tabel 1.3. Persamaan untuk prediksi HHV berdasarkan kandungan unsur biomassa

Eq. No	Equation	r ²	St. dev. (MJ/kg)
1	$HHV=167.2-1.449VM-1.562FC-1.846A$	0.827	1.483
2	$HHV=-17.507+0.3985VM+0.2875FC$	0.826	1.484
3	$HHV=22.3418-0.1136FC-0.3983A$	0.827	1.482
4	$HHV=10.982+0.1136VM-0.2848A$	0.827	1.482
5	$HHV=-18.37-0,8469FC-1,1251A+\frac{4420}{VM}$	0.837	1.493
6	$HHV=44.336+0.286FC-\frac{2394.7}{VM}$	0.812	1.469
7	$HHV=28.296-0.2887A-\frac{656.2}{VM}$	0.823	1.479
8	$HHV=18.297-0.4128A+\frac{35.8}{FC}$	0.832	1.487

Sumber: [20]

Istilah yang digunakan adalah: HHV (Higher Heating Value), FC (Fixed karbon), VM (Volatile matter), A (Ash),



Gambar 2.7. Karakteristik biomassa dan hasil produknya.

Sumber: [20]

Dua korelasi empiris baru berdasarkan analisis *proximate* dan akhir biomassa yang digunakan untuk prediksi nilai kalor lebih tinggi (HHV) disajikan dalam penelitian ini. Korelasi dikembangkan melalui metode regresi linier bertahap dengan menggunakan data sampel biomassa (dari literatur terbuka) yang berasal dari beragam dan diperoleh dari lokasi geografis berbeda. Korelasi tersebut telah divalidasi melalui penggabungan data biomassa tambahan. Korelasi berdasarkan analisis ultimat ($HHV = 0,2949C + 0,8250H$) memiliki *mean absolute error* (MAE) lebih rendah dari 5% dan *marginal mean bias error* (MBE) hanya sebesar 0,57% yang menunjukkan memiliki kemampuan prediksi HHV yang baik. Korelasi lain yang berdasarkan analisis *proximate* ($HHV = 0,1905VM + 0,2521FC$) adalah korelasi pendamping yang berguna dengan MBE absolut yang rendah (0,67%). Akurasi prediksi HHV dari 12 korelasi lain yang diperkenalkan oleh peneliti lain juga dibandingkan dalam penelitian ini.[21]

Sebuah model prediksi sederhana, berdasarkan analisis utama biomassa yang dimanfaatkan untuk memprediksi nilai kalor yang lebih tinggi (HHV). Dalam literatur ada dua fakta yang menjadi dasar penelitian salah satunya adalah kandungan oksigen (O) yang tidak akurat dalam penghitungan derajat reduktansi serta panas pembakaran per unit oksigen yang dikonsumsi biomassa, sehingga penentuan HHV menjadi tidak akurat juga. Alasan lainnya adalah bahwa variabel O tidak berkontribusi terhadap interpretasi fisik HHV secara keseluruhan dari perspektif matematika (nilai p), dan oleh karena itu, tingkat reduktansi biomassa yang dimodifikasi disajikan, sedangkan kandungan O diabaikan. Berdasarkan tingkat reduktansi yang dimodifikasi, HHV per gram oksigen yang dikonsumsi oleh satu biomassa diidentifikasi hampir konstan. Dengan demikian, dua model prediksi teoritis untuk biomassa dengan dan tanpa sulfat ($HHV' = 873.52(C/3 + H + S/8)$, $HHV'' = 874.08(C/3 + H)$) telah ditetapkan. Perbandingan antara *mean absolute error* (MAE) metode Thornton dan 15 korelasi empiris yang baru-baru ini dibuat menunjukkan bahwa MAE dari kedua model prediksi adalah yang paling kecil, yang menjadi bukti kuat atas kemampuan prediksi HHV yang baik dari kedua model terletak pada kemudahannya dan juga pada kualitas pengoperasian. Selain itu, nilai koefisien kedua model hampir sama, yang menunjukkan bahwa kandungan

S juga memiliki pengaruh yang dapat diabaikan terhadap HHV. Model terakhir yang diusulkan adalah model 2 ($HHV'' = 874.08(C/3 + H)$) [22].

Setelah ditemukannya api, biomassa menjadi sumber energi utama yang digunakan umat manusia. Masyarakat maju sebagian besar telah menggantikan penggunaan biomassa dengan penggunaan bahan bakar fosil, namun ketergantungan pada sumber daya yang semakin langka ini, ditambah kebutuhan untuk mengurangi emisi CO₂ dalam menghadapi perubahan iklim, memaksa kita untuk menggunakan sumber energi terbarukan, termasuk energi terbarukan biomassa. Eksploitasi sumber daya ini seringkali mengharuskan nilai kalornya diketahui. Hal ini dapat ditentukan secara langsung (walaupun tidak murah) atau dengan menggunakan model yang dapat memprediksi dengan menggunakan sejumlah variabel yang mudah ditentukan dan ekonomis. Tinjauan kali ini mengumpulkan model-model terbaru untuk memprediksi nilai kalor biomassa, menilai bidang penerapannya, dan menyoroti kesalahan-kesalahan yang terjadi dalam formulasi, transkripsi, dan referensi yang dibuat untuk model-model tersebut. Model yang berbeda mengandalkan analisis unsur, proksimal, struktur, fisika dan kimia untuk menentukan nilai variabel yang diperlukan, meskipun model yang mengandalkan hasil dari dua jenis analisis pertama adalah yang paling populer. Model yang paling sederhana dan memiliki jangkauan penerapan terluas adalah model yang paling sering dijadikan acuan dalam literatur. Frekuensi informasi penting yang diabaikan dalam beberapa penelitian, yang menyebabkan kesalahan dalam pengungkapan yang disajikan, serta kesalahan transkripsi dan referensi, menunjukkan bahwa penelitian di masa depan harus dilakukan dengan lebih teliti [23].

Pohon regresi yang ditingkatkan *gradient boosted regression trees* (GBRT) untuk prediksi nilai kalor lebih tinggi (HHV) biomassa berdasarkan komponen analisis *proximate* telah dikembangkan. Kesimpulan utama dapat diambil sebagai berikut:

1. Bahan mudah menguap (VM), karbon tetap (FC), dan kadar abu mempunyai pengaruh langsung terhadap semakin tinggi nilai kalor biomassa lignoselulosa.

2. HHV eksperimental yang diperoleh dari 511 biomassa lignoselulosa diterapkan secara gradien model yang ditingkatkan untuk memprediksi biomassa HHV.
3. Model GBRT-5 terbukti menunjukkan performa terbaik dengan kecepatan pembelajaran 0,1, ukuran pohon sebesar tiga node, dan stokastisitas 0,65 pada jumlah 300 iterasi pohon.
4. Rata-rata kesalahan persentase absolut (MAPE), kesalahan akar rata-rata kuadrat (RMSE), dan koefisien determinasi (R²) model GBRT yang dikembangkan adalah 3,783%, 0,946, dan 0,93, masing-masing yang mewakili model prediksi dengan presisi sangat tinggi.
5. Faktor relevansi menunjukkan bahwa karbon tetap mempunyai dampak terbesar terhadap biomassa bahan HHV [24].

Tinjauan kali ini mengumpulkan model-model terbaru untuk memprediksi nilai kalor biomassa, menilai bidang penerapannya, dan menyoroti kesalahan-kesalahan yang terjadi dalam formulasi, transkripsi, dan referensi yang dibuat untuk model-model tersebut. Model yang berbeda mengandalkan analisis unsur, proksimal, struktur, fisika dan kimia untuk menentukan nilai variabel yang diperlukan, meskipun model yang mengandalkan hasil dari dua jenis analisis pertama adalah yang paling populer. Model yang paling sederhana dan memiliki jangkauan penerapan terluas adalah model yang paling sering dijadikan acuan dalam literatur. Frekuensi informasi penting yang diabaikan dalam beberapa penelitian, yang menyebabkan kesalahan dalam pengungkapan yang disajikan, serta kesalahan transkripsi dan referensi, menunjukkan bahwa penelitian di masa depan harus dilakukan dengan lebih teliti [23].

d. Pemanfaatan Biomassa

Pemanfaatan biomassa secara sederhana, dapat dibagi menjadi dua kelompok yaitu pemanfaatan secara tradisional dan pemanfaatan secara modern. Pengelompokan ini mempertimbangkan keterlibatan sistem dan teknologi pada saat penggunaan biomassa. Rincian penjelasan pemanfaatan biomassa sebagai berikut:

2.9.1. Pemanfaatan Biomassa Tradisional

Secara tradisional, biomassa hanya dibakar dan memanfaatkan panasnya untuk memasak makanan atau minuman atau penghangat ruangan. Keterlibatan sistem dan teknologi belum digunakan sehingga penggunaan biomassa pada tahapan ini belum efisien bahkan berdampak pada kesehatan manusia karena terjadi polusi udara. Penggunaan biomassa secara tradisional dengan hanya pembakaran umumnya terjadi di pedesaan dimana warga masyarakat memanfaatkan kayu bakar untuk memasak dan merebus air.

2.9.2. Pemanfaatan Biomassa Modern

Pada kelompok ini, pemanfaatan biomassa sudah memanfaatkan sistem dan teknologi sehingga biomassa mampu menghasilkan listrik, panas, dan beragam aplikasinya. Penggunaan biomassa secara modern dapat dibagi menjadi empat kategori utama: - Bahan kimia seperti metanol, pupuk, dan serat sintetis; - Energi seperti panas; - listrik; - Bahan bakar transportasi seperti bensin dan solar. Hanya energi biomassa dari energi terbarukan (matahari, angin, panas bumi, hidro, dan kelautan) yang mengubah bentuk energinya dalam wujud cair, gas dan padat.

Peralihan dari bahan bakar fosil tak terbarukan ke biomassa terbarukan sebagai bahan baku bahan bakar pada akan memberikan berbagai manfaat ekonomi, lingkungan, dan sosial: (i) pasokan bahan baku yang lebih stabil dan aman, (ii) pengurangan jejak karbon bahan bakar yang bermanfaat bagi lingkungan, dan (iii) ekonomi pertanian yang lebih stabil dan menguntungkan. Menariknya, ketiga pendorong utama ekonomi berbasis bio ini merupakan tiga pilar keberlanjutan: profitabilitas, planet, dan manusia. Manfaat tambahannya adalah bahwa banyak produk yang ada akan digantikan oleh alternatif yang secara *inheren* lebih aman dan memiliki jejak lingkungan yang lebih sedikit, misalnya, polimer yang biokompatibel dan dapat terurai secara hayati. (Sheldon, 2011).

Prosedur analisis biomassa standar yang dikembangkan oleh *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) dan *American Society for Testing and Materials* (ASTM) telah dirangkum. Sebelum pengujian laboratorium, beberapa metode pengujian diselidiki untuk memahami lebih lanjut tentang sampel biomassa [25].

1. Persiapan sampel untuk analisis komposisi
2. Penentuan karbohidrat struktural dan biomassa lignin
3. Penentuan abu dalam biomassa
4. Pengukuran aktivitas selulosa
5. Penentuan konsentrasi etanol dalam biomassa
6. Metode pengujian untuk kelembaban
7. Penentuan gula dan produk sampingan
8. Penentuan pati dalam biomassa
9. Penentuan protein dalam biomassa.

e. Manfaat Penggunaan Biomassa

Berdasarkan kajian pustaka, dan artikel yang bersumber dari <https://greenerideal.com/guides/renewable-energy/biomass-powering-sustainable-future/>) pemanfaatan biomassa memberikan beberapa manfaat antara lain :

1. Pembakaran bahan tanaman melepaskan karbon dioksida, yang diimbangi oleh karbon dioksida yang diserap oleh tanaman selama pertumbuhannya. Akibatnya, biomassa dianggap sebagai sumber energi netral karbon. Karbon netral yang berarti tidak melepaskan gas rumah kaca tambahan ke atmosfer.
2. Biomassa dapat digunakan untuk menghasilkan listrik, panas, dan bahan bakar transportasi.
3. Pembangkit listrik tenaga biomassa relatif efisien dan memiliki emisi yang rendah jika dilakukan dengan benar. Pembangkit listrik ini telah dibangun di banyak negara di seluruh dunia, menyediakan sumber energi terbarukan yang dapat diandalkan.
4. Biomassa dapat ditanam di lahan marjinal, menjadikannya sumber energi yang ideal untuk masyarakat pedesaan.
5. Industri energi berbasis biomassa menciptakan lapangan kerja dan membantu meningkatkan ekonomi lokal.
6. Biomassa dapat menghasilkan bahan bakar nabati, yang dapat digunakan dalam aplikasi transportasi seperti mobil dan pesawat.

Bahan bakar nabati menghasilkan emisi yang lebih rendah daripada bahan bakar fosil, sehingga ramah lingkungan.

7. Bahan bakar ini serbaguna dan mudah diperoleh dari berbagai jenis tanaman dan produk limbah organik. Hal ini menjadikannya sumber energi terbarukan yang ideal yang mudah disesuaikan dengan kebutuhan dan wilayah geografis tertentu.

f. Keuntungan dan Kerugian Pemanfaatan Biomassa

Pemanfaatan biomassa bukan hanya memberikan keuntungan tetapi juga terdapat kerugian. Berdasarkan Tabel 1.4 Vassile et al., (2010) telah mengidentifikasi keuntungan dan kerugian dai pemanfaatan biomassa. Namun demikian, para peneliti telah banyak memberikan solusi untuk mengatasi kerugian yang ditimbulkan sehingga keuntungan pemanfaatan biomassa lebih mendominasi.

Tabel 1.4. Identifikasi keuntungan dan kekurangan dalam pemanfaatan biomassa menjadi bioenergi

No	Keuntungan	Kekurangan
1	Sumber energi terbarukan untuk biomassa alami	Sumber daya energi terbarukan yang tidak lengkap untuk bahan bakar biomassa sehubungan dengan penilaian siklus hidup yang lengkap
2	Konversi netral CO ₂ dan manfaat perubahan iklim	Ketiadaan terminologi, sistem klasifikasi, dan standar yang diterima di seluruh dunia
3	Kandungan abu, C, S, N, dan elemen jejak yang umumnya rendah	Kurangnya pengetahuan dan variabilitas komposisi, sifat dan kualitas
4	Biasanya konsentrasi tinggi dari bahan yang mudah menguap, Ca, H, Mg, O, dan P	Umumnya memiliki kandungan air, Cl, K, Na, Mn, dan beberapa elemen yang tinggi
5	Reaktivitas yang tinggi selama konversi	Kepadatan energi yang rendah
6	Mitigasi emisi berbahaya (CH ₄ , CO ₂ , NO _x , SO _x , elemen jejak) dan limbah yang dipisahkan	Potensi persaingan dengan produksi pangan dan pakan

No	Keuntungan	Kekurangan
7	Penangkapan beberapa komponen berbahaya oleh abu selama pembakaran	Kemungkinan kerusakan tanah dan hilangnya keanekaragaman hayati
8	Ketersediaan besar dan sumber daya yang relatif murah	Bau, potensi emisi dan pencucian komponen berbahaya selama pembuangan
9	Diversifikasi pasokan bahan bakar dan keamanan energi	Kemungkinan emisi berbahaya selama perlakuan panas
10	Revitalisasi pedesaan dengan penciptaan lapangan kerja baru	Potensi masalah teknologi selama perlakuan panas
11	Potensi pemanfaatan lautan dan tanah berkualitas rendah, serta restorasi lahan terdegradasi	Ketersediaan regional
12	Pengurangan limbah yang mengandung biomassa	Biaya pengumpulan, pengangkutan, penyimpanan, dan pra-pengolahan yang besar
13	Sumber daya yang murah untuk produksi bahan penyerap, pupuk, pengapuran dan penetral, bahan bangunan, dan untuk beberapa sintesis atau pemulihan unsur dan senyawa tertentu	Pemanfaatan produk limbah yang tidak jelas

Sumber: [10]

g. Keberlanjutan Pengelolaan Biomassa

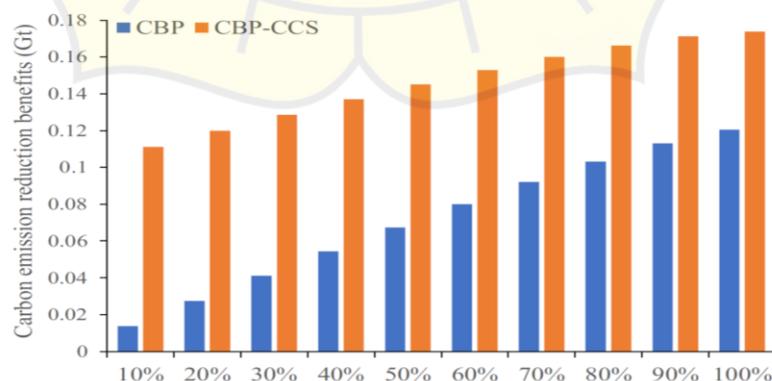
Sebagai tema yang sangat menarik perhatian masyarakat global di abad ke-21, keberlanjutan merupakan konsep yang kompleks. Pengembangan proses dan produk yang berkelanjutan merupakan pencarian yang terus menerus dalam dunia teknologi yang dapat menjadi barang yang lebih bernilai. Mungkin definisi yang paling sesuai berasal dari Komisi Dunia PBB untuk Lingkungan dan Pembangunan: "Pembangunan berkelanjutan adalah pembangunan yang memenuhi kebutuhan saat ini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang untuk memenuhi kebutuhan mereka sendiri". Artinya, keberlanjutan melihat masa depan sumber daya dan kualitas hidup kita melalui strategi yang cerdas, yang melibatkan 17 Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDG). SDGs ini digambarkan pada Gambar 10 (Vaz, 2020).

Tujuan 6 (air bersih dan sanitasi), 7 (energi bersih dan terjangkau), 9 (industri, inovasi, dan infrastruktur), 12 (konsumsi dan produksi yang bertanggung jawab), dan 13 (aksi iklim) sangat erat kaitannya dengan proses pengolahan biomassa dan pengolahan limbah serta residunya untuk mencapai rantai produktif yang dapat mengurangi dampak perubahan iklim berkelanjutan.



Gambar 2.8. Tujuh belas Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs) berdasarkan PBB [26].

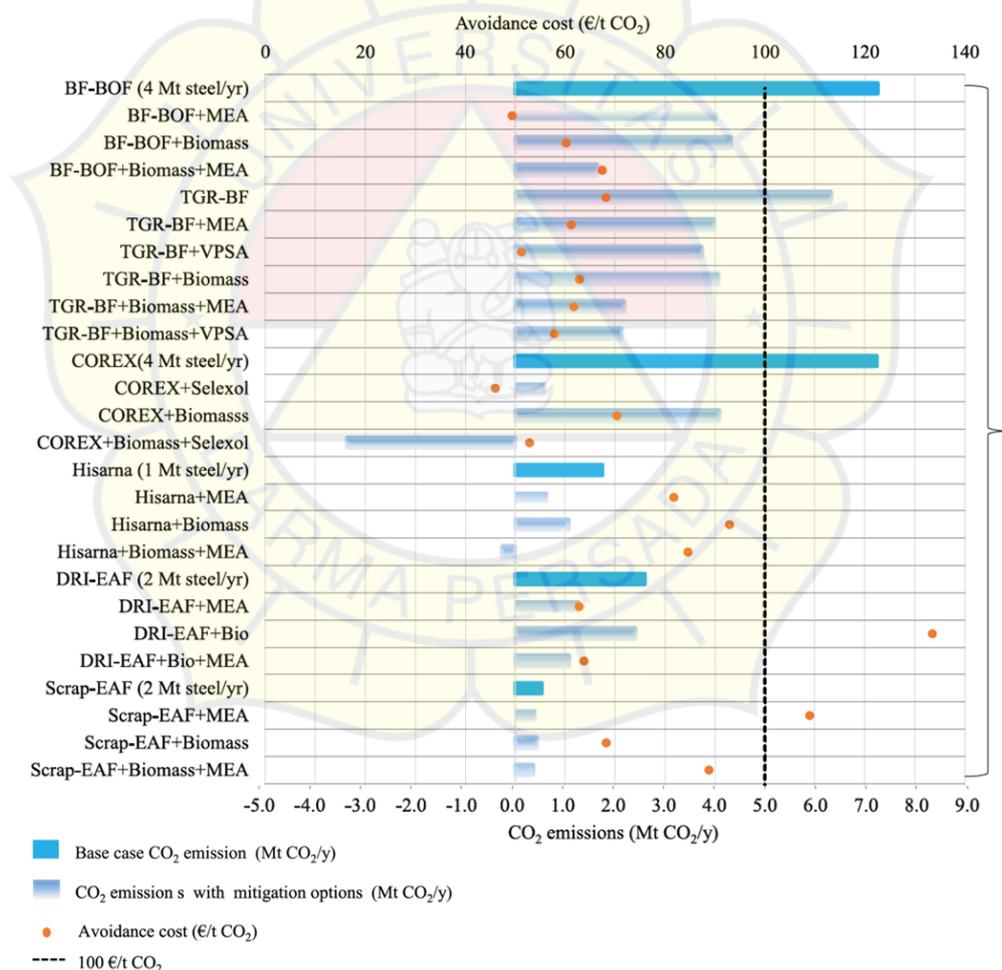
Manfaat pengurangan emisi karbon yang dicapai oleh *Coal and Biomass Power Plant* (CBP) dan *Coal and Biomass Power Plant With Carbon Capture and Storage* (CBP-CCS) dapat dilihat pada operasi power plant di Provinsi Hubei - Tiongkok yang tercatat melepaskan 3,3 miliar ton karbon pada tahun 2017. Dibandingkan dengan pembangkit listrik tenaga batubara, CBP dapat memperoleh manfaat pengurangan emisi karbon antara 13 dan 120 juta ton, sedangkan CBP-CCS dapat memperoleh manfaat antara 110 dan 170 juta ton (Gambar 2.9).



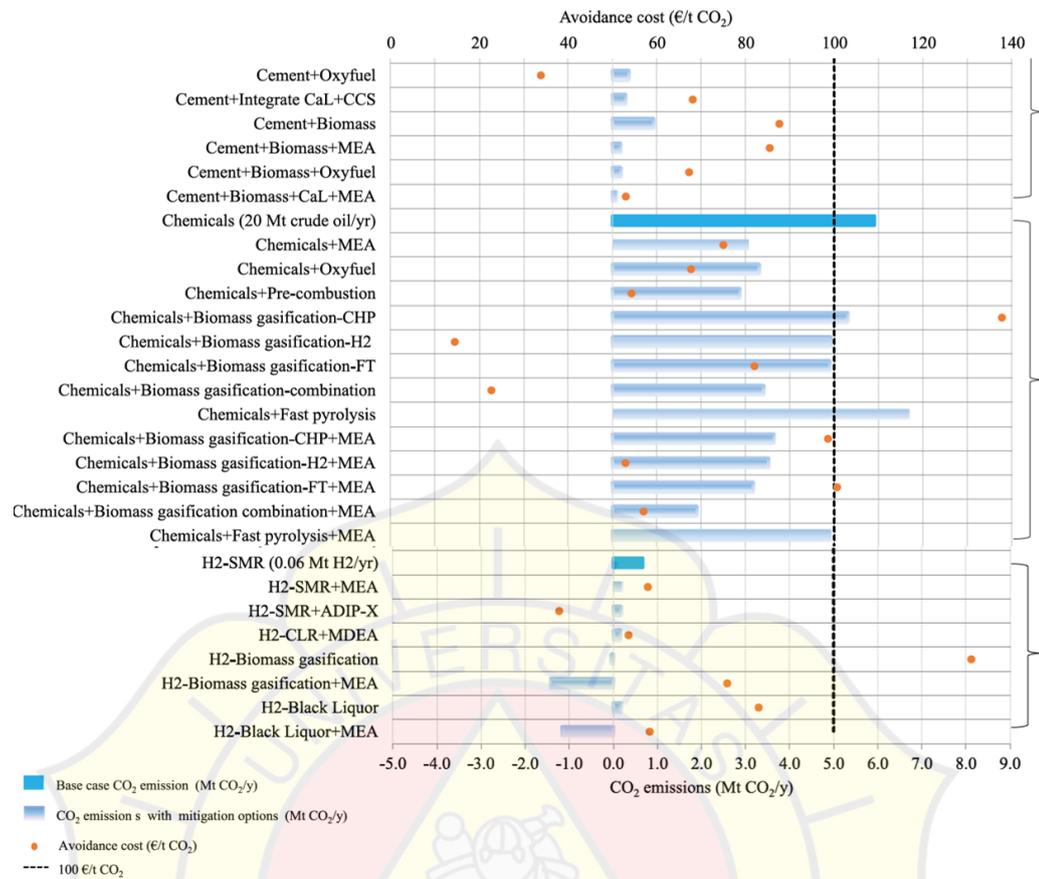
Sumber : [27]

Gambar 2.9. Histogram manfaat pengurangan emisi karbon di Provinsi Hubei, Tiongkok 2017

Selain pemanfaatan biomassa untuk *co-firing* biomassa dapat digunakan untuk upaya menghilangkan atau penghindaran (*avoidance*) biaya emisi CO₂ melalui harmonisasi investasi [28]. Dalam studi ini, status dan kinerja penerapan CCS dan/atau biomassa pada lima sub-sektor industri ditinjau dari intensitas CO₂ dan biaya penghindaran CO₂ yang diambil dari literatur menunjukkan variasi yang besar di antara sistem serupa. Gambar 2.10 menunjukkan pilihan mitigasi harmonisasi potensi pengurangan dan biaya penghindaran CO₂ pada industri besi dan baja. Sedangkan Gambar 2.11 menunjukkan pilihan mitigasi harmonisasi potensi pengurangan dan biaya penghindaran CO₂ pada industri semen, kimia, dan hidrogen.



Gambar 2.10. Harmonisasi potensi pengurangan dan biaya penghindaran CO₂ pada industri besi dan baja. Sumber : [28]



Gambar 2.11. Harmonisasi potensi pengurangan dan biaya penghindaran CO₂ pada industri semen, kimia, dan hidrogen. Sumber : [28]

h. Biomassa dan Nationally Determined Contribution

Teknologi pengolahan biomassa memainkan peran penting dalam produksi bioenergi, yang berpotensi mengurangi emisi karbon untuk mitigasi perubahan iklim. Meskipun ada tantangan yang harus diatasi dari segi investasi, potensi keuntungan dari penggunaan teknologi pengolahan biomassa untuk menghasilkan bioenergi sangat menjanjikan. Pengembangan teknologi serta kerangka kerja kebijakan yang tepat akan mendukung penggunaan bioenergi dan mempercepat transisi menuju masa depan energi yang lebih berkelanjutan.[29].

Isu pemanasan global menjadi perbincangan masyarakat dunia baik dari tingkat grass root sampai para pemimpin negara yang secara tegas menyatakan melalui berbagai event kenegaraan seperti KTT, COP, dan lain-lain. Indonesia telah meratifikasi perjanjian paris (Paris Agreement) dengan menerbitkan Undang-undang (UU) Nomor 16 Tahun 2016 tentang Pengesahan *Paris Agreement To The*

United Nations Framework Convention On Climate Change (Peretujuan Paris Atas Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa mengenai Perubahan Iklim). Peraturan ini melahirkan beberapa action seperti *Nationally Determined Contribution* (NDC) yang diperjelas dalam Tabel 1.5 berikut.

Tabel 1.5. Proyeksi Penurunan Emisi Berdsarkan BAU Setiap Sektor

No	Sector	GHG Emission Level 2010* Mton CO ₂ e	GHG Emission Level 2030 (Mton CO ₂ e)			GHG Emission Reduction (Mton CO ₂ e)				Annual Average Growth BAU (2010-2030)	Average Growth 2000-2012*
			BaU	CM1	CM2	%					
						CM1	CM2	CM1	CM2		
1	Energy*	453.2	1,669	1,355	1,271	314	398	11%	14%	6.7%	4.50%
2	Waste	88	296	285	270	11	26	0.38%	1%	6.3%	4.00%
3	IPPU	36	69.6	66.85	66.35	2.75	3.25	0.10%	0.11%	3.4%	0.10%
4	Agriculture	110.5	119.66	110.39	115.86	9	4	0.32%	0.13%	0.4%	1.30%
5	Forestry**	647	714	217	64	497	650	17.2%	23%	0.5%	2.70%
TOTAL		1,334	2,869	2,034	1,787	834	1,081	29%	38%	3.9%	3.20%

* Including fugitive
 Notes: **CM1** = Counter Measure (*unconditional mitigation scenario*)
CM2 = Counter Measure (*conditional mitigation scenario*)
 **Including peat fire

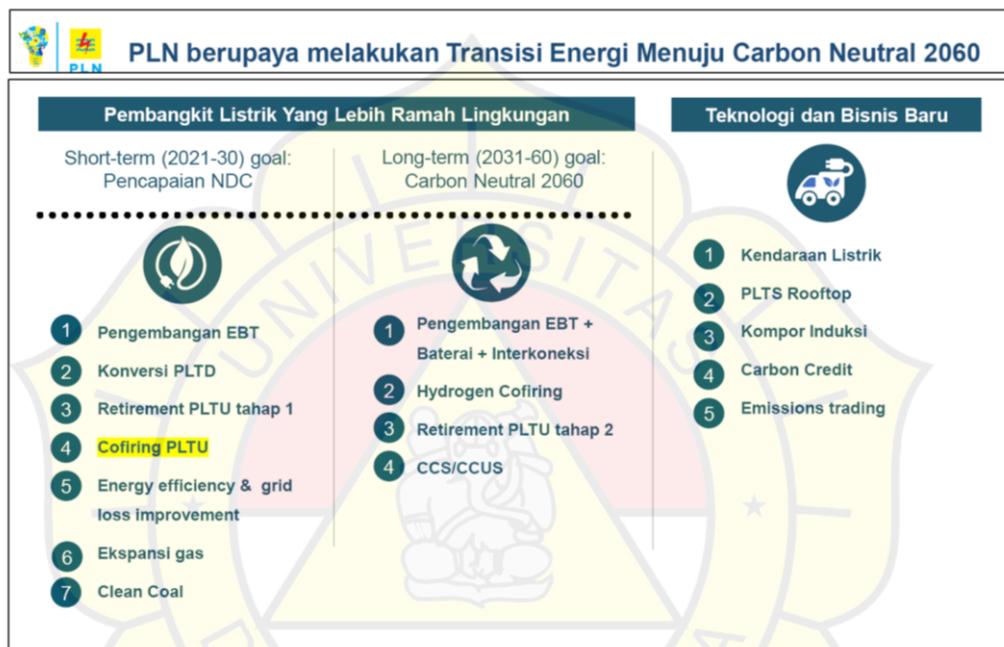
Berdasarkan Tabel di atas di sektor energi, Indonesia telah memulai kebijakan penggunaan bauran energi dan telah menetapkan pengembangan sumber energi ramah lingkungan sebagai arah kebijakan nasional. Secara kolektif, kebijakan-kebijakan ini pada akhirnya akan menempatkan Indonesia pada jalur dekarbonisasi. Peraturan Pemerintah No. 79/2014 tentang Kebijakan Energi Nasional menetapkan ambisi untuk melakukan transformasi pada tahun 2025 dan 2050, bauran pasokan energi primer dengan pembagian sebagai berikut:

- energi baru dan terbarukan minimal 23% pada tahun 2025 dan minimal 31% pada tahun 2050;
- minyak harus kurang dari 25% pada tahun 2025 dan kurang dari 20% pada tahun 2050;
- batubara minimal 30% pada tahun 2025 dan minimal 25% pada tahun 2050; dan
- gas minimal 22% pada tahun 2025 dan minimal 24% pada tahun 2050.

Biomassa dapat dipertimbangkan sebagai salah satu sumber energi yang menjanjikan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK). Ketentuan pemanfaatan bahan bakar biomassa sebagai campuran bahan bakar pada pembangkit listrik tenaga uap (*Co-firing*) diatur dalam Keputusan Menteri Energi

Dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2023 Tentang Pemanfaatan Bahan Bakar Biomassa Sebagai Campuran Bahan Bakar Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap. Penggunaan limbah biomassa sebagai bahan baku *co-firing* tidak saja berkontribusi dalam NDC dari sektor *energy* tetapi juga dari sektor *waste* dengan porsi seperti ditunjukkan dalam Tabel 1.5 di atas.

Adapun roadmap upaya PLN untuk melakukan transisi menuju carbon neutral 2060 seperti ditunjukkan dalam Gambar 2.12.



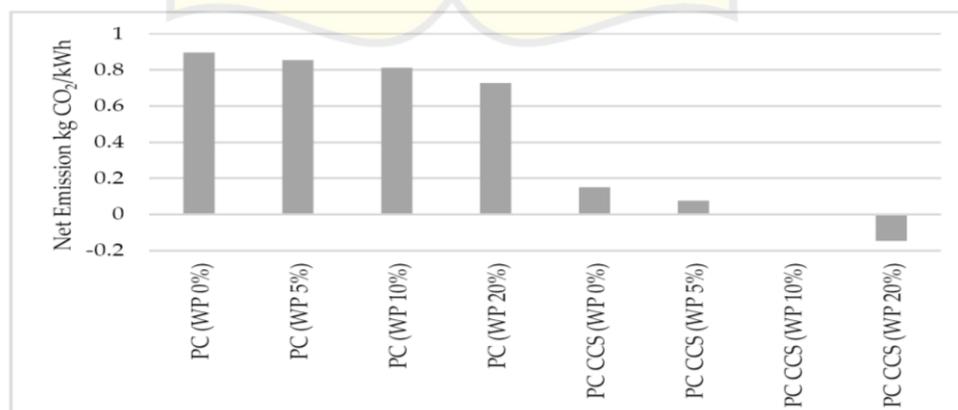
Sumber : [30]

Gambar 2.12. Peran PLN melakukan transisi energi menuju carbon neutral 2060

Untuk membakar biomassa seperti jenis tanaman energi diperlukan pengembangan teknologi yang efisien. Residu biomassa mungkin merupakan pilihan energi terbarukan terbaik (termurah dan berisiko paling rendah) bagi banyak produsen listrik [31]. Perilaku pembakaran secara signifikan tergantung pada kandungan kimia dan struktur fisik yang karakteristiknya perlu dikonsentrasikan dengan baik untuk mendapatkan solusi perbaikan lebih lanjut. Karakteristik dan sifat-sifat pembakaran bersama dapat diklasifikasikan sebagai berikut: nilai kalor, reaktivitas, kadar air, tingkat abu, komposisi, sifat penggilingan [25].

Pembakaran batubara dengan biomassa memiliki pengaruh yang besar terhadap tingkat emisi SO_x dan NO_x. Proses pengabuan, kualitas abu terbang tergantung pada teknologi konversi, teknologi penangkapan dan sifat-sifat biomassa. Untuk mengontrol efisiensi pembakaran informasi spesifik tentang sifat penyalaan partikel biomassa juga penting. Sejumlah percobaan skala kecil/laboratorium dan skala industri telah dilakukan oleh para peneliti yang berbeda. Studi eksperimental yang berbeda yang dilakukan ditinjau, dikelompokkan dan dirangkum berdasarkan teknologi pemrosesan bahan bakar, kinerja pembakaran, tingkat emisi, aspek lingkungan, informasi abu dan karakteristik deposit, efek rasio *co-firing* dan adopsi *co-firing* sebagai bahan bakar.

Secara keseluruhan, artikel dari Bhuiyan telah menyoroti teknologi yang ada dan trend yang muncul dalam pembakaran bersama berbagai jenis biomassa yang akan berguna untuk penyelidikan di masa depan [32]. Tantangan teknis utama yang terkait dengan pembakaran biomassa meliputi: 1. persiapan, penyimpanan, dan pengiriman bahan bakar; 2. pengendapan abu; 3. konversi bahan bakar; 4. pembentukan polutan; 5. Korosi; 6. pemanfaatan abu terbang; 7. dampak pada sistem SCR, dan 8. pembentukan aliran lurik [28]. Tren penerapan emisi CO₂ bersih dari pembangkit listrik Pulvirized Coal (PC) menurun secara progresif seiring dengan meningkatnya penggunaan bahan bakar biomassa. Pada tahap awal yang hanya menggunakan batu bara, emisi bersih CO₂ mencapai 0,896 kg/kWh. Penggunaan 5% wood pellet (WP) mengurangi angka ini menjadi 0,854 kg/kWh, 10% WP menurunkan menjadi 0,811 kg/kWh, dan dengan 20% WP emisi turun secara signifikan menjadi 0,727 kg/kWh [33].



Gambar 2.13. Emisi bersih CO₂ tanpa dan dengan perkuatan CCS pada PC.