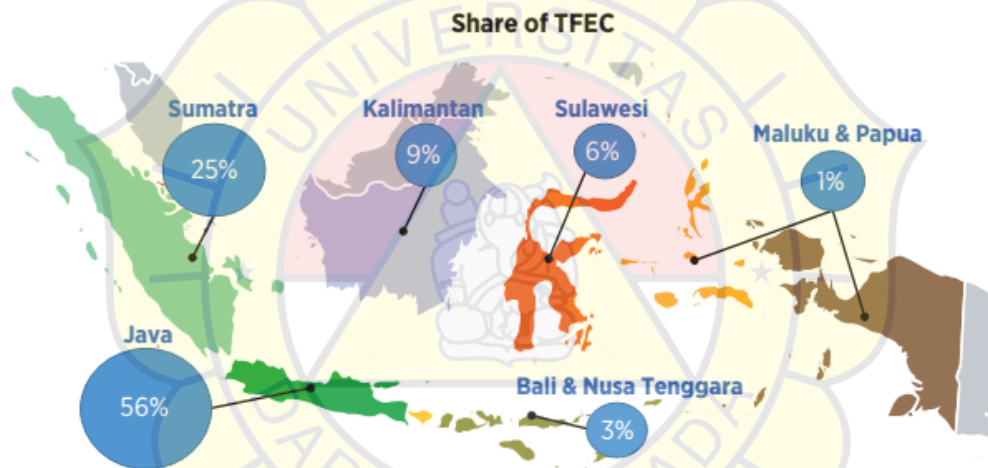


## BAB II

### PENGEMBANGAN ENERGI BIOMASSA LIMBAH KELAPA SAWIT

#### 2.1 Potensi dan Kebutuhan Energi Indonesia

Ilustrasi pada Gambar 2 berikut ini menunjukkan bahwa konsumsi energi final di Indonesia [25] tidak tersebar merata ke seluruh pelosok negara, namun sebagian besar masih terkonsentrasi di wilayah Indonesia bagian barat, khususnya Jawa (56%), Sumatera (25%) dan Kalimantan (9%). Itu artinya konsentrasi pertumbuhan ekonomi dan distribusi energi sebesar 90% masih berada di Indonesia Barat [26]. Hal itu tentu berpotensi menimbulkan ketimpangan pembangunan dan berdampak pada pemerataan kemakmuran bagi seluruh rakyat di semua wilayah dari barat ke timur [27].



Gambar 2. Persebaran Total Konsumsi Energi Final di Indonesia

Sumber: [26]

Sumber daya biomassa Indonesia terutama berasal dari sektor kehutanan, perkebunan, tanaman pertanian, dan limbah perumahan perkotaan. Dari tanaman perkebunan, salah satu sumber biomassa yang paling penting adalah perkebunan kelapa sawit (*Elaeis guenensis*). Indonesia merupakan negara penghasil minyak sawit terbesar di dunia bersama Malaysia [28]. Luas dan produksi kelapa sawit di Indonesia terus berkembang, mewakili 18% produksi dunia [29]. Industri kelapa sawit Indonesia terus berkembang pesat dengan menggunakan pabrik-pabrik besar yang menghasilkan ratusan ton limbah sepanjang tahun [30]. Peluang besar ada di Indonesia dan negara-negara lain yang memproduksi biofuel, uap, dan listrik dalam jumlah besar dari sisa biomassa sekaligus mengurangi dampak lingkungan baik lokal maupun global [31].

### 2.1.1 Potensi Energi Primer

Cadangan terbukti minyak bumi Indonesia terus menurun dari 5,9 miliar barel pada tahun 1995 menjadi 3,7 miliar barel pada akhir tahun 2020 [18]. Dengan tingkat produksi minyak bumi saat ini dan tidak ditemukannya cadangan minyak bumi baru, maka cadangan terbukti minyak bumi Indonesia akan habis. dalam 11 tahun berikutnya [3]. Potensi cadangan gas alam sedikit meningkat, namun cadangan terbukti terus menurun. Dengan kondisi cadangan dan produksi saat ini, diperkirakan gas alam akan habis dalam waktu 36 tahun ke depan [32].

Tabel 1. Potensi Energi Terbarukan di Indonesia

Potensi Energi Terbarukan di Indonesia

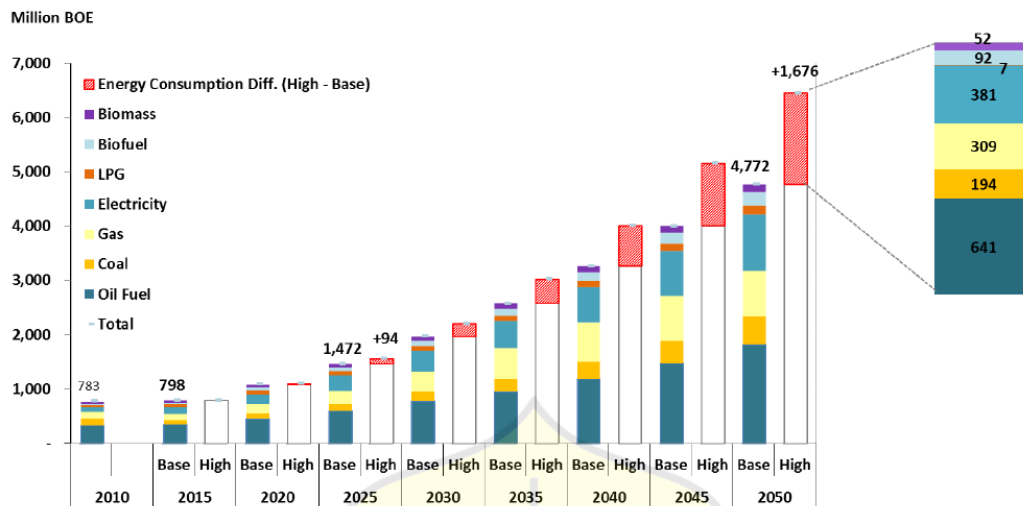
No.	Jenis Energi	Potensi	Kapasitas Terpasang	Pemanfaatan
1	Panas Bumi	29.544 MW	1.438,5 MW	4,9 %
2	Air	75.091 MW	4.826,7 MW	6,4 %
3	Mini & Mikro Hidro	19.385 MW	197,4 MW	1,0 %
4	Bioenergi	32.654 MW	1.671,0 MW	5,1 %
5	Surya	207.898 MW (4,80 kWh/m <sup>2</sup> /day)	78,5 MW	0,04%
6	Angin	60.647 MW (≥ 4 m/s)	3,1 MW	0,01%
7	Laut	17.989 MW	0,3 MW	0,002%
Total		443.208 MW	8.215,5	1,9%

Sumber: [5]

Pemanfaatan EBT baru mencapai sekitar 2% dari total potensi EBT yang ada [6]. Potensi tersebut menjadi dasar rencana pengembangan EBT minimal 23% dari total bauran energi primer pada tahun 2025 dan minimal 31% dari total bauran energi primer pada tahun 2050 [18].

### 2.1.2 Kebutuhan Energi Primer

Konsumsi energi final terus meningkat seiring dengan pertumbuhan ekonomi, jumlah penduduk, harga energi dan kebijakan yang ditetapkan pemerintah [26]. Konsumsi energi final selama tahun 2015-2020 mengalami peningkatan yang relatif terbatas yaitu sekitar 1,3% per tahun [18]. Kebijakan yang diambil pemerintah di bidang energi antara lain konversi minyak tanah ke LPG (Liquified Petroleum Gas) untuk sektor rumah tangga, penggunaan bahan bakar gas bumi (BBG) untuk sektor transportasi, kewajiban penggunaan bahan bakar nabati (BBN), subsidi listrik terbatas untuk konsumen tertentu, penghapusan subsidi premium, dan subsidi terbatas untuk minyak solar [33].



Gambar 3. Konsumsi Energi Final Indonesia

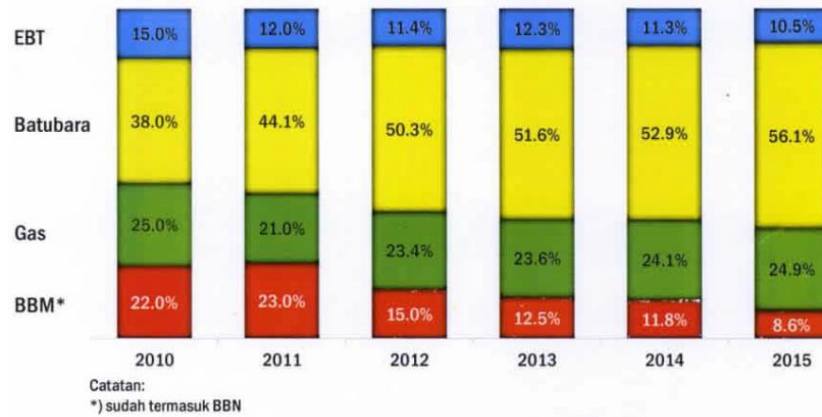
Sumber: [5]

Pada tahun 2017 [5], pangsa terbesar konsumsi energi final adalah sektor rumah tangga (35%) diikuti oleh sektor transportasi (31%), industri (29%), komersial (4%) dan lain-lain (2%). Selama periode 2012-2017, sektor transportasi mengalami pertumbuhan terbesar yaitu mencapai 5,2% per tahun, disusul sektor rumah tangga (3,8%), dan sektor komersial (2,9%). Sedangkan pertumbuhan sektor industri dan sektor lainnya mengalami penurunan masing-masing sebesar 4,6% dan 10%.

### 2.1.3 Bauran Energi Indonesia

Potensi energi terbarukan (EBT) [6] seperti energi panas bumi, air, bioenergi, sinar matahari dan angin (bayu) sangat melimpah di Indonesia. Kawasan hutan Indonesia seluas 120 juta hektar, selain berfungsi sebagai sumber daya alam dan penyangga kehidupan, juga mempunyai potensi sumber biomassa, energi air, dan energi panas bumi yang sangat besar [34]. Pada tahun 2020, porsi energi fosil dalam bauran energi nasional sebesar 95%, sedangkan EBT hanya sebesar 5%, seperti terlihat pada Gambar 4 [35] di bawah ini.

Pada tahun 2017 [5], porsi EBT dalam bauran energi nasional sektor ketenagalistrikan juga masih rendah yaitu 10,5% dari total produksi. Penggunaan energi pada pembangkit listrik sebagian besar adalah batu bara sebesar 56,1%, disusul gas alam sebesar 24,9%, dan bahan bakar sebesar 8,6% seperti terlihat pada Gambar 4 [5].



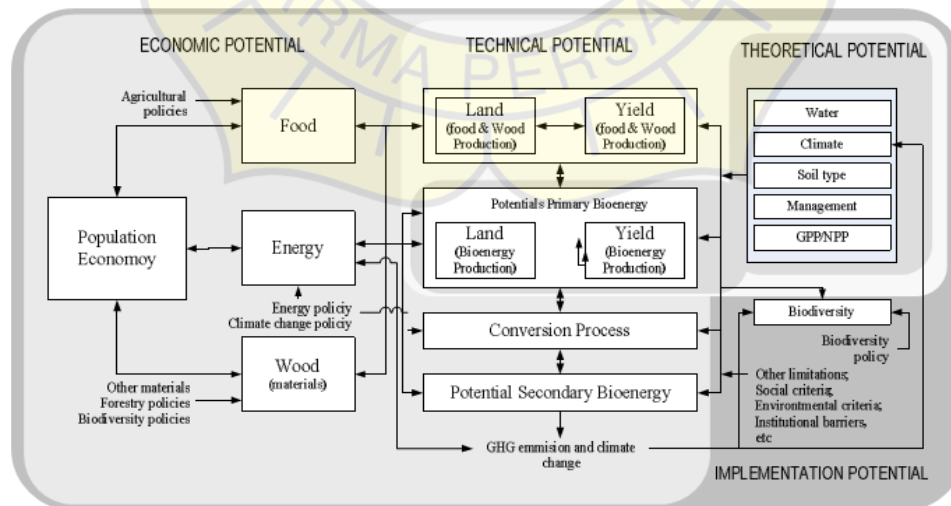
Gambar 4. Porsi EBT di Sektor Kelistrikan

Sumber: [5]

Target bauran energi tersebut merupakan realisasi dari prioritas pengembangan energi yang tertuang dalam KEN (Kebijakan Energi Nasional). Prioritasnya adalah memaksimalkan penggunaan energi terbarukan, sehingga porsi EBT minimal 23% pada tahun 2025 dan minimal 31% pada tahun 2050 [36]. Sedangkan untuk minyak bumi, KEN mengamanatkan untuk meminimalkan penggunaannya, sehingga porsi minyak bumi paling banyak 25% pada tahun 2025 dan paling banyak 20% pada tahun 2050 [37].

## 2.2 Potensi Biomassa dari Limbah Kelapa Sawit di Indonesia

*Biomass Energy Europe* [38] mengklasifikasikan lima jenis potensi sumber energi biomassa yaitu potensi teoritis, potensi teknis, potensi ekonomis, implementasi, dan implementasi berkelanjutan (*sustainable implementation*) seperti pada Gambar 5 berikut ini.



Gambar 5. Jenis Potensi Biomassa

Sumber: [39]

Sumber energi terbarukan lebih banyak dibandingkan bahan bakar fosil, namun belum dimanfaatkan secara optimal. Energi terbarukan seperti biomassa, hidrogen, air, panas bumi masih dianggap sebagai energi alternatif, dimana pemanfaatannya hanya mencapai 5% dari total bauran energi nasional [35]. Salah satu sumber energi terbarukan yang mempunyai potensi di Indonesia adalah biomassa, yaitu bahan organik yang dihasilkan melalui proses fotosintesis, baik berupa produk maupun limbah [34]. Contoh biomassa antara lain tumbuhan, pohon, rumput, ubi jalar, limbah pertanian dan limbah hutan, kotoran dan kotoran ternak [40]. Di sektor energi, biomassa mengacu pada bahan biologis hidup atau mati yang dapat digunakan sebagai sumber bahan bakar pembangkit listrik dan non-listrik [41].

### 2.2.1 Biomassa dari Limbah Kelapa Sawit di Indonesia

Sebagai negara agraris, Indonesia mempunyai potensi bahan bakar biomassa dari hasil pertanian serta limbah dari industri pertanian yang cukup besar [42]. Berikut data potensi biomassa yang dapat dimanfaatkan untuk bahan bakar pembangkit listrik di Indonesia [43] sebagaimana pada Gambar 6.



Gambar 6. Beberapa Contoh Material Limbah Pertanian

Sumber: [34]

Salah satu komoditas pertanian yang menghasilkan limbah dalam jumlah besar adalah kelapa sawit [19]. Limbah kelapa sawit merupakan sisa-sisa hasil proses budidaya tanaman kelapa sawit, industri pengolahan kelapa sawit (PKS) menjadi CPO (*Crude Palm Oil*), serta pengolahan bagian inti menjadi minyak inti sawit yang disebut dengan PKO (*Palm Kernel Oil*) [23]. Sebagai penghasil minyak sawit terbesar di dunia, tentunya potensi limbah sawit Indonesia juga sangat besar. Secara umum buah kelapa sawit terdiri dari kulit terluar, serabut, cangkang, dan inti (inti sawit) [44]. Secara umum terdapat 3 (tiga) kategori limbah kelapa sawit [45], sebagai berikut:

- 1) Limbah padat yang merupakan limbah yang paling banyak, yaitu sekitar 35-40% dari total Tandan Buah Segar (TBS) yang diolah dalam bentuk tandan buah kosong, serat, cangkang buah, abu bakar dan bungkil sawit.
- 2) Limbah cair dihasilkan dari sisa proses pembuatan minyak kelapa sawit berbentuk cair yang disebut *Palm Oil Mills Effluent* (POME) yang dapat diolah menjadi energi dan dimanfaatkan untuk memasok listrik.
- 3) Limbah gas berasal dari gas buangan pabrik kelapa sawit pada proses produksi CPO yang menghasilkan gas Metana sebagai energi dan dapat menghasilkan gas Hidrogen sebagai energi.

### 2.2.2 Karakteristik Jenis Limbah Kelapa Sawit

Dalam proses pengolahan Tandan Buah Segar (TBS) di pabrik kelapa sawit selalu dihasilkan produk dan limbah [46]. Produk yang dihasilkan adalah *Crude Palm Oil* (CPO) dan *Palm Kernel Oil* (Kernel), sedangkan limbah yang dihasilkan [24] adalah sebagai berikut:

#### 1) Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Limbah tandan sawit ini dapat dihasilkan dari tandan buah, yaitu tandan buah segar yang sudah terlalu matang dan buahnya rontok saat masih berada di dalam perkebunan [47]. Tandannya dikeringkan di pabrik pengolahan kelapa sawit dengan proses sterilisasi dan perontokan tandan basah. Berdasarkan literatur [48], kandungan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) berupa Selulosa sekitar 41,3%-46,5% ( $C_6H_{10}O_5$ ), Hemi-selulosa sekitar 25,3%-32,5% dan Lignin sekitar 27,6%-32,5%.



Gambar 7. Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS)

Sumber : [47]

## 2) Cangkang (*Shell*)

Cangkang [43] merupakan limbah dihasilkan dari pemrosesan kernel inti sawit dengan bentuk seperti tempurung kelapa. Cangkang sawit mempunyai nilai kalori yang cukup tinggi sekitar 3500 kkal/kg-4100 kkal/kg sehingga sangat baik untuk digunakan sebagai bahan bakar co-firing di pembangkit listrik batubara (PLTU) maupun pembangkit dari biomassa (PLTBM) [8].



Gambar 8. Cangkang (*Shell*) dan Serabut (*Fiber*)

Sumber : [43]

Serat merupakan limbah sisa perasan buah sawit berupa serabut seperti benang. Bahan ini mengandung protein kasar sekitar 4% dan serat kasar sekitar 36% (lignin 26%), serta mempunyai nilai kalori sekitar 2637kkal/kg-3998kkal/kg [24].



Gambar 9. Penimbunan Serabut (*Fiber*)

Sumber : [29]

Dari hasil uji laboratorium nilai kalor sampel untuk sampel serabut, cangkang dan tandan kosong kelapa sawit yang diambil dari dapat dilihat pada Tabel 2 berikut:

Tabel 2. Hasil Uji Laboratorium untuk Menilai Kalor Sampel Limbah Sawit

No	Sampel	Nilai Kalor (Kalori/gr)	Nilai Kalor (Joule/gr)
1	Serabut Kelapa Sawit	4.875,7857	20.315,4489
2	Tandan Kosong	4.492,7436	18.719,4656
3	Cangkang Kelapa	5.656,7127	23.569,2595

Sumber: [49]

### 3) Lumpur Sawit (*Wet Decanter Solid*)

Pada proses pengolahan minyak sawit (CPO) banyak dihasilkan limbah cair yaitu sekitar 2,5 m<sup>3</sup>/ton CPO yang dihasilkan [50]. Limbah ini mengandung polutan yang sangat tinggi yaitu *Biochemical Oxygen Demand* (BOD) sekitar 20.000-60.000 mg/l [51]. Pereduksian padatan dari cairan ini dilakukan dengan menggunakan alat decanter yang menghasilkan decanter padat atau lumpur sawit [52].

Bahan padat [53] ini berbentuk seperti lumpur dengan kadar air sekitar 75%, protein kasar sekitar 11,14%, dan lemak kasar sekitar 10,14%. Kadar air yang tinggi menyebabkan bahan ini mudah membusuk. Jika dibiarkan di lapangan terbuka selama kurang lebih 2 hari, bahan ini akan tampak ditumbuhi jamur berwarna kekuningan. Saat dikeringkan, lumpur sawit berwarna kecoklatan dan terasa sangat kasar dan keras [52].

### 4) Limbah Cair

Hampir seluruh air limbah Pabrik Kelapa Sawit (PKS) mengandung bahan organik yang dapat menyebabkan penurunan kualitas air dan pencemaran. Oleh karena itu dalam pengelolaan sampah perlu diketahui karakteristik sampah tersebut. Efisiensi pabrik kelapa sawit dapat ditingkatkan dengan menggunakan *decanter* yang hanya menghasilkan sekitar 0,3-0,4 ton limbah cair untuk setiap 1 ton TBS yang diolah [30]. Limbah cair yang dihasilkan bisa ditekan menjadi hanya 24 ton/jam atau 1.667 m<sup>3</sup> per 1 ton CPO yang dihasilkan [43]. Limbah cair akan dihasilkan dari seluruh proses produksi kelapa sawit dan diperkirakan mencapai maksimal 60% dari seluruh tandan buah segar yang diolah.

Berdasarkan kajian literatur yang ada, limbah kelapa sawit dapat berupa limbah kering yang terdiri dari: tandan kosong kelapa sawit (TKKS), cangkang (shell) dan serabut (fiber) yang secara keseluruhan dapat diubah menjadi bahan penting energi terbarukan (EBT). . Beberapa

contoh produknya antara lain bioetanol, biodiesel dan sebagai bahan bakar Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBM).

### 2.2.3 Perhitungan Potensi Biomassa Limbah Pertanian

*Biomass Energy Europe* [54] membagi biomassa limbah pertanian dalam 2 (dua) kelas utama [55], yaitu :

#### 2.2.3.1 Limbah Pertanian Primer

Limbah Pertanian Primer (PAR) [56] merupakan biomassa pertanian yang paling penting untuk bioenergi adalah jerami dan batang padi, serta limbah perkebunan kelapa sawit [8]. Parameter yang mempengaruhi potensi jerami/batang padi adalah luas lahan yang ditanami tanaman tersebut dan jumlah jerami atau batang padi yang dihasilkan per hektar atau per ton tanaman. Jenis sampah lain yang sebaiknya dimasukkan dalam kategori sampah primer adalah hasil proses budidaya (misalnya pemangkasan pohon buah-buahan). Metode teoritis limbah tanaman tahunan, seperti padi, diperkirakan berdasarkan luas budidaya, dan produksi pertanian (AP) dalam ton per hektar untuk setiap jenis tanaman dan rasio rata-rata antara produk dan limbah (PtR). Limbah pertanian primer dihitung dengan rumus [57] sebagai berikut:

$$THP\_PAR = \sum(CA_i \times AP_i \times PtR_i \times Av_i) \dots\dots\dots (1)$$

Sumber: [57]

Dimana:

*THP\_PAR* adalah limbah pertanian primer (ton); *CA<sub>i</sub>* adalah area budidaya tanaman-*i* (Ha), *AP<sub>i</sub>* adalah produksi pertanian tanaman-*i* (ton/ha); *PtR<sub>i</sub>* adalah rasio produk-limbah tanaman-*i*; dan *Av<sub>i</sub>* adalah ketersediaan limbah tanaman-*i* menurut sistem panen berlaku saat ini.

Untuk mengkonversi potensi limbah pertanian dari satuan ton kesatuan energi, dilakukan dengan perkalian potensi (dalam ton/tahun) dengan nilai kalor rendah dari limbah tertentu (GJ/ton kering).

#### 2.2.3.2 Limbah Pertanian Sekunder

Limbah Pertanian Sekunder (SAR) [58] dihasilkan dan dikumpulkan dari perusahaan yang mengolah bagian tanaman pertanian yang dipanen untuk menghasilkan pangan/pakan. Di beberapa negara Eropa perusahaan wajib melaporkan volume dan cara pemanfaatan limbah yang mereka hasilkan kepada badan statistik setempat. Namun, jika data statistik langsung tersebut tidak tersedia, metodologi untuk penilaian menggunakan persamaan [59] berikut:

$$P_{ti} = Cr_i \times PtSR_i \dots\dots\dots (2)$$

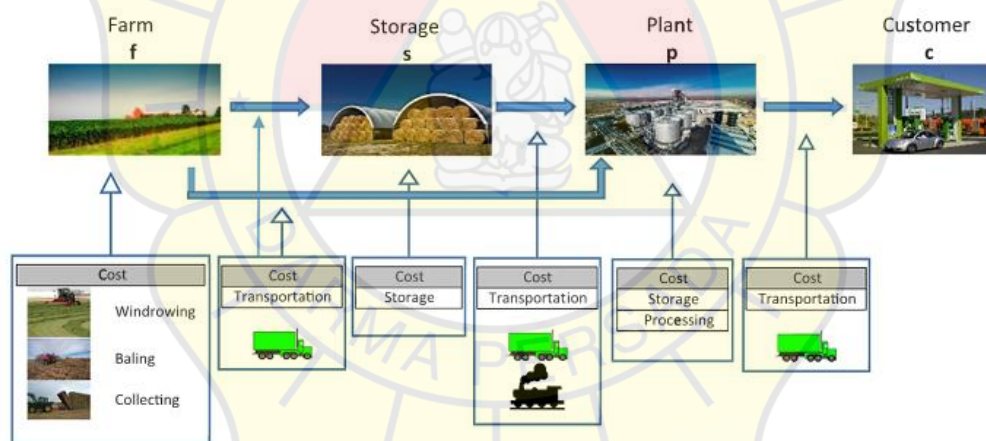
Sumber: [122]

Dimana:

$P_{ti}$  adalah potensi limbah pertanian sekunder tanaman-i (ton/tahun);  $Cr_i$  adalah jumlah produksi tanaman-i (ton/tahun); dan  $PtSR_i$  adalah rasio antara produk dan limbah sekunder tanaman-i.

## 2.2.4 Rantai Pasok Biomassa

Rantai pasokan (*supply chain*) [20] biomassa yang melibatkan pertanian dan perkebunan tanaman tahunan terdiri dari budidaya, panen, pengolahan, penyimpanan, dan transportasi [60]. Penelitian ini berfokus pada tahapan rantai pasokan yang terjadi dari titik di mana tanaman dipanen. Beberapa sistem biomassa utama digunakan untuk menggambarkan proses khas dan persyaratan bahan bakar untuk panen, meskipun dalam beberapa kasus ini mungkin dipengaruhi oleh hasil biomassa per hektar. Beberapa jenis biomassa, seperti limbah, tidak memiliki fase seperti itu dikaitkan dengan mereka, bukan sistem ‘produksi’ mereka mulai diproses.



Gambar 10. Rantai Pasok Biomassa

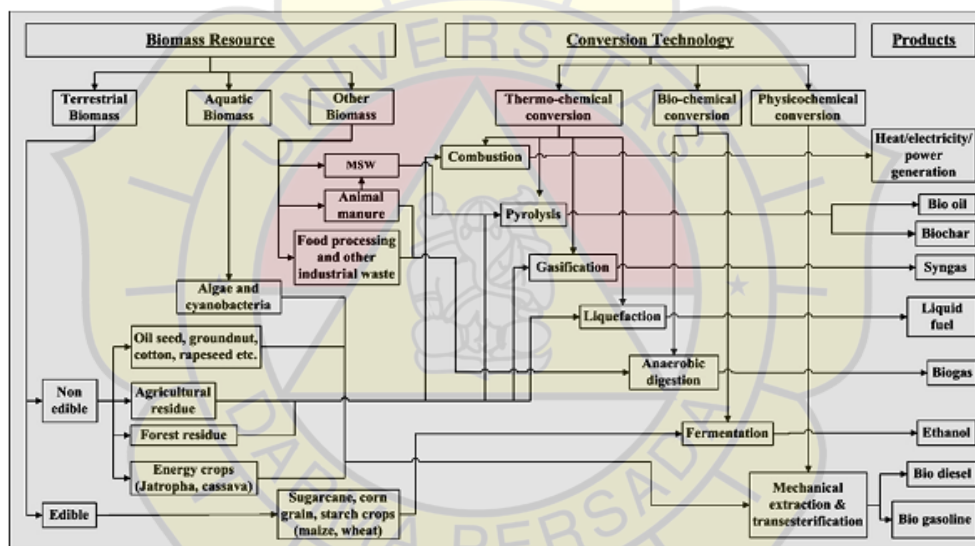
Sumber: [61][62]

Langkah-langkah rantai pasokan biomassa (BSC) [20] meliputi pemanenan biomassa yang ditanam atau penyediaan sisa biomassa, pengemasan, penyimpanan di gudang, pretreatment (fragmentasi, *lixiviation*, pengeringan, pencampuran dan densifikasi), pemuatan, konversi dalam boiler dan energi distribusi. Perubahan dapat terjadi pada urutan tahapan yang terjadi, seperti perlakuan sebelum pemanenan (perbaikan genetik, pemupukan, pengendalian hama, dan lain) [63]. Jumlah gudang, boiler dan tanaman tergantung pada proses yang bersangkutan dan logistik yang berkaitan dengan wilayah tersebut, sedangkan ketersediaan dan variabilitas biomassa

tergantung pada spesies endemik dan beradaptasi serta musiman yang melekat [64]. Gambar 6 merangkum langkah-langkah dasar pengembangan biomassa.

## 2.2.5 Teknologi Konversi Biomassa

Limbah biomassa secara efektif diubah menjadi bioenergi dan biofuel dengan menggunakan berbagai teknologi biokimia dan termal termasuk pencernaan anaerobik, gasifikasi dan pirolisis [65]. Ini adalah cara yang efisien untuk mengelola bahan limbah dan mengkonversi menjadi produk yang berharga. Biomassa dapat dimanfaatkan untuk pembangkit listrik dan produksi bahan kimia yang berharga menggunakan reaksi Fischer Tropsch [66]. Biomassa mendapatkan pengakuan di seluruh dunia sebagai sumber potensial untuk pembangkitan energi. Integrasi konversi biomassa menjadi bioenergi adalah cara yang efektif pengelolaan limbah untuk perlindungan lingkungan.



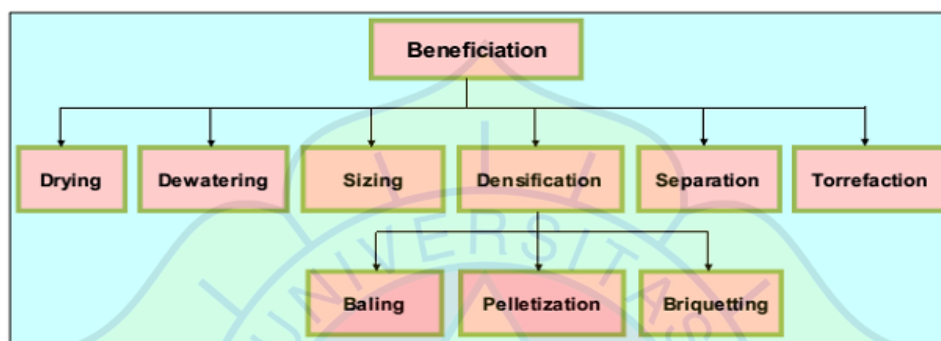
Gambar 11. Teknologi Konversi Biomassa

Sumber: [67]

Teknologi termokimia [68] yang berbeda digunakan untuk konversi biomassa, seperti pirolisis, gasifikasi dan pembakaran langsung pada Gambar 7. Pirolisis [69] dapat terjadi dalam tiga bentuk. Torrefaksi [70] menghasilkan peningkatan biomassa dengan daya kalor yang lebih besar dan densitas dan higroskopisitas yang lebih rendah, pirolisis lambat menghasilkan arang, dan pirolisis cepat menghasilkan bio-oil. Pembakaran langsung untuk menghasilkan energi panas adalah teknologi tertua dan terkonsolidasi. Penggunaan biomassa dibenarkan oleh status karbon-netralnya, yaitu emisi karbon dioksida dikompensasi oleh fiksasinya selama proses fotosintesis [71].

## 2.2.6 Produksi Biopellet

Biopellet [23] adalah bahan bakar bio-alternatif yang dibuat dari produk biomassa, terutama limbah pertanian, perkebunan dan kehutanan. Kelebihan bahan ini berlimpah, murah dan diklasifikasikan sebagai sumber energi terbarukan. Namun demikian, ia memiliki masalah seperti kepadatan energi yang rendah [48]. Penggunaan langsung dari biomassa tanpa pengolahan dapat menyebabkan masalah respirasi dari karbon monoksida, sulfur dioksida dan sifat partikulat. Oleh karena itu proses konversi biomassa menjadi biopellet merupakan salah satu cara untuk meningkatkan kualitas biomassa dan memudahkan dalam proses transportasi [65].



Gambar 12. Proses Peningkatan Nilai Tambah Biomassa  
Sumber: [30]

Biopellet memiliki bentuk padat, bentuknya dalam ukuran kecil. Ini diproses melalui kombinasi kompresi dan suhu tinggi. Biomassa diubah menjadi biopellet sebagai aktivitas pengolahan limbah pada agroindustri pertanian. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa pembuatan biopellet menggunakan limbah agro-industri sedang diteliti sebagai bahan bakar terbarukan alternatif yang potensial [72].

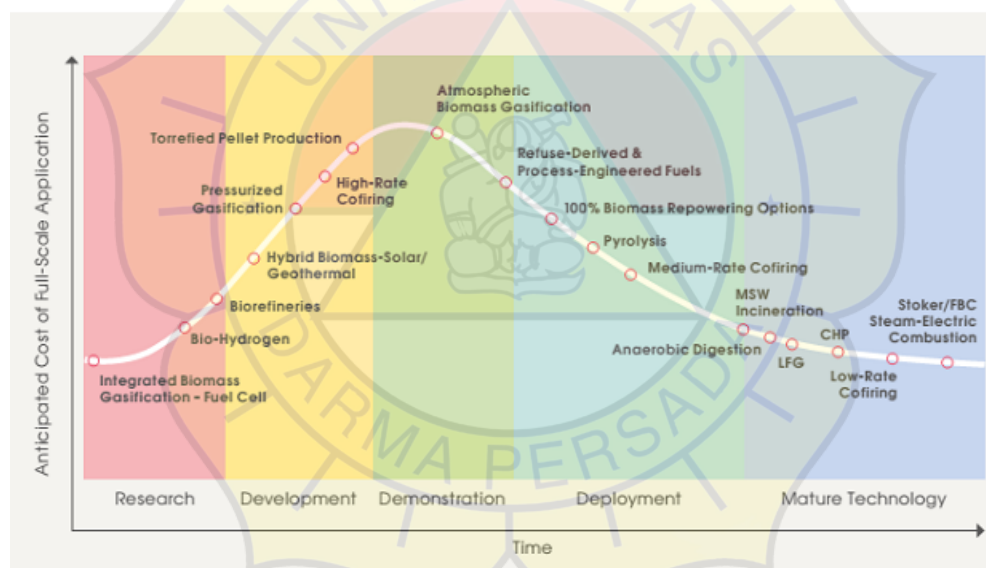


Gambar 13. Biopellet dan Biopellet setelah Proses Torrefaction  
Sumber: [70]

Produksi biopellet [23] dimulai dengan menghancurkan beragam material untuk mendapatkan material yang seragam dan kemudian dilanjutkan dengan pembentukan pelet. Pembuatan pellet dilakukan menggunakan pelet konvensional dibawah suhu 150 °C, 200 °C dan 250 °C selama 15 menit. Beberapa karakteristik diukur untuk menentukan kualitas biopellet, yaitu kadar air, densitas, kadar abu dan nilai kalor dan dibandingkan dengan standar pada.

### 2.2.7 Pembangkit Listrik Biomassa

Pembangkit listrik dari biomassa [73] dapat dicapai dengan berbagai macam bahan baku dan teknologi pembangkit listrik. Dalam setiap kasus, teknologi tersedia mulai dari solusi yang terbukti secara komersial dengan jangkauan yang luas (misalnya: pembakaran bahan bakar padat) sampai kepada mereka yang baru saja dikerahkan pada skala komersial (misalnya: gasifikasi) [74]. Ada teknologi lain yang berada pada tahap awal pengembangan dan tidak dipertimbangkan dalam analisis ini. Selain itu, bahan baku yang berbeda dan teknologi terbatas atau lebih cocok untuk berbeda skala aplikasi, semakin memperumit gambar. Bagian berikut membahas masing-masing jurusan kelompok teknologi dan parameter teknisnya.



Gambar 14. Perkembangan Teknologi Biopellet

Sumber: [13]

*Co-firing* biomassa dengan batubara [75] untuk pembangkit listrik menjadi semakin umum. Sekitar 55 GW kapasitas batubara sekarang bekerja bersama dengan biomassa di Amerika Utara dan Eropa. Di Eropa, sekitar 45 GW dari kapasitas pembangkit listrik termal dipicu bersama biomassa dengan dari hanya 3% hingga sebanyak 95% kandungan bahan bakar biomassa [75]. Keuntungan biomassa *co-firing* adalah bahwa rata-rata efisiensi listrik dalam tanaman *co-firing* lebih tinggi dari pada biomassa khusus pabrik pembakaran. Biaya investasi tambahan relatif

rendah meskipun mereka dapat meningkatkan biaya dari pembangkit listrik tenaga batu bara sebanyak sepertiga.

Standarisasi spesifikasi teknis biomassa [48] yang digunakan sebagai bahan bakar co-firing diperlukan agar pembangkit tetap dapat beroperasi secara optimal dan efisien. Penerapan co-firing biomassa 10% dari total kapasitas pembangkit atau setara dengan sekitar 1,81 GW dapat berkontribusi langsung terhadap pencapaian target EBT untuk sektor ketenagalistrikan dan sekaligus mengurangi emisi GRK dari sektor energi [7]. Untuk itu, pemerintah perlu menyiapkan instrumen pendukung terkait regulasi teknis, aspek teknologi, penyediaan BBM, aspek ekonomi, dan dukungan kebijakan lintas sector [76].

## 2.3 Pemodelan Energi Biomassa

Untuk mendapatkan model terpadu yang lebih optimal, perlu dilakukan kombinasi pemodelan berupa penggabungan metode yaitu *Biomass Supply Chain* (BSC) [20] dan *Geographic Information System* (GIS) [77]. Penjelasan dari beragam metode tersebut sebagai berikut:

### 2.3.1 Pemodelan Rantai Pasok Biomassa

Penggunaan pemodelan *Biomass Supply Chain* (BSC) untuk keperluan energi telah banyak dieksplorasi dalam literatur dan dapat membantu dalam pengambilan keputusan strategis, taktis dan operasional [78]. Perbedaan ada dalam kelengkapan tingkat keputusan. Mengenai aspek jangka panjang (misalnya tahunan), keputusan strategis meliputi desain boiler itu sendiri, investasi, pemilihan pemasok, alokasi instalasi, dan lainnya. Aspek jangka menengah yang melibatkan rute transportasi dan persediaan musiman merupakan keputusan taktis. Masalah operasional membutuhkan penyesuaian yang lebih sering dan melibatkan perencanaan transportasi dan permintaan jangka pendek [79].

Masalah BSC yang berkaitan dengan proses pemanenan [80] adalah tentang penjadwalan panen hutan dan tanaman, serta peralatan yang diperlukan. Ada masalah penjadwalan lokasi dan pengiriman (terkait dengan penyimpanan), sedangkan desain jaringan dengan arus material dan rute kendaraan diharapkan menimbulkan masalah transportasi. Secara umum, fokus ekonomi lebih dominan dalam optimalisasi rantai pasokan biomassa, dengan perhatian terbatas diberikan pada pengurangan emisi karbon dari rantai ini .

Pada dasarnya, semua teknik dapat digunakan dalam BSC, tetapi dengan pendekatan yang berbeda, yaitu dalam tahapan rantai yang berbeda. Jaringan saraf fokus pada tahap umpan biomassa karena di situlah memiliki volume data yang lebih besar, dan tidak mungkin melakukannya di langkah lain yang membayangkan pemasangan, pemetaan, dan konversi. Dalam pengertian ini, penelitian ini penting karena memperkuat tren pendekatan dan aplikasi yang dilaporkan dalam literatur. Konteks menunjukkan model optimisasi yang paling tepat.

### 2.3.2 *Geographic Information Systems (GIS)*

Sistem Informasi Geografis atau *Geographic Information Systems (GIS)* [81] menggunakan peta interaktif untuk mengelola data geografis dan spasial, membantu pengambil keputusan menganalisis proses. Isu geografis merupakan faktor yang dapat mempengaruhi kelayakan suatu proyek dikarenakan lokasi yang disediakan oleh parameter garis bujur dan ketinggian [82]. GIS adalah alat yang berguna untuk mengidentifikasi, memilih dan mengoptimalkan lokasi tanaman bioenergi dengan mempertimbangkan kriteria fisik, biologis, sosial dan ekonomi [83]. Sistem GIS memungkinkan melapiskan data dari berbagai disiplin ilmu, seperti tutupan vegetasi dan kepadatan demografis, pada peta BSC yang berguna bagi pengelola BSC.

Menurut Kim et al. [84], GIS telah digunakan untuk analisis yang tepat dari jarak transportasi, biaya dan dampak dari berbagai proyek; memfasilitasi pemilihan lokasi sebagai sumber biomassa dan hasilnya; menentukan area yang cocok untuk membangun fasilitas (keputusan strategis); menghitung perubahan rute (jaringan jalan) dan wilayah permintaan dan kepadatan tinggi; dan mempertimbangkan faktor-faktor seperti aliran air, jaringan listrik untuk infrastruktur, dan jumlah penduduk untuk tenaga kerja. Mereka digunakan untuk membantu merancang, merencanakan, dan mengelola masalah di BSC [85]. Jenis pertimbangan dan simulasi ini membantu mencapai, misalnya, minimalisasi biaya di BSC.

Wang et al. [86] menggunakan GIS dalam fase penentuan skenario mereka, memilih kandidat tanaman potensial yang ditemukan sangat cocok sesuai dengan kriteria seperti ketersediaan biomassa, jarak dari jalan utama, jarak dari gardu listrik, jarak dari badan air, dan risiko banjir tapak potensial. Para peneliti menyimpulkan bahwa hanya 6% dari potensi yang ada yang dapat dimanfaatkan secara optimal secara ekonomis. Lozano-García et al. [16] menilai potensi untuk menggunakan residu tanaman (jagung, gandum, tebu, jelai, sorgum, agave, padi, dan kacang kemiri) di beberapa daerah di seluruh Meksiko untuk menghasilkan energi dengan gasifikasi dan pembakaran. Hu et al. [87] mengembangkan model saling melengkapi linier untuk mensimulasikan sistem cofiring jerami padi di pasar tenaga listrik Taiwan, memanfaatkan analisis spasial GIS untuk mengevaluasi dan menggambarkan pengumpulan jerami padi, transportasi dan pengurangan CO<sub>2</sub>.

Sahoo et al. [88] GIS terintegrasi untuk mengidentifikasi lokasi pabrik yang optimal dan menghitung biaya pengiriman dengan model jaringan saraf untuk menilai sisa tanaman yang tersedia secara berkelanjutan. Para penulis menilai penggunaan batang kapas untuk menghasilkan pelet bahan bakar di negara bagian Georgia (AS) dengan tetap menjaga kesehatan tanah dalam jangka panjang. Ini digunakan sebagai alat untuk mengoptimalkan lokasi investasi masa depan di pembangkit listrik berbasis biomassa. Jumlah surplus residu jagung, gandum, gandum hitam, barley, rapeseed, triticale, dan rumput yang dihitung menunjukkan bahwa 30% dari surplus biomassa dapat digunakan dengan aman untuk pembangkit energi.

## 2.4 Rumusan Keterkinian Penelitian dan Nilai Kebaruan

### 2.4.1 Rumusan Keterkinian (*State of The Art*)

Adapun kata kunci (*key words*) penelitian ini adalah pemetaan potensi biomassa; limbah pertanian, rantai pasok, model optimasi, pemrograman matematika, analisis spasial. Beberapa peneliti sebelumnya telah menggunakan GIS untuk pemodelan ekonomi dan sektor-sektor turunannya, termasuk energi dan lingkungan. Dalam konteks Indonesia sebagai negara kepulauan, maka pemodelan energi yang dimaksud adalah pemodelan untuk negara kepulauan.

Secara ringkas dan sistematis, beberapa jurnal terkait pemodelan berbasis multi-regional, khususnya terkait sector energi, dapat dilihat pada Table 4 dan Tabel 5 berikut ini:

Tabel 3. *State of The Art* Penelitian

Peneliti	Lokasi Penelitian	Bidang Penelitian					
		Multi-Regional Analysis (MRA)	Reference Energy Systems (RES)	Center of Gravity Model (CGM)	Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA)	Mix Integer Linear Programming (MILP)	Geographic Information Systems (GIS)
Zhang et al. (2015) [89]	China	Ya		Ya			
Balash et al. (2014) [90]	Amerika Serikat	Ya	Ya				
Vaillancourt et al. (2013) [91]	Kanada	Ya	Ya	Ya			
Ahmudi et al. (2022) [8]	Indonesia	Ya			Ya	Ya	Ya
Ahmudi et al. (2024) [9]	Indonesia	Ya					Ya

Penelitian ini menggunakan GIS (*Geographic Information Systems*) [77], [81], [92] dan analisis multiregional untuk membuat sebuah model yang selaras dengan konsep Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development*) [93] dan bisa mengakomodir berbagai skenario (*what if*). Model yang disusun dalam berbagai penelitian sebelumnya ternyata belum memenuhi kriteria yang diharapkan tersebut.

#### 1) Keaslian (*Originality*)

Penelitian untuk menghasilkan model energi biomassa limbah pertanian untuk bahan bakar *co-firing* PLTU Batubara dengan mengkombinasikan penggunaan GIS dan analisis multiregional. Penelitian serupa belum dilakukan oleh peneliti lain sebelumnya. Secara umum,

pemodelan energi yang sudah ada masih parsial dan berbasis *single-regional*, sedangkan model baru ini menggunakan pendekatan multi-regional.

## 2) **Kemanfaatan (*Contribution*)**

Pemodelan energi berbasis multi-regional dengan memadukan antara GIS dapat mengakomodir berbagai macam perspektif yang terjadi pada tingkatan yang berbeda (regional, nasional dan multi-regional). Metode ini juga menjadi salah satu tantangan dalam pengembangan pemodelan di wilayah (*region*) dengan keragaman karakteristik geografi, demografi, ekonomi, ekologi, potensi sumberdaya alam dan sumberdaya energi.

### 2.4.2 **Nilai Kebaruan (*Novelty*)**

Penelitian ini mencoba membangun keterbaruan (*novelty*) mengembangkan sebuah model energi untuk negara-negara berbasis kepulauan, khususnya Indonesia. Model baru yang dimaksudkan adalah kombinasi antara GIS untuk menghasilkan model baru. Model baru ini diharapkan mampu memotret dan menggambarkan kondisi energi di suatu negara layaknya memandang sebuah kota terpadu dan terintegrasi. Model ini nantinya akan dihasilkan bisa digunakan untuk perencanaan energi secara lebih terpadu, komprehensif, detail, informatif dan solutif. Paradigmanya tetap berpijak pada Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development*).

