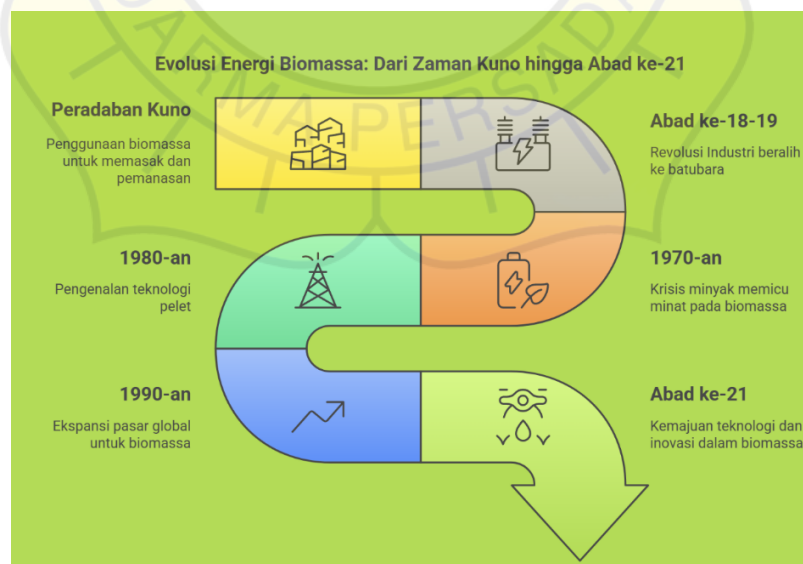


BAB 2

Tinjauan Pustaka

2.1 Pengantar

Evolusi terhadap pemanfaatan biomassa dalam prespektif energi telah dimulai dari masa pra sejarah hingga sekarang seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3. Pada zaman peradaban kuno itu, manusia telah mengenal api sehingga mampu memanfaatkan kayu untuk penerangan. Lalu, api dan kayu yang mewakili biomassa dimanfaatkan untuk membakar kemudian memasak bahan makanan yang umumnya adalah daging dari perburuan mereka. Perkembangan kemudian semakin maju sejak revolusi industri karena kayu (biomassa) tergantikan oleh batubara – dan bahan bakar fosil lainnya karena digunakan untuk penerangan dan transportasi dengan sistem ketel uap.



Gambar 3. Evolusi penggunaan energi biomassa

Sekitar 1970-an terjadi krisis minyak yang membuat pengguna energi fosil melirik biomassa sebagai salah satu energi alternatif. Namun demikian, sepuluh tahun kemudian yaitu era 1980-an, pelet kayu (wood pellet) telah diperkenalkan sebagai bahan bakar alternatif untuk skala rumah tangga hingga skala industri – pembangkit listrik. Ekspansi besar-besaran dan menjadi pilihan utama sebagai pemasok energi kemudian berlanjut hingga sekarang.

2.2 Sekilas Tentang Biomassa Padat: Sejarah Komprehensif

2.2.1 Tahap Perkembangan Awal

Pemanfaatan biomassa sebagai sumber energi telah didokumentasikan sejak era peradaban kuno, di mana kayu dan produk sampingan pertanian berfungsi sebagai bahan bakar utama untuk keperluan kuliner dan pemanasan. Dalam hal ini, data empiris menunjukkan bahwa sekitar 90% dari total konsumsi energi di masyarakat agraria awal berasal dari biomassa [6]. Ketika kemajuan masyarakat terjadi, revolusi industri abad ke-18 dan ke-19 menandakan transformasi yang signifikan, ditandai dengan penguasaan batubara sebagai sumber energi utama. Namun demikian, kesadaran yang berkembang tentang dampak lingkungan yang terkait dengan konsumsi bahan bakar fosil mulai membangkitkan kembali minat pada biomassa, terutama selama bagian akhir abad ke-20.

Di tengah meningkatnya kesadaran akan perubahan iklim dan keharusan untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, biomassa semakin diakui sebagai solusi yang lebih bertanggung jawab secara ekologis. Dalam kerangka ini, biomassa dianggap tidak hanya sebagai sumber energi tetapi juga sebagai komponen integral dari ekonomi sirkular yang mampu mengurangi limbah pertanian dan industri. Perspektif ini dibuktikan dengan banyaknya program pemerintah yang mengadvokasi pemanfaatan biomassa, baik untuk pemanasan perumahan maupun aplikasi industri.

Perkembangan baru ini memfasilitasi munculnya teknologi inovatif yang memungkinkan konversi biomassa menjadi bahan bakar yang lebih efisien. Misalnya, pengenalan proses pirolisis dan gasifikasi muncul sebagai metode untuk

menambah nilai energi biomassa. Akibatnya, biomassa siap untuk merebut kembali posisinya dalam paradigma energi global, terlepas dari tantangan yang terus-menerus terkait dengan biaya dan infrastruktur. Singkatnya, perkembangan awal dalam sektor biomassa mencerminkan pergeseran paradigma dari ketergantungan pada bahan bakar fosil menuju eksplorasi sumber energi yang lebih berkelanjutan. Dengan dukungan kerangka kebijakan dan kemajuan teknologi, biomassa secara progresif ditetapkan sebagai alternatif yang layak dalam mengatasi kebutuhan energi global.

2.2.2 Kemajuan dalam Bahan Bakar Padat Biomassa

Sejak dimulainya krisis minyak pada 1970-an, negara-negara di seluruh dunia telah dipaksa untuk menyelidiki beragam alternatif energi terbarukan, termasuk biomassa. Dalam kerangka ini, entitas pemerintah memprakarsai investasi dalam inisiatif penelitian dan pengembangan yang bertujuan memanfaatkan biomassa sebagai sumber energi yang layak. Kemajuan signifikan dalam lintasan ini adalah munculnya teknologi pelet selama tahun 1980-an, yang memfasilitasi transformasi kayu dan produk sampingan pertanian menjadi bahan bakar padat yang lebih kompak dan berenergi tinggi [7].

Penerapan teknologi pelet tidak hanya meningkatkan efisiensi penyimpanan dan transportasi biomassa, tetapi juga menambah daya tariknya bagi konsumen. Data empiris menunjukkan bahwa pemanfaatan pelet kayu di Eropa mengalami peningkatan pesat, dengan permintaan melebihi 30 juta ton pada tahun 2019 [8]. Tren ini menyiratkan bahwa biomassa padat semakin diakui sebagai alternatif yang layak untuk bahan bakar fosil untuk pemanasan dan pembangkit listrik.

Selain itu, banyak negara memulai perumusan kebijakan yang dirancang untuk mendukung pemanfaatan bahan bakar biomassa padat. Misalnya, Swedia dan Finlandia berdiri di garis depan aplikasi biomassa, dengan kebijakan yang mempromosikan adopsi energi terbarukan dalam sektor industri dan transportasi. Kebijakan semacam itu tidak hanya berkontribusi pada mitigasi emisi gas rumah kaca, tetapi juga memfasilitasi penciptaan peluang kerja baru dalam domain energi terbarukan [9].

Meskipun demikian, tantangan tetap ada mengenai keberlanjutan pasokan biomassa. Meningkatnya permintaan bahan bakar padat mengharuskan pembentukan sistem sertifikasi yang menjamin biomassa yang digunakan bersumber secara berkelanjutan. Inisiatif seperti Program Biomassa Berkelanjutan di Eropa mencontohkan pendekatan kritis untuk memastikan bahwa konsumsi biomassa tidak mempengaruhi ekosistem lokal [10]. Akibatnya, munculnya bahan bakar biomassa padat menandakan pergeseran paradigma dalam persepsi energi. Beralih dari bahan bakar tradisional yang belum sempurna, biomassa kini telah mengambil peran penting dalam strategi energi global, menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

2.2.3 Pertumbuhan Pasar Global

Dengan dimulainya tahun 1990-an, pasar global untuk biomassa padat memulai fase pertumbuhan substansial. Negara-negara Eropa, khususnya Swedia dan Finlandia, melakukan inisiatif proaktif untuk memanfaatkan biomassa sebagai sumber energi utama. Melalui dukungan kebijakan pemerintah yang kuat dan investasi besar dalam infrastruktur, negara-negara ini telah berhasil membangun ekosistem yang kondusif bagi proliferasi industri biomassa. Misalnya, Swedia telah mengartikulasikan tujuan ambisius yang bertujuan untuk meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan, dengan biomassa merupakan elemen mendasar dalam realisasi tujuan ini [8].

Pada skala global, Uni Eropa juga telah menggambarkan target ambisius untuk pemanfaatan energi terbarukan, sehingga lebih lanjut mengkatalisasi pertumbuhan sektor biomassa. Data empiris menunjukkan bahwa pada tahun 2020, proporsi energi terbarukan dalam total konsumsi energi UE mencapai 18%, dengan biomassa mewakili lebih dari 60% dari energi terbarukan yang digunakan (Brown, 2021). Temuan ini menyiratkan bahwa biomassa telah muncul sebagai komponen penting dalam strategi energi Eropa.

Bersamaan dengan itu, negara-negara di luar Eropa semakin menyelidiki prospek biomassa. Di Amerika Utara, misalnya, industri biomassa padat menyaksikan

pertumbuhan substansif, dengan banyak perusahaan berinvestasi dalam teknologi produksi pelet dan bioenergi. Dalam hal ini, bukti statistik menunjukkan bahwa produksi pelet kayu di Amerika Serikat mencapai 8 juta ton pada tahun 2020, memposisikannya di antara produsen terkemuka secara global [7].

Namun demikian, ekspansi pasar yang cepat menimbulkan tantangan baru yang berkaitan dengan keberlanjutan dan konsekuensi lingkungan yang terkait dengan pemanfaatan biomassa. Kekhawatiran mengenai deforestasi dan penipisan keanekaragaman hayati sangat penting, mengharuskan penerapan peraturan yang lebih ketat dan kerangka sertifikasi yang transparan untuk memastikan bahwa biomassa yang digunakan tidak mempengaruhi lingkungan [10].

Singkatnya, ekspansi global pasar biomassa padat menggarisbawahi meningkatnya pentingnya energi terbarukan dalam memenuhi kebutuhan energi dunia. Dengan dukungan kebijakan yang tepat dan komitmen yang teguh terhadap keberlanjutan, biomassa memiliki potensi untuk melanjutkan lintasan pertumbuhannya dan berkontribusi pada transisi menuju paradigma energi yang lebih bersih dan lebih berkelanjutan.

2.2.4 Inovasi dalam Metode Teknologi

Saat kita beralih ke abad ke-21, sektor biomassa padat telah mengalami kemajuan teknologi yang substansial. Kemajuan dalam metodologi pemrosesan, seperti torrefaksi dan gasifikasi, telah meningkatkan efisiensi dan kandungan energi bahan bakar yang diturunkan dari biomassa. Misalnya, torrefaksi adalah proses yang mengubah biomassa menjadi produk yang ditandai dengan peningkatan stabilitas dan kepadatan energi yang tinggi, sehingga memfasilitasi penyimpanan dan pengangkutannya [10].

Munculnya teknologi pembakaran yang canggih telah secara signifikan meningkatkan kemanjuran bahan bakar biomassa padat dalam konteks industri. Inovasi ini memfasilitasi proses pembakaran yang lebih efisien dan bersih, mengurangi emisi polutan, dan meningkatkan efisiensi energi secara keseluruhan. Data empiris menunjukkan bahwa penerapan teknologi pembakaran yang

dioptimalkan dapat menghasilkan peningkatan efisiensi hingga 90% dalam skenario industri tertentu. Selain itu, kemajuan dalam arena bioteknologi telah mengekspos prospek baru untuk evolusi bahan bakar biomassa. Misalnya, penggabungan proses mikroba dalam fermentasi bahan baku biomassa untuk menghasilkan bioetanol telah menunjukkan hasil yang menggembirakan. Ini tidak hanya memperluas variasi biomassa yang memenuhi syarat untuk pemanfaatan tetapi juga meningkatkan nilai intrinsik bahan baku tersebut [9].

Meskipun demikian, terlepas dari berbagai keuntungan yang diberikan oleh kemajuan teknologi, tantangan yang berkaitan dengan biaya dan aksesibilitas tetap ada. Sejumlah besar teknologi yang muncul memerlukan investasi awal yang besar, yang dapat menghambat implementasinya secara luas. Akibatnya, penyediaan dukungan kebijakan dan insentif keuangan sangat penting untuk mendorong adopsi teknologi inovatif dalam sektor biomassa. Sebagai kesimpulan, kemajuan teknologi dalam industri biomassa padat menunjukkan potensi yang cukup besar untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan. Melalui inovasi berkelanjutan ditambah dengan kerangka kebijakan yang tepat, biomassa siap mempertahankan statusnya sebagai alternatif yang layak untuk bahan bakar fosil dalam mengatasi permintaan energi global.

2.2.5 Tren Biomassa Saat Ini dan Perkembangan Prospektif

Saat ini, sektor biomassa padat diakui sebagai elemen penting dalam sistem energi terbarukan global. Penekanan yang meningkat pada pencapaian netralitas karbon dan mengatasi perubahan iklim telah mengkatalisasi masuknya investasi yang signifikan dalam inisiatif biomassa secara global. Negara-negara semakin memberlakukan kebijakan yang mendukung pemanfaatan energi biomassa, dan pasar bahan bakar biomassa padat mengalami pertumbuhan, didorong oleh permintaan domestik dan internasional [11].

Tren kontemporer menunjukkan bahwa semakin banyak perusahaan dan badan pemerintah yang berdedikasi untuk meminimalkan emisi karbon mereka. Banyak negara telah menetapkan tujuan ambisius untuk membatasi emisi gas rumah kaca,

dengan biomassa sering dianggap sebagai solusi yang layak untuk memenuhi aspirasi ini. Misalnya, Uni Eropa telah mengartikulasikan tujuan untuk mencapai netralitas karbon pada tahun 2050, di mana biomassa diantisipasi memainkan peran penting dalam kerangka energi mereka [12].

Sebaliknya, kesadaran publik tentang keberlanjutan secara bersamaan meningkat. Permintaan komoditas yang berasal dari sumber berkelanjutan, termasuk biomassa, terus meningkat. Tren ini memberi insentif kepada perusahaan untuk mengeksplorasi jalan untuk meningkatkan transparansi dan keberlanjutan dalam rantai pasokan mereka, serta untuk berinvestasi dalam kemajuan teknologi yang lebih bersih dan lebih efisien global [7].

Ke depan, sektor biomassa padat diproyeksikan akan bertahan dalam pertumbuhan dan kapasitas inovatifnya. Dengan dukungan kebijakan yang tepat dan kesadaran konsumen yang meningkat, biomassa memiliki potensi untuk berkontribusi secara signifikan pada transisi menuju paradigma energi yang lebih berkelanjutan. Meskipun demikian, tantangan yang berkaitan dengan keberlanjutan pasokan dan konsekuensi lingkungan memerlukan resolusi untuk menjamin bahwa ekspansi ini dapat dipertahankan dalam jangka panjang [13].

Singkatnya, tren yang berlaku menunjukkan bahwa sektor biomassa padat berada di posisi yang baik untuk memfasilitasi solusi energi berkelanjutan di masa mendatang. Dengan mempertahankan investasi dalam inovasi dan teknologi, di samping adopsi praktik operasional yang lebih berkelanjutan, biomassa memiliki kapasitas untuk muncul sebagai salah satu pilar mendasar dalam mengatasi tuntutan energi global yang meningkat.

2.3 Pendayagunaan Biomassa

Pendayagunaan biomassa menawarkan jalur yang menjanjikan untuk produksi energi berkelanjutan dan perlindungan lingkungan. Pemanfaatan berbagai teknik konversi dan mengoptimalkan metode bahan baku dan pretreatment, biomassa dapat memainkan peran penting dalam lanskap energi global. Kolaborasi antara peneliti, pemangku kepentingan industri, dan pembuat kebijakan sangat penting

untuk memajukan teknologi ini dan memastikan implementasinya yang sukses [14, 15][3] [13]. Pemanfaatan biomassa melibatkan konversi bahan organik menjadi energi dan produk berharga lainnya. Proses ini mendapatkan perhatian karena potensinya untuk mengurangi dampak lingkungan, meningkatkan ketahanan energi, dan mempromosikan pembangunan berkelanjutan. Berikut adalah aspek kunci dari pemanfaatan biomassa:

Teknik Konversi: teknik ini mencakup pembakaran, gasifikasi, pirolisis, pencernaan anaerobik. Pembakaran langsung biomassa untuk menghasilkan panas dan listrik [16–18, 18]. Gasifikasi: Mengubah biomassa menjadi syngas, yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik atau sebagai prekursor bahan kimia seperti metanol [14, 16, 19]. Pirolisis melakukan dekomposisi termal biomassa tanpa adanya oksigen untuk menghasilkan bio-minyak, syngas, dan biochar [20, 21]. Pencernaan Anaerobik (AD) merupakan proses biologis yang memecah bahan organik untuk menghasilkan biogas (metana) dan digestat [14, 22, 23].

Jenis Bahan Baku terdiri dari residu pertanian kotoran hewan, biomassa berkayu, dan sampah organik. Residu Pertanian: Termasuk jerami gandum, sekam padi, dan stover jagung, yang berlimpah dan memiliki potensi tinggi untuk produksi energi [14, 24]. Kotoran Hewan: Efektif untuk pencernaan anaerobik karena kandungan ligninnya yang rendah [20]. Biomassa Berkayu: Efisien untuk produksi energi terbarukan skala besar [25]. Sampah Organik: Sampah makanan dan sampah kota dapat diubah menjadi bioenergi melalui digester (Anaerobic Digester-AD) [26, 27].

Teknik Pretreatment mencakup pretreatment alkaline dan pengeringan mekanis. Pretreatment Alkaline: Meningkatkan pencernaan biomassa, meningkatkan produksi biogas [14]. Pengeringan Mekanis: Digunakan dalam proses seperti Pembangkitan Terpadu Bahan Bakar Padat dan Biogas dari Biomassa (IFBB) untuk memisahkan biomassa menjadi fraksi cair dan padat [27].

Manfaat Lingkungan dan Ekonomi mencakup tiga aspek yaitu: (1) Pengurangan Gas Rumah Kaca: Pemanfaatan biomassa dapat secara signifikan menurunkan emisi CO₂ dibandingkan dengan bahan bakar fosil [15, 25, 28]; (2) Ketahanan Energi: Mengurangi ketergantungan pada sumber energi tak terbarukan

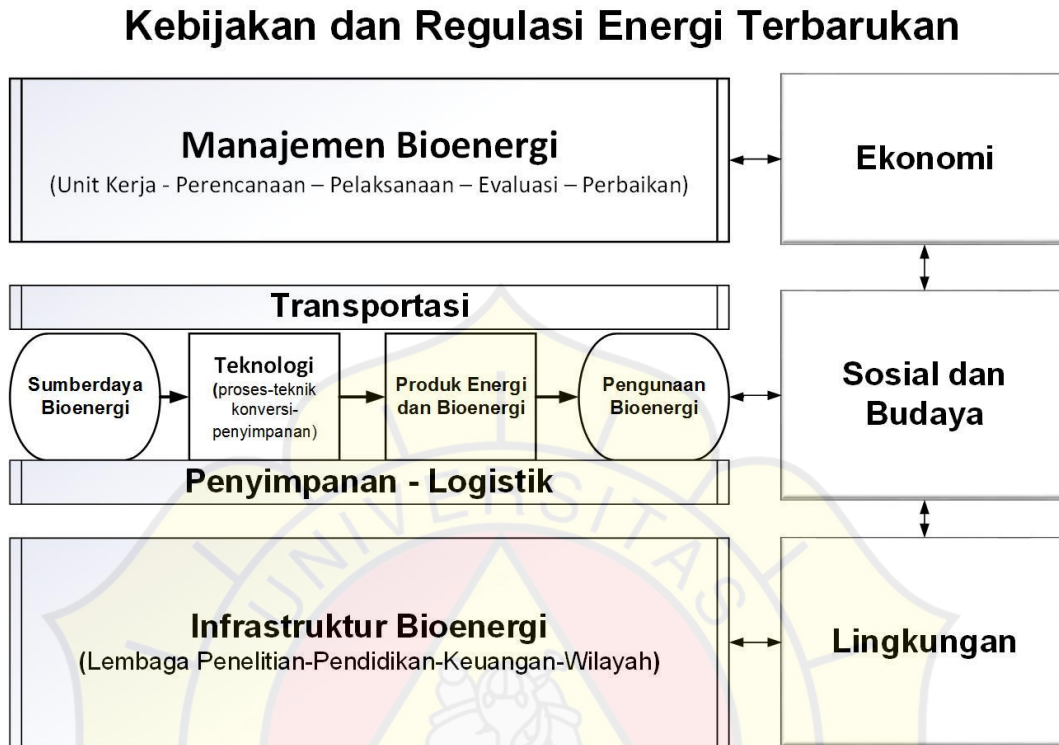
dan menstabilkan pendapatan pedesaan [25]. (3) Pengelolaan Sampah: Mengubah bahan limbah menjadi produk berharga, mendukung ekonomi sirkular [21].

Tantangan dan Rekomendasi: Ketersediaan Sumber Daya: Memastikan pasokan bahan baku biomassa yang konsisten sangat penting [15]. Kendala Logistik: Manajemen rantai pasokan yang efisien diperlukan untuk menangani pengumpulan, transportasi, dan penyimpanan biomassa [28]. Inovasi Teknologi: Penelitian dan pengembangan berkelanjutan dalam teknologi konversi dan teknik pengoptimalan, termasuk penggunaan kecerdasan buatan, sangat penting untuk meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan [14, 29].

2.4 Sistem Bionergi Berkelanjutan

Pengertian sistem energi adalah sistem yang dirancang untuk memasok layanan energi kepada pengguna akhir (Groscurth *et al.*, 1995), Sistem bioenergi mencakup mulai dari pra perlakuan sampai pada pengguna akhir dengan kepedulian yang semakin meningkat terhadap manfaat dan dampak lingkungan akibat penerapan sistem tersebut (Bridgwater & Boocock, 1997). Jika dikaitkan dengan Laporan Penilaian Kelima dari IPCC yang mendefinisikan sistem energi sebagai "semua komponen yang terkait dengan produksi, konversi, pengiriman, dan penggunaan energi" (Allwood *et al.*, 2014), maka semua komponen penyusun dan berpengaruh langsung atau tidak langsung seharusnya dikaji dan dicantumkan untuk mencapai pemahaman yang menyeluruh terhadap sistem tersebut. Ketiga analisis ini dapat disajikan dalam bentuk skema umum seperti pada Gambar 3 dimana sistem energi yang diwakili oleh sistem bioenergi akan berinteraksi dengan semua komponen pilar ekonomi, sosial, dan lingkungan yang menjadi penopang pembangunan berkelanjutan. Sistem bioenergi itu dibangun oleh serangkaian materi kunci yang dapat dikelompokkan sebagai komponen regulasi dan kebijakan, manajemen, mata rantai pasokan dan produksi, dan infrastruktur. Interaksi akan terjadi antar materi kunci dan komponen penyusun sistem bioenergi jika regulasi dan kebijakan memberikan peluang berdasarkan kepentingan suatu lembaga atau wilayah. Kondisi yang sama akan juga akan terjadi pada interaksi komponen penyusun

sistem bioenergi dengan tiga pilar pembangunan berkelanjutan seperti yang disajikan dalam bentuk skema umum [30] (Gambar 4.).



Gambar 4. Sistem Bioenergi berkelanjutan [30].

2.5 Biomassa dan Lingkungan

Biomassa memiliki potensi untuk memitigasi perubahan iklim, meningkatkan ketahanan energi, dan mendorong pembangunan pedesaan. Namun, produksi dan pemanfaatannya dapat memberikan dampak lingkungan yang positif dan negatif, dan mengatasi tantangan seperti ketersediaan sumber daya, kendala logistik, dan persaingan untuk penggunaan lahan sangatlah penting. Selain itu, biomassa menawarkan manfaat ekologis sebagai sumber energi terbarukan dan memberikan peluang untuk pertumbuhan ekonomi di masyarakat pedesaan dan negara berkembang. Meskipun demikian, mengintegrasikan biomassa ke dalam praktik lingkungan yang berkelanjutan membutuhkan penanganan tantangan teknis, lingkungan, dan ekonomi. Penjelasan selanjutnya adalah hubungan antara biomassa dan lingkungan, dampak lingkungan dari produksi dan pemanfaatan biomassa,

bagaimana biomassa berkontribusi pada penyerapan karbon dan mitigasi perubahan iklim, manfaat ekologis penggunaan biomassa sebagai sumber energi terbarukan, dan tantangan serta peluang untuk mengintegrasikan biomassa ke dalam praktik lingkungan yang berkelanjutan.

Hubungan antara Biomassa dan Lingkungan: Biomassa memiliki potensi untuk memitigasi perubahan iklim, meningkatkan ketahanan energi, dan mendorong pembangunan pedesaan [31]. Praktik-praktik berkelanjutan seperti rotasi tanaman, wanatani, dan konversi limbah menjadi sumber daya penting untuk pemanfaatan sumber daya biomassa yang berkelanjutan [31]. Kerangka kerja kebijakan dan insentif peraturan memainkan peran penting dalam mempromosikan pemanfaatan biomassa yang berkelanjutan [31].

Dampak Lingkungan dari Produksi dan Pemanfaatan Biomassa: Biomassa dapat mempengaruhi lingkungan baik secara positif maupun negatif, tergantung pada bagaimana biomassa tersebut diproduksi dan digunakan [32]. Tantangan seperti ketersediaan sumber daya, kendala logistik, dan persaingan untuk penggunaan lahan perlu diatasi untuk mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan [31]. Produksi bioenergi mungkin memiliki konsekuensi negatif terhadap lingkungan, dengan erosi tanah dan masalah terkait air menjadi masalah yang signifikan [32].

Kontribusi Biomassa terhadap Penyerapan Karbon dan Mitigasi Perubahan Iklim: Biomassa menawarkan potensi untuk menyerap karbon dioksida, sehingga mengurangi karbon di atmosfer dan berkontribusi terhadap mitigasi pemanasan global [33]. Mayoritas dampak positif dari pemanfaatan biomassa dikontribusikan oleh emisi yang berasal dari bahan bakar fosil, emisi CO₂ biogenik, dan pertumbuhan kembali untuk kompensasi [34].

Manfaat Ekologis Penggunaan Biomassa sebagai Sumber Energi Terbarukan: Biomassa memiliki keunggulan yang jelas dibandingkan bahan bakar fosil konvensional karena kelimpahan dan sifatnya yang terbarukan, sehingga sangat penting untuk menjaga keamanan pasokan energi global [32]. Biomassa membantu mengurangi jumlah gas rumah kaca yang berkontribusi terhadap pemanasan global dan perubahan iklim [35].

Tantangan dan Peluang Mengintegrasikan Biomassa ke dalam Praktik Lingkungan yang Berkelanjutan: Biomassa terdiri dari berbagai macam bahan, dan pemanfaatannya untuk produksi energi memberikan manfaat yang signifikan, termasuk berkurangnya tekanan terhadap sumber daya tak terbarukan, emisi gas rumah kaca yang lebih rendah, dan pertumbuhan ekonomi di masyarakat pedesaan dan negara berkembang [36]. Transisi dari biomassa ke energi bukannya tanpa tantangan, termasuk rintangan teknis, tantangan sosio-ekonomi, dan mengatasi potensi dampak lingkungan [37]. Pengembangan, pemanenan, dan distribusi bioenergi menghadapi tantangan seperti kemajuan teknologi, masalah lingkungan, dan kelayakan ekonomi [38]. Penjelasan berikut lebih rinci dari manfaat penggunaan biomassa pada lingkungan yang mencakup biomassa sebagai sumber energi terbarukan, dampak produksi biomassa terhadap keanekaragaman hayati dan kesehatan ekosistem, tantangan dan keterbatasan penggunaan biomassa sebagai sumber energi ramah lingkungan, dan pertimbangan lingkungan utama dalam pengelolaan sumber daya biomassa yang berkelanjutan.

2.5.1 Manfaat Biomassa pada Lingkungan

Manfaat Lingkungan Biomassa sebagai Sumber Energi Terbarukan dapat dirinci sebagai berikut:

- **Pengurangan Emisi GRK** : Energi biomassa dapat secara signifikan mengurangi emisi CO₂ dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Misalnya, biomassa kayu sering dikaitkan dengan dampak lingkungan yang positif karena emisi biogeniknya CO₂, yang merupakan bagian dari siklus karbon alami [39–41]. Penelitian telah menunjukkan bahwa biomassa dapat mengurangi emisi CO₂ dan memainkan peran positif dalam pengurangan karbon [42, 43].
- **Terbarukan dan Berkelanjutan** : Biomassa adalah sumber daya terbarukan yang dapat membantu mengurangi ketergantungan pada bahan bakar yang tidak terbarukan dan menstabilkan pendapatan daerah pedesaan [39–41] [1] [2]. Ini dapat bersumber dari berbagai bahan, termasuk residu pertanian, limbah kehutanan, dan tanaman energi khusus [44–46].

2.5.2 Tantangan dan Keterbatasan Penggunaan Biomassa

- **Penggunaan Tanah dan Air:** Produksi biomassa seringkali membutuhkan sumber daya tanah dan air yang signifikan, yang dapat menyebabkan degradasi lingkungan jika tidak dikelola secara berkelanjutan. Tanaman tahan banting yang ditanam di lahan marjinal dan produk limbah adalah pilihan yang lebih berkelanjutan dibandingkan dengan tanaman energi khusus yang ditanam di lahan subur [47, 48].
- **Perdebatan Netralitas Karbon :** Ada perdebatan tentang apakah biomassa benar-benar netral karbon. Sementara beberapa berpendapat bahwa biomassa netral karbon, yang lain menunjukkan bahwa biomassa dapat memancarkan karbon dalam jumlah yang signifikan, terutama jika tidak dikelola dengan baik [42, 49].
- **Dampak terhadap Keaneekaragaman Hayati dan Ekosistem:** Produksi biomassa dapat menyebabkan perubahan tata guna lahan yang memengaruhi keaneekaragaman hayati dan jasa ekosistem. Misalnya, mengubah hutan menjadi produksi biomassa dapat berdampak negatif pada ekosistem hutan dan keaneekaragaman hayati [48, 50, 51].

2.5.3 Pertimbangan Lingkungan untuk Biomassa

- **Teknologi Konversi:** Teknologi konversi biomassa yang berbeda, seperti gasifikasi, pirolisis, dan pembakaran, memiliki dampak lingkungan yang berbeda-beda. Gasifikasi, misalnya, telah terbukti memiliki biaya rendah untuk energi tak terbarukan dan emisi GRK yang lebih rendah dibandingkan dengan proses biomassa lainnya [43, 52].
- **Penilaian Siklus Hidup (LCA):** LCA adalah alat penting untuk mengevaluasi dampak lingkungan dari energi biomassa sepanjang siklus hidupnya, mulai dari produksi hingga penggunaan akhir. Ini membantu mengidentifikasi area yang perlu ditingkatkan dan memastikan bahwa sistem energi biomassa berkelanjutan [39, 53, 54].
- **Policy and Management:** Kebijakan dan praktik manajemen yang efektif sangat penting untuk memaksimalkan manfaat lingkungan dari energi biomassa. Ini termasuk mempromosikan penggunaan lahan berkelanjutan,

meningkatkan teknologi konversi, dan mengintegrasikan produksi biomassa dengan sistem pertanian dan kehutanan yang ada [40, 55, 56].

2.6 Standar Biomassa Padat

Biomassa padat adalah sumber energi terbarukan yang signifikan, berkontribusi antara 10% dan 14% dari pasokan energi primer dunia [57]. Ini berasal dari bahan organik seperti residu pertanian, produk sampingan kehutanan, dan limbah organik lainnya [58] [2]. Penggunaan biomassa padat untuk produksi energi didorong oleh potensinya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan ketergantungan pada bahan bakar fosil [59–62].

2.6.1 Klasifikasi dan Penggunaan

Biomassa padat dapat diklasifikasikan berdasarkan asalnya ke dalam kategori seperti biomassa kayu, rumputan, dan hewani [58]. Ini terutama digunakan untuk:

- **Pemanasan dan Pendinginan:** Untuk proses domestik dan industri [63].
- **Pembangkit listrik:** Pembangkit listrik biomassa padat menyediakan energi yang dapat dikirim, meningkatkan keamanan pasokan [63].
- **Bahan Bakar Memasak:** Terutama di daerah pedesaan [64].
- **Teknologi Konversi:** Beberapa teknologi digunakan untuk mengubah biomassa padat menjadi energi:
- **Pembakaran:** Metode paling umum untuk menghasilkan panas dan listrik [57].
- **Cocombustion dan Kogenerasi:** Menggabungkan biomassa dengan bahan bakar lain untuk meningkatkan efisiensi [57].
- **Gasifikasi:** Mengubah biomassa menjadi gas, yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik dengan emisi lebih rendah [57].
- **Torrefaksi dan Pelet:** Proses yang meningkatkan kepadatan energi dan sifat penanganan biomassa [65].

2.6.2 Standar dan Sertifikasi Mutu

Kualitas bahan bakar biomassa padat sangat penting untuk produksi energi yang efisien dan bersih. Standar dan sistem sertifikasi memastikan bahwa bahan bakar

biomassa memenuhi kriteria khusus untuk emisi, kandungan energi, dan keamanan [64, 66]. Di Eropa, negara-negara seperti Jerman, Austria, dan Swedia telah mengembangkan standar ketat untuk kualitas dan emisi bahan bakar biomassa [66]. Standar ini membantu menjaga lingkungan dalam ruangan yang sehat dan meminimalkan risiko kesehatan yang terkait dengan pembakaran biomassa [66].

2.6.3 Tantangan dan Rekomendasi

Terlepas dari manfaatnya, ada tantangan dalam standarisasi dan penilaian kualitas bahan bakar biomassa padat:

Ketersediaan dan Biaya Bahan Baku : Pengetahuan tentang ketersediaan dan biaya bahan baku biomassa terbatas [59–62].

Penilaian Kualitas : Teknik seperti mikroskop cahaya pantulan (RLM) dapat meningkatkan penilaian kualitas bahan bakar biomassa, tetapi memerlukan penyempurnaan dan standarisasi lebih lanjut [67, 68].

Standar Internasional : Ada kebutuhan untuk standar internasional yang diselaraskan untuk memfasilitasi perdagangan global dan memastikan kualitas yang konsisten [64, 66, 69].

Tantangan dan Peluang Mengintegrasikan Biomassa ke dalam Praktik Lingkungan yang Berkelanjutan:

- Biomassa terdiri dari berbagai macam bahan, dan pemanfaatannya untuk produksi energi memberikan manfaat yang signifikan, termasuk berkurangnya tekanan terhadap sumber daya tak terbarukan, emisi gas rumah kaca yang lebih rendah, dan pertumbuhan ekonomi di masyarakat pedesaan dan negara berkembang [36] [6].
- Transisi dari biomassa ke energi bukannya tanpa tantangan, termasuk rintangan teknis, tantangan sosio-ekonomi, dan mengatasi potensi dampak lingkungan [37][7].
- Pengembangan, pemanenan, dan distribusi bioenergi menghadapi tantangan seperti kemajuan teknologi, masalah lingkungan, dan kelayakan ekonomi [38][8].

2.6.4 Standar Nasional RI Biomassa Padat

Standar biomassa padat pada tingkat nasional (Tabel X) dan internasional, termasuk spesifikasi teknis wood pellet dan cangkang sawit yang dibutuhkan oleh perusahaan pengguna dari Jepang (Tabel X dan X).

Tabel 1. Standar wood pellet Indonesia

No	Parameter uji	Satuan, mln/maks	Persyaratan ^{a)}		Metode uji
			Rumah Tangga	Industrl	
1	Densilas (kerapatan)	g/cm ³ ,min	0,6	0,8	SNI 8021
2	Kadar abu	%,maks	5	5	ASTM E1755
3	Kadar air	%,maks	10	12	SNI 01-1506
4	Volatil matter	%,maks	75	80	SNI 06-3730
5	Kadar Karbon tetap	%,min	14	14	SNI 06-3730
6	Nilai kalor netto	MJ/kg, min	16,5	16,5	SNI 01-6235
7	Kadar chlor	%,maks	*)	0.,	ASTM D3882
8	Kadar Kalium (sebagai K ₂ O)	%,maks ^{**)}	*)	20	ASTM D6349
9	Kadar Natrium (sebagai N _{a2} O)	%,maks ^{**)}	*)	5	ASTM D6349
10	Kadar Sulfur	%,maks	0,1	0,1	ASTM D1757
<p>*) tidak berlaku untuk keperluan rumah tangga **) persentase maksimal darl abu</p>					

2.6.5 Standar Internasional Biomassa Padat

Spesifikasi wood pellet untuk permintaan Jepang (Tabel 2 dan 3) dan spesifikasi kualitas cangkang sawit untuk pembangkit listrik di Jepang (Tabel 4).

Tabel 2.1 Spesifikasi wood pellet untuk permintaan Jepang

ITEM	GUARANTEE SPECIFICATION
NCV (As received Basis)	> 4,060kcal/kg
Moisture (%)	< 10%
Ash (%)	< 3%
S (AD)	< 700 ppm
N (AD)	< 3,000 ppm
Cl (AD)	< 500 ppm
Na (AD)	< 500 ppm
K (AD)	< 1,500 ppm
Foreign Material	< 0.5%
Addictive	0%

Tabel 2. 2 Spesifikasi wood pellet untuk permintaan Korea Selatan

Item	Unit	Guarantee Spec	Rejection Parameter	
(Diameter)	mm	6~8	Out of range 5.5~8.4	
(Length)	mm	3.15 < L < 35	Out of range 3.15 < L < 40	
(Unit Volume Mass, As Received Basis)	kg/m ³	≥ 550	Below than 500	
(Total Moisture, As Received Basis)	% wt	≤ 10	Above than 10	
(NCV, As Received Basis)	kcal/kg	≥ 3,970	Below than 3,970	
Hydrogen H (dry ash free basis)	% wt	5~9		
(Ash, Dried Basis)	% wt	≤ 3.0	Above than 5.0	
(Fines, As Received Basis)	% wt	< 2.0	Above than 6.0	
(Durability, As Received Basis)	% wt	≥ 96.5	Below than 95	
(Chlorine, Dried Basis)	% wt	≤ 0.03	Above than 0.1	
(Sulphur, Dried Basis)	% wt	≤ 0.05	Above than 0.05	
(Nitrogen, Dried Basis)	% wt	≤ 0.7	Above than 0.7	
(Ash Fusion Temperature, IDT) (Reducing Atmosphere)	°C	≥ 1,100		
(Dried Basis)	(As)	mg/kg	≤ 1	Above than 1
	(Cd)	mg/kg	≤ 0.5	Above than 0.5
	(Cr)	mg/kg	≤ 10	Above than 10
	(Cu)	mg/kg	≤ 10	Above than 10
	(Pb)	mg/kg	≤ 10	Above than 10
	(Hg)	mg/kg	≤ 0.05	Above than 0.1
	(Ni)	mg/kg	≤ 10	Above than 10
	(Zn)	mg/kg	≤ 20	Above than 100
	Fluorine(F)	mg/kg	≤ 50	
	Phosphorous(P)	mg/kg	≤ 350	
	Cobalt(Co)	mg/kg	≤ 10	
	Manganese(Mn)	mg/kg	≤ 100	
	Antimony(Sb)	mg/kg	≤ 10	
	Tin(Sn)	mg/kg	≤ 5	
	Thallium(Tl)	mg/kg	≤ 5	
Vanadium(V)	mg/kg	≤ 5		
Bromine(Br)	mg/kg	≤ 5		
(Other Substances) (As Received Basis)	% wt	< 3	Above 3	
DNA TEST (Rice Husk)		Negative	Positive	
Total amount of non-fluidizable particles	kg/m	Max 0.5		
Na + K	mg/kg	≤ 2,300		

Tabel 2. 3. Spesifikasi Kualitas Palm Kernell Shell untuk Kanda Biomass Power Plant Japan

Test Item	Required Spec (should be guaranteed)	Conditions
Bulk Density	≥600kg/m ³	As received basis
NCV	≥3,600kcal/kg	As received basis
Total Moisture	≤20%	As received basis
Total Sulfur	≤1,000ppm	Dry basis
Total Nitrogen	≤10,000ppm	Dry basis
Chlorine	≤750ppm	Dry basis
Na+K	≤2,000ppm	Dry basis
Foreign Material	0.5%	As received basis
Metal foreign matter	≤0.3%	As received basis
Ash content	≤ 3%	Dry basis
Ash Fusion Temperature (Deformation Temperature)	>1,050°C	Oxidizing atmospheres

Tantangan dan Rekomendasi

Terlepas dari manfaatnya, ada beberapa tantangan dalam standarisasi dan penilaian kualitas bahan bakar biomassa padat. Rincian manfaat dan rekomendasi terkait standar ini adalah:

- Ketersediaan dan Biaya Bahan Baku: Pengetahuan mengenai ketersediaan dan biaya bahan baku biomassa masih terbatas. 3 4
- Penilaian Kualitas: Teknik-teknik seperti mikroskop cahaya pantul (reflected light microscopy/RLM) dapat meningkatkan penilaian kualitas bahan bakar biomassa, tetapi memerlukan penyempurnaan dan standarisasi lebih lanjut. 11 12
- Standar Internasional: Ada kebutuhan untuk standar internasional yang diselaraskan untuk memfasilitasi perdagangan global dan memastikan kualitas yang konsisten. 8 13

Tantangan dan Peluang Mengintegrasikan Biomassa ke dalam Praktik Lingkungan yang Berkelanjutan:

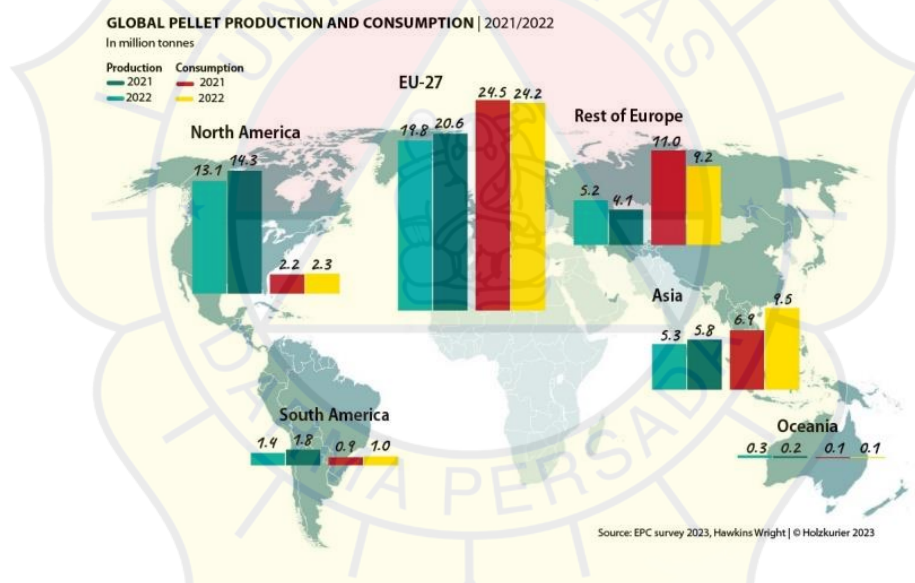
- Biomassa terdiri dari berbagai macam bahan, dan pemanfaatannya untuk produksi energi memberikan manfaat yang signifikan, termasuk berkurangnya tekanan terhadap sumber daya tak terbarukan, emisi gas rumah kaca yang lebih rendah, dan pertumbuhan ekonomi di masyarakat pedesaan dan negara berkembang [36].
- Transisi dari biomassa ke energi bukannya tanpa tantangan, termasuk rintangan teknis, tantangan sosio-ekonomi, dan mengatasi potensi dampak lingkungan [37].
- Pengembangan, pemanenan, dan distribusi bioenergi menghadapi tantangan seperti kemajuan teknologi, masalah lingkungan, dan kelayakan ekonomi [38].

2.7 Sentra Pengguna Energi Dunia – Indonesia

Langkah awal dalam rangka mengkaji perdagangan biomassa padat pada tingkat global adalah mempelajari sentra wilayah yang menjadi produsen sekaligus konsumen. Materi yang mencakup di sentra wilayah adalah negara-negara yang menjadi produsen dan konsumen, serta nagara-negara yang lebih dominan sebagai konsumen seperti Jepang dan Korea Selatan. Langkah lanjutan adalah mengkaji peran dan manfaat adanya sentra wilayah tersebut terkait biomassa padat.

2.7.1 Wilayah Pengelola Biomassa Padat

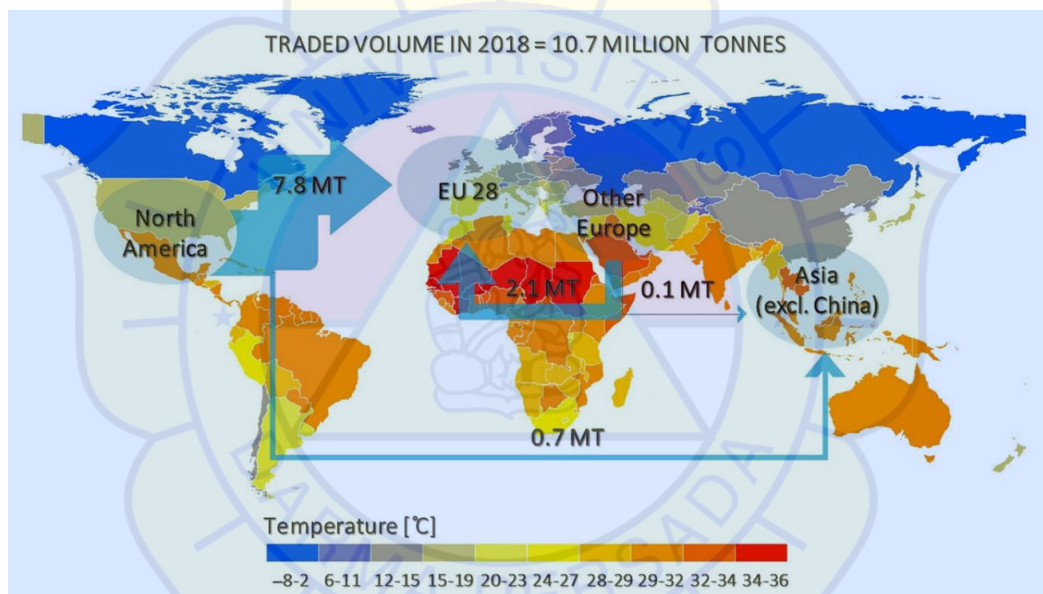
Kajian IEA Bioenergi, menunjukkan bahwa ada tiga sentra biomassa padat di dunia yaitu benua Amerika (USA dan Kanada), Eropa (mencakup 27 negara), dan Asia (Jepang, Korea Selatan, Cina, dan India).



Gambar 5. Produsen dan konsumne pelet kayu dunia. Sumber: <https://www.timber-online.net/energy/2023/11/strong-growth-in-asian-demand-for-pellets.html>*

Sentra wilayah produsen dan pengguna biomassa padat ini terkait erat dengan kebutuhan energi untuk mendukung aktivitas ekonomi negaranya. Terutama pada kebutuhan untuk industri otomotif dan transportasi, serta kebutuhan penerangan dan energi listrik bagi rumah tangga bagi warganya. Kondisi geografis wilayah juga menjadi faktor pendukung pembentukan sentra pengguna energi ini. Wilayah yang menjadi sentra konsumen adalah negara-negara yang memiliki empat musim

dimana pada saat musim dingin akan memerlukan pasokan energi. Salah satu solusinya adalah impor biomassa dari negara produsen yang umumnya berasal dari lintasan matahari (tropis). Hal ini dikecualikan pada pada USA dan Kanada serta Uni Soviet dan Ukraina yang memanfaatkan potensi hutannya dengan lestari untuk menjadi bahan baku industri pelet kayu. Ilustrasi lintasan biomassa padat berdasarkan pertimbangan musim melalui beda temperatur di dunia disajikan pada Gambar 2. Lintasan ini menjadi pemicu terjadinya perdagangan antar wilayah seperti produsen Eropa lain atau daratan ke Eropa Barat dan Timur, serta dari Jepang dan USA ke Asia (Jepang dan Korea Selatan).



Gambar 6. Lintasan biomassa padat karena letak geografis yang menjadi penyebab beda musim. Sumber: [70].

2.7.2 Identifikasi Negara Pengelola Industri Pelet Kayu

Pasar pelet kayu global telah mengalami pertumbuhan dan perkembangan yang signifikan selama dekade terakhir, didorong oleh berbagai faktor termasuk kebijakan energi terbarukan, insentif ekonomi, dan kemajuan teknologi. Berikut adalah gambaran terperinci tentang aspek-aspek utama dari pasar pelet kayu:

A. Produksi dan Konsumsi Global

Tren Produksi dan Konsumsi : Pada tahun 2010, produksi dan konsumsi pelet kayu global masing-masing sekitar 14,3 juta metrik ton (Mt) dan 13,5 Mt, dengan Uni Eropa (UE) menjadi pasar utama, bertanggung jawab atas hampir 61% produksi global dan 85% konsumsi [71]. Pada tahun 2015, produksi dan konsumsi global telah meningkat menjadi lebih dari 26 Mt [72].

Wawasan Regional: Uni Eropa: UE tetap menjadi konsumen dan produsen pelet kayu terbesar, didorong oleh target energi terbarukan yang ketat dan insentif bioenergi [71, 73]. **Amerika Utara:** Amerika Serikat dan Kanada adalah produsen yang signifikan, dengan AS menjadi produsen terbesar kedua secara global. AS Selatan telah menjadi pusat utama produksi pelet, terutama untuk ekspor ke UE [74–76]. **Asia Timur:** Diprediksi akan menjadi konsumen terbesar kedua setelah UE, menunjukkan pasar yang berkembang di kawasan ini [71]. **Amerika Latin:** Perspektif pembangunan masih belum jelas, dengan potensi pertumbuhan di masa depan [71].

B. Pendorong dan Faktor Pasar

- **Kebijakan dan Insentif Ekonomi:** Kebijakan energi terbarukan, seperti Arahan Energi Terbarukan UE, sangat penting dalam mendorong pasar. Insentif keuangan dan subsidi untuk proyek energi terbarukan juga memainkan peran penting [73, 77].
- **Kemajuan Teknologi:** Peningkatan teknologi pelet dan pengembangan sistem pemanas yang efisien telah berkontribusi pada pertumbuhan pasar [78, 79].
- **Ketersediaan Bahan Baku:** Ketersediaan bahan baku, seperti serbuk gergaji, residu kayu, dan penipisan kayu bulat, sangat penting untuk produksi. Daerah dengan sumber daya hutan yang melimpah, seperti Kanada dan AS Selatan, memiliki keunggulan kompetitif [74, 77, 80].

C. Kontrol dan Standar Kualitas

- **Jaminan Kualitas** : Memastikan kualitas pelet kayu sangat penting untuk penerimaan pasar dan kepatuhan lingkungan. Standar seperti DIN Plus, EN Plus, dan A1 digunakan untuk mensertifikasi kualitas pelet [75, 81, 82].
- **Kontaminan dan Kotoran**: Kehadiran kontaminan seperti kaca, plastik, dan logam dapat berdampak negatif pada kinerja pelet dan kelestarian lingkungan. Metode seperti mikroskop optik digunakan untuk mendeteksi kotoran ini [75].

D. Dampak Lingkungan dan Sosial-Ekonomi

- **Manfaat Lingkungan**: Pelet kayu dianggap sebagai sumber energi terbarukan dan berkelanjutan, berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca dan mitigasi perubahan iklim [73, 83].
- **Faktor Sosial-Ekonomi**: Perkembangan industri pelet kayu dapat memiliki dampak sosial-ekonomi yang signifikan, termasuk penciptaan lapangan kerja, pembangunan pedesaan, dan peningkatan ketahanan energi. Namun, hal ini juga dapat menimbulkan masalah keadilan lingkungan, terutama di daerah dengan fasilitas produksi terkonsentrasi [79, 84].

E. Prospek Masa Depan

- **Ekspansi Pasar**: Pasar pelet kayu diperkirakan akan terus berkembang, dengan meningkatnya permintaan dari pasar mapan dan negara berkembang. Pengembangan kebijakan yang mendukung dan perluasan kapasitas produksi adalah kunci untuk mempertahankan pertumbuhan ini [72, 85].
- **Peningkatan Teknologi dan Logistik**: Kemajuan berkelanjutan dalam teknologi produksi dan logistik akan meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan rantai pasokan pelet kayu [71, 78].

Tabel 2. 4 Ringkasan wilayah sentra pengelola biomassa dunia.

No	Wilayah	Produksi	Konsumsi	Pendorong Utama
1	Uni Eropa	Tinggi	Tinggi	Kebijakan energi terbarukan, insentif bioenergi
2	Amerika Utara	Tinggi	Moderat	Permintaan ekspor, bahan baku melimpah
3	Asia Timur	Tumbuh	Tumbuh	Potensi pasar negara berkembang
4	Amerika Latin	Jelas	Jelas	Potensi pertumbuhan di masa depan

Pasar pelet kayu (biomassa padat) siap untuk ekspansi berkelanjutan, didorong oleh kebijakan lingkungan, kemajuan teknologi, dan meningkatnya permintaan global akan sumber energi terbarukan.

Peran dan Manfaat Kehadiran Sentra Pengguna Pelet Kayu

Kehadiran sentra pengelola pelet kayu dunia, baik sebagai produsen maupun pengguna, memberikan peran dan manfaat pada industri bioenergi ini. Rincian peran dan manfaat bagi industri ini mencakup promosi energi terbarukan, standar kualitas dan sertifikasi, analisis dan pengembangan pasar, kemajuan teknologi, dukungan untuk sistem pemanasan, manfaat lingkungan dan ekonomi, dan mengatasi tantangan rantai pasokan. Ringkasan penjelasan disampaikan pada Tabel 2.5.

Tabel 2. 5. Ringkasan Fungsi dan Manfaat Sentra Pengguna Pelet Kayu

No.	Fungsi	Deskripsi	Abstrak Pendukung
1	Promosi Energi Terbarukan	Penggunaan pelet kayu untuk mengurangi ketergantungan bahan bakar fosil dan emisi gas rumah kaca	[86–88]
2	Standar Kualitas dan Sertifikasi	Memastikan kualitas pelet melalui standar sertifikasi	[82]
3	Analisis dan Pengembangan Pasar	Menganalisis pasar pelet kayu global dan dinamika perdagangan	[71, 80]

4	Kemajuan Teknologi	Mengembangkan peta jalan teknologi untuk inovasi industri	[89]
5	Dukungan untuk Sistem Pemanasan	Mempromosikan sistem pemanas pelet kayu untuk penggunaan perumahan dan komersial	[87]
6	Manfaat Lingkungan dan Ekonomi	Menyoroti keunggulan lingkungan dan ekonomi dari pelet kayu	[87]
7	Mengatasi Tantangan Rantai Pasokan	Meningkatkan efisiensi rantai pasokan di wilayah yang terkena dampak faktor-faktor seperti wabah hama	[86, 90]

Penjelasan Tabel 2.5 terkait fungsi dan manfaat kehadiran sentra pengelola biomassa padat sebagai berikut:

1. Promosi Energi Terbarukan: Pelet kayu semakin banyak digunakan sebagai sumber energi terbarukan untuk menggantikan bahan bakar fosil, berkontribusi pada pengurangan emisi gas rumah kaca dan kelestarian lingkungan [86–88].

2. Standar Kualitas dan Sertifikasi: Memastikan kualitas pelet kayu melalui standar sertifikasi seperti DIN Plus, EN Plus, dan A1 untuk menjaga pengoperasian boiler yang efisien dan meminimalkan emisi berbahaya [82].

3. Analisis dan Pengembangan Pasar: Menganalisis pasar pelet kayu global, termasuk dinamika produksi, konsumsi, dan perdagangan. Ini termasuk memahami faktor pasar, kebijakan, dan logistik rantai pasokan [71, 80].

4. Kemajuan Teknologi: Mengembangkan dan menerapkan peta jalan teknologi untuk mendukung industri pelet kayu, dengan fokus pada inovasi, efisiensi, dan keberlanjutan [89].

5. Dukungan untuk Sistem Pemanas Perumahan dan Komersial: Mempromosikan penggunaan pelet kayu dalam berbagai sistem pemanas, mulai dari kompor perumahan kecil hingga sistem pemanas distrik skala besar, dan memberikan panduan tentang pemasangan dan pengoperasian [87, 91].

6. Manfaat Lingkungan dan Ekonomi: Menyoroti manfaat lingkungan dari pelet kayu, seperti pengurangan emisi dan produksi abu, dan keunggulan ekonominya, termasuk daya saing biaya dan kemudahan penggunaan [87, 92].

7. Mengatasi Tantangan Rantai Pasokan: Mengevaluasi dan meningkatkan efisiensi rantai pasokan, terutama di daerah yang terkena dampak faktor-faktor seperti wabah hama, untuk memastikan pasokan bahan baku pelet kayu yang stabil [86, 90].

