

Terbit online pada laman: <https://ejurnal.umri.ac.id/index.php/JST>

Jurnal Surya Teknika

| ISSN (Print) 2354-6751 | ISSN (Online) 2723-7222 |



Research Article

Biomassa Sebagai Transisi Energi Terhadap Potensi, Daya Saing Ekonomi, dan Dampak Emisi

Jusnita^{1,*}, Resky Gerhana Hidayatullah², Dwi Annisa Fithry¹¹ Program Studi Mesin Otomotif, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Riau, Pekanbaru, Indonesia, 28294² Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Program Studi Teknik Elektro, Yogyakarta, Indonesia, 55281

INFORMASI ARTIKEL

Diserahkan : 28 Mei 2026
 Diterima : 28 Juni 2026
 Diterbitkan : 30 Juni 2026

KATA KUNCI

Biomass, Renewable Energy, Energy Transition, Gross External Damages, Indonesia

KORESPONDENSI

*E-mail: jusnita@umri.ac.id

A B S T R A K

Indonesia memiliki sumber daya biomassa yang melimpah dengan potensi besar untuk mendukung transisi menuju sistem energi yang berkelanjutan. Penelitian ini mengevaluasi potensi energi dari sumber-sumber biomassa utama di Indonesia, termasuk limbah kelapa sawit, residu padi, residu jagung, kotoran ternak, ampas tebu (bagasse), sampah padat perkotaan, dan residu singkong. Pendekatan kuantitatif dan kualitatif digunakan dengan memanfaatkan data statistik nasional, laporan pemerintah, serta literatur ilmiah. Potensi energi dihitung berdasarkan ketersediaan biomassa, nilai kalor, efisiensi konversi, dan kehilangan energi selama proses pemanfaatan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biomassa memiliki potensi untuk menghasilkan energi sebesar 30,76 GW, yang setara dengan 12,8% dari konsumsi energi final Indonesia pada tahun 2023. Limbah kelapa sawit memberikan kontribusi terbesar sebesar 13,34 GW, diikuti oleh residu padi sebesar 7,12 GW dan kotoran ternak sebesar 5,49 GW. Meskipun masih terdapat berbagai tantangan yang berkaitan dengan ketergantungan pada bahan bakar fosil, emisi gas rumah kaca, dan deforestasi, biomassa menawarkan alternatif sumber energi yang menjanjikan. Selain itu, analisis Gross External Damages (GED) menunjukkan bahwa biomassa lebih kompetitif secara ekonomi dibandingkan bahan bakar fosil apabila biaya lingkungan turut diperhitungkan. Temuan ini menegaskan peran strategis biomassa dalam mendukung transisi energi berkelanjutan di Indonesia, mitigasi perubahan iklim, serta peningkatan kesejahteraan masyarakat.

A B S T R A C T

Indonesia possesses abundant biomass resources with significant potential to support the transition toward a sustainable energy system. This study evaluates the energy potential of major biomass resources in Indonesia, including oil palm residues, rice residues, corn residues, livestock manure, sugarcane bagasse, municipal solid waste, and cassava residues. A combination of quantitative and qualitative approaches was employed using national statistical data, government reports, and scientific literature. Energy potential was estimated based on biomass availability, calorific value, conversion efficiency, and energy losses during utilization. The results show that biomass has the potential to generate 30.76 GW of energy, equivalent to 12.8% of Indonesia's final energy consumption in 2023. Oil palm residues provide the largest contribution (13.34 GW), followed by rice residues (7.12 GW) and livestock manure (5.49 GW). Despite ongoing challenges related to fossil fuel dependence, greenhouse gas emissions, and deforestation, biomass offers a promising alternative energy source. Furthermore, the Gross External Damages (GED) analysis indicates that biomass is more economically competitive than fossil fuels when environmental costs are considered. These findings highlight the strategic role of biomass in supporting Indonesia's sustainable energy transition, climate change mitigation, and societal welfare improvement.

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki potensi besar dalam mengembangkan energi terbarukan, termasuk biomassa, sebagai bagian dari upaya transisi menuju sistem energi berkelanjutan. Biomassa merupakan sumber daya yang melimpah di Indonesia, dengan kontribusi signifikan dari limbah pertanian, peternakan, perkebunan, dan sampah organik perkotaan [1].

Pemerintah telah menetapkan target ambisius untuk mencapai 23% energi terbarukan dalam bauran energi nasional pada tahun 2025 dan paling sedikit 31 % pada tahun 2050 [2][3]. Namun, pencapaian target ini menghadapi tantangan besar, termasuk keterbatasan infrastruktur, ketidakpastian regulasi, dan dominasi bahan bakar fosil dalam sektor energy [4].

Biomassa tidak hanya menyediakan alternatif energi yang berkelanjutan tetapi juga berkontribusi dalam pengelolaan limbah yang lebih baik dan mitigasi perubahan iklim [5]. Studi-studi sebelumnya menunjukkan bahwa integrasi biomassa ke dalam sistem energi nasional dapat mendukung pengurangan emisi karbon secara signifikan, terutama melalui teknologi konversi yang efisien seperti pembakaran langsung, gasifikasi, dan konversi menjadi biofuel [6].

Selain itu, upaya peningkatan nilai tambah limbah biomassa, seperti jerami padi dan kotoran ternak, melalui pendekatan ekonomi sirkular telah terbukti mendukung kesejahteraan masyarakat pedesaan [5].

Namun, terdapat kesenjangan antara potensi biomassa yang tersedia dan pemanfaatannya secara efektif. Salah satu penyebab utama adalah kurangnya data teknis yang komprehensif dan sistematis tentang karakteristik biomassa di Indonesia [7].

Kegagalan dalam pelaksanaan proyek energi terbarukan di Indonesia sering kali mengungkap ketidaksesuaian antara kebijakan, teknologi, dan kebutuhan masyarakat, menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih terintegrasi dan adaptif [8]. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi potensi biomassa sebagai sumber energi terbarukan, dengan fokus pada estimasi kuantitatif dan kualitatif, untuk mendukung perencanaan energi nasional yang lebih berkelanjutan. Studi ini juga akan menganalisis posisi Indonesia dalam konteks energi global, mengeksplorasi apakah kebijakan dan praktik saat ini mendukung transisi menuju sistem energi yang lebih efisien dan berkelanjutan.

2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dan kualitatif untuk mengestimasi potensi energi terbarukan dari berbagai jenis biomassa di Indonesia,

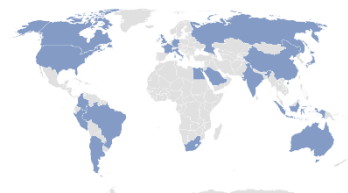
termasuk limbah pertanian, peternakan, perkebunan, dan sampah perkotaan. Pengumpulan data dilakukan melalui analisis literatur, studi statistik, dan laporan resmi dari instansi pemerintah terkait.

Untuk setiap jenis biomassa, perhitungan potensi energi dilakukan dengan menggunakan nilai kalor spesifik, konversi energi rata-rata, dan faktor kehilangan selama proses transmisi, seperti yang dijelaskan dalam persamaan matematis yang relevan. Selain itu, analisis spasial dilakukan dengan memanfaatkan data peta wilayah untuk mengidentifikasi distribusi produksi biomassa secara geografis.

Efisiensi energi dan estimasi realisasi daya dihitung berdasarkan faktor konversi dan kehilangan energi dengan pendekatan konservatif guna memberikan gambaran potensi energi yang realistis. Validasi data dilakukan melalui perbandingan dengan hasil penelitian sebelumnya dan laporan resmi dari badan internasional. Proses analisis difokuskan pada evaluasi kontribusi masing-masing biomassa terhadap bauran energi nasional, dengan mempertimbangkan aspek keberlanjutan dan dampak lingkungan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 1 menunjukkan peta negara-negara yang dibahas dalam penelitian ini sebagai referensi perbandingan dalam aspek efisiensi energi, intensitas energi, dan kontribusi energi terbarukan terhadap bauran energi global.



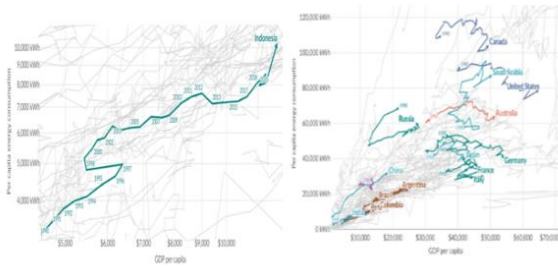
Gambar 1. Peta Negara Dalam Penelitian

1.1. Posisi Indonesia Dalam Energi

Dari perspektif hubungan antara tingkat pendapatan per kapita (PDB per kapita) dan konsumsi energi per kapita, Gambar 2 menunjukkan bahwa peningkatan PDB umumnya berbanding lurus dengan kenaikan konsumsi energi per kapita. Negara-negara maju, seperti Amerika Serikat, Kanada, atau Arab Saudi, umumnya berada pada konsumsi energi yang sangat tinggi dengan PDB yang juga tinggi.

Di sisi lain, negara-negara berkembang mengalami peningkatan energi yang lebih moderat seiring pertumbuhan pendapatan. Dalam konteks ini, posisi Indonesia tergolong relatif seimbang meskipun PDB per kapita meningkat sejak 1990, konsumsi energi per kapita tidak mengalami eskalasi yang berlebihan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa pertumbuhan ekonomi Indonesia tidak semata-mata didorong oleh

peningkatan konsumsi energi yang tidak terkontrol, melainkan berlangsung dalam koridor penggunaan energi yang lebih terkendali.

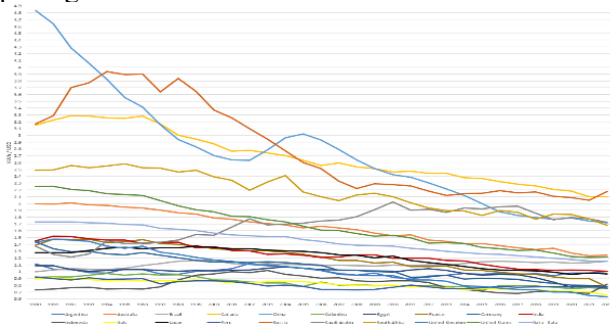


Gambar 2. Penggunaan $\frac{\text{Energi}}{\text{Orang}}$ vs $\frac{\text{PDB}}{\text{Kapita}}$ (U.S. Energy Information Administration, Energy Institute - Statistical Review of World Energy, Bolt and van Zanden - Maddison Project Database, 2023)

Tren intensitas energi yang tergambar pada gambar 3 yakni rasio jumlah energi yang digunakan untuk menghasilkan setiap unit output ekonomi menunjukkan bahwa hampir seluruh negara berupaya menurunkan intensitas energi. Negara-negara dengan intensitas energi tinggi di awal periode 1990-an, seperti Rusia atau Tiongkok, menampilkan penurunan tajam sejalan dengan modernisasi teknologi dan restrukturisasi ekonomi.

Sementara itu, negara-negara maju di Eropa Barat, Jepang, serta Inggris, yang telah memiliki tingkat efisiensi relatif tinggi sejak awal, umumnya mempertahankan tren penurunan pada tingkat yang lebih rendah tetapi stabil. Indonesia sendiri menempati posisi menengah-bawah, menunjukkan bahwa intensitas energinya sudah relatif efisien jika dibandingkan dengan banyak negara lain.

Tren penurunan konsisten yang dialami Indonesia menandakan bahwa industrialisasi dan pertumbuhan ekonomi selama tiga dekade terakhir tidak disertai lonjakan intensitas energi, melainkan justru peningkatan efisiensi dari waktu ke waktu.

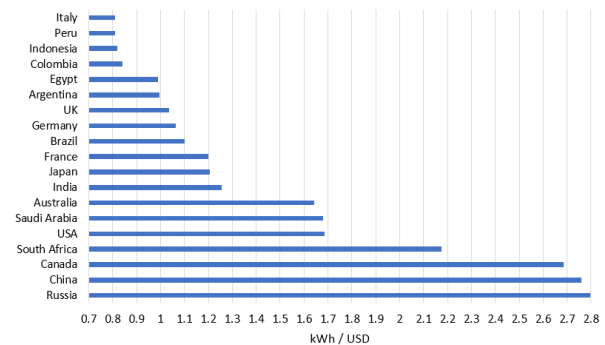


Gambar 3. Tren Intensitas Energi Ekonomi per Kapita

Gambar 4, yang membandingkan rata-rata intensitas energi sepanjang 1990–2022, memposisikan Indonesia secara kompetitif di antara negara-negara lain. Jika negara-negara besar seperti Rusia, Tiongkok, dan Kanada masih memerlukan energi yang relatif tinggi untuk menghasilkan setiap unit

output ekonomi, Indonesia dapat disandingkan dengan negara-negara yang lebih efisien seperti Italia dan Peru. Italia, sebagai negara maju, mencapai intensitas energi rendah melalui kemajuan teknologi, regulasi ketat, dan infrastruktur energi yang matang.

Sementara itu, keberadaan Indonesia dalam kelompok ini, meskipun masih dalam kategori negara berkembang, menandakan bahwa upaya efisiensi energi, diversifikasi bauran energi, serta pengendalian konsumsi energi yang dilakukan mampu menjaga intensitas energi pada level yang kompetitif.



Gambar 4. Efisiensi Penggunaan Energi Dalam Menghasilkan Nilai Ekonomi per Kapita Rata Rata Dari Tahun 1990 sampai 2022

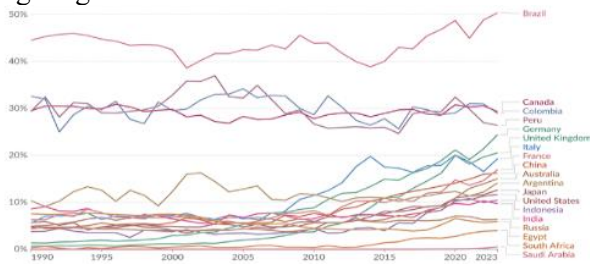
Secara keseluruhan, ketiga visualisasi data tersebut menggarisbawahi bahwa posisi Indonesia dalam konteks konsumsi energi sejak awal 1990 an telah relatif rendah bila dibandingkan negara-negara maju. Hal ini berdampak pada pola perubahan intensitas energi hingga tahun 2022, di mana negara-negara maju yang memulai dengan tingkat konsumsi energi per kapita sangat tinggi memiliki ruang lebih luas untuk menunjukkan penurunan signifikan. Sebaliknya, karena Indonesia tidak memulai dari posisi yang terlalu tinggi, peluang untuk penurunan drastis pun lebih terbatas. Kendati demikian, tren penurunan intensitas energi Indonesia tetap positif, meski tidak setajam negara-negara dengan tingkat konsumsi awal yang tinggi.

Peningkatan efisiensi energi ini menunjukkan bahwa seiring pertumbuhan ekonomi, penggunaan energi Indonesia tetap terkendali. Dengan kata lain, Indonesia sejak awal telah berada pada landasan yang relatif efisien, sehingga peningkatan efisiensi energi yang terjadi bersifat evolusioner dan tidak memerlukan perbaikan drastis seperti halnya negara-negara yang memulai dari tingkat konsumsi energi yang jauh lebih tinggi.

Dari sisi bauran energi, pada Gambar 5 konsumsi energi primer dari sumber terbarukan, terlihat bahwa energi sejak awal dekade 1990-an hingga memasuki tahun 2020-an, banyak negara menunjukkan upaya transisi menuju penggunaan energi yang lebih bersih dan berkelanjutan. Beberapa negara seperti Brazil secara

konsisten memimpin dalam integrasi energi terbarukan ke dalam pasokan energi primernya, dengan pangsa yang mendekati, bahkan melampaui, 50%. Di sisi lain, negara-negara maju seperti Kanada, Inggris, dan Jerman mempertahankan porsi energi terbarukan yang cukup signifikan, umumnya di atas 20% hingga 30%. Dalam konteks ini, Indonesia memulai dengan basis yang sangat rendah pada tahun 1990-an, di mana konsumsi energi terbarukan sebagai bagian dari total energi primernya masih sangat terbatas.

Meskipun tren peningkatan konsumsi energi terbarukan di Indonesia tidak setajam negara-negara yang telah lama berinvestasi dalam teknologi hijau dan infrastruktur energi bersih, pergerakan yang terjadi dalam dua dekade terakhir menunjukkan kenaikan yang nyata. Peningkatan ini, meski masih kecil dan belum mendekati pencapaian negara-negara pemimpin, menjadi indikasi bahwa terdapat langkah-langkah kebijakan serta dorongan pasar ke arah diversifikasi sumber energi yang lebih ramah lingkungan.



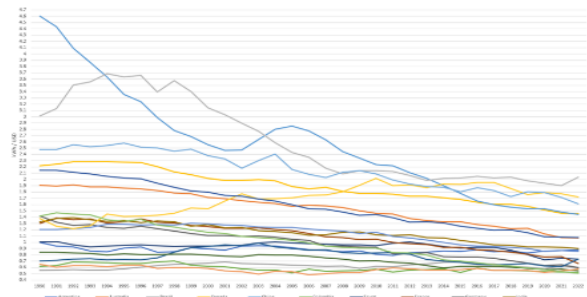
Gambar 5. Konsumsi Energi Primer Dari Energi Terbarukan [9].

Sementara itu, dari perspektif pemanfaatan energi non-terbarukan untuk menghasilkan nilai ekonomi, tren intensitas energi non-terbarukan (kWh/USD) antarnegara selama periode 1990 hingga 2022 seperti ditunjukkan pada Gambar 6. Negara-negara yang pada awal 1990-an bertumpu pada konsumsi energi fosil dengan intensitas yang sangat tinggi, seperti Rusia atau China, mengalami penurunan drastis seiring proses industrialisasi yang semakin efisien, adopsi teknologi hemat energi, serta kebijakan yang membatasi penggunaan bahan bakar fosil secara berlebihan.

Di antara negara maju yang tingkat efisiensinya sejak awal sudah cukup baik misalnya Italia, Jepang, dan Inggris penurunan intensitas energi non-terbarukan tidak seheran pada negara-negara yang memulai dari posisi boros energi, karena mereka telah berada pada baseline konsumsi yang relatif efisien. Di sinilah posisi Indonesia menjadi relevan sejak awal, konsumsi energi non-terbarukan Indonesia dalam proses pembangunan ekonominya termasuk rendah jika dibandingkan dengan negara-negara yang memiliki beban konsumsi energi tinggi. Akibatnya, laju penurunan intensitas energi Indonesia tidak tampak sedramatis negara-negara yang memulai dari

titik konsumsi tinggi, karena ruang penurunan yang tersedia memang tidak sebesar itu. Namun, hal ini justru menekankan bahwa efisiensi energi Indonesia, meski meningkat secara perlahan, telah berjalan di atas fondasi yang sejak awal tidak berlebihan.

Secara komparatif, ketika kita melihat rata-rata penggunaan energi non-terbarukan per unit nilai ekonomi sepanjang tiga dekade seperti ditunjuk pada Gambar 6, Indonesia berada dalam kelompok negara dengan tingkat intensitas energi yang relatif efisien, termasuk sebanding dengan beberapa negara Amerika Latin seperti Peru dan Kolombia, maupun Italia yang merupakan representasi negara berteknologi maju.

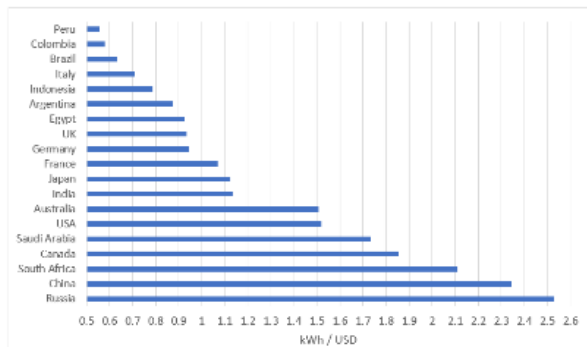


Gambar 6. Tren Konsumsi Energi Dalam Menghasilkan Nilai Ekonomi per Kapita Dari Non Energi Terbarukan

Dengan kata lain, sementara beberapa negara menonjol dengan pencapaian energi terbarukan yang luar biasa tinggi (seperti Brazil) atau dengan pengurangan intensitas energi non-terbarukan yang sangat signifikan (seperti Rusia atau China), Indonesia menempati posisi yang lebih moderat, namun tidak kalah penting. Indonesia tidak memulai dari situasi “ekstrem” sehingga tidak memiliki ruang sebesar negara lain untuk menurunkan intensitas energi hingga tampak sangat drastis.

Sebaliknya, Indonesia perlahan namun pasti menunjukkan bahwa pertumbuhan ekonominya tidak harus selalu dikaitkan dengan lonjakan konsumsi energi fosil yang berlebihan. Walaupun pangsa energi terbarukan masih perlu ditingkatkan secara agresif dan intensitas energi non-terbarukan masih dapat terus ditekan, pencapaian yang ada saat ini mengindikasikan adanya langkah positif ke arah pengembangan sistem energi yang lebih berkelanjutan dan efisien.

Dengan dukungan kebijakan yang tepat, inovasi teknologi, serta investasi dalam infrastruktur energi bersih, Indonesia berpotensi untuk meningkatkan pangsa energi terbarukan dalam bauran energinya dan menekan konsumsi energi non-terbarukan per unit nilai ekonomi lebih lanjut, sehingga dapat bersaing dengan negara-negara yang telah terlebih dahulu memimpin transisi energi global.



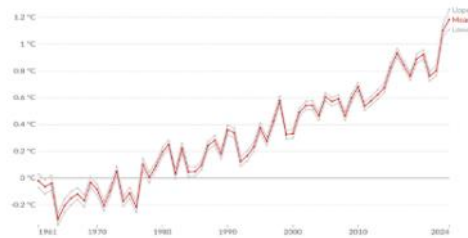
Gambar 7. Rata-Rata Konsumsi Energi Non Terbarukan Dalam Menghasilkan Nilai Ekonomi per Kapita Rentang Tahun 1990 sampai 2022

Secara keseluruhan, temuan-temuan ini menunjukkan bahwa posisi Indonesia dalam konteks konsumsi dan efisiensi energi relatif moderat namun stabil, meski masih banyak ruang untuk peningkatan energi terbarukan. Pada saat yang sama, penting untuk menekankan bahwa negara-negara dengan teknologi maju tidak seharusnya menjadikan transisi energi sebagai instrumen untuk memperoleh keuntungan dari negara berkembang.

Negara seperti Tiongkok, Amerika Serikat, Australia, dan Kanada, hingga saat ini masih mengandalkan energi fosil dalam volume yang lebih tinggi. Selain itu, tidak dapat dipungkiri bahwa negara-negara maju di masa lalu telah menggunakan energi non-terbarukan secara berlebihan, meninggalkan jejak lingkungan yang merugikan. Oleh sebab itu, keadilan harus menjadi landasan dalam menilai konsumsi energi di tingkat global. Sebagai bagian dari tanggung jawab historis tersebut, negara-negara maju seharusnya memberikan subsidi serta melakukan transfer teknologi energi bersih kepada negara berkembang, bukan sekadar mendorong pengurangan konsumsi fosil secara drastis tanpa dukungan. Dengan langkah-langkah tersebut, proses transisi energi dapat berlangsung lebih adil, efektif, dan berkelanjutan bagi semua pihak.

1.2. Kontribusi Terhadap Perubahan Iklim

Perubahan iklim saat ini merupakan salah satu tantangan terbesar yang dihadapi umat manusia, dan pemahaman mengenai kontribusi berbagai negara terhadap dinamika ini tidak dapat dilepaskan dari analisis komprehensif atas tren suhu, emisi gas rumah kaca, emisi per kapita, serta kondisi ekosistem seperti hutan. Berdasarkan kelima set data yang disajikan, gambaran menyeluruh yang terbentuk menunjukkan bahwa faktor-faktor tersebut saling berkaitan dalam membentuk lanskap iklim global yang semakin kompleks dan rentan.

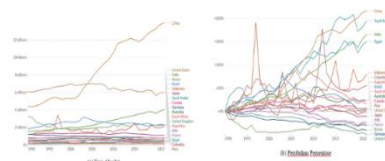


Gambar 8. Anomali Suhu Rata-Rata Global (1961–2024)[10].

Gambar 8 Grafik anomali suhu rata-rata global (1961–2024) memperlihatkan bahwa laju kenaikan suhu secara konsisten berada di atas ambang historis normal, mencerminkan efek terakumulasi dari aktivitas manusia terhadap sistem iklim. Kenaikan suhu tersebut tidak semata-mata respons terhadap satu variabel tunggal, melainkan hasil interaksi multifaktorial.

Emisi gas rumah kaca, terutama dari pembakaran bahan bakar fosil dan perubahan penggunaan lahan, berkontribusi langsung pada peningkatan konsentrasi CO_2 , CH_4 , dan N_2O di atmosfer. Data emisi gas rumah kaca lintas negara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 9. menampilkan pada pergeseran dominasi emisi global: Amerika Serikat dan negara-negara Eropa Barat yang sebelumnya mendominasi emisi global pada abad ke-20, kini relatif lebih stabil atau bahkan menurun seiring berbagai kebijakan efisiensi energi, substitusi bahan bakar fosil dengan sumber terbarukan, serta penerapan standar lingkungan yang ketat.

Di sisi lain, negara-negara dengan pertumbuhan ekonomi pesat, seperti China, India, dan Indonesia, memperlihatkan tren kenaikan emisi yang signifikan, terlepas dari fakta bahwa tingkat emisi kumulatif historisnya masih lebih rendah dibandingkan negara maju. Fenomena ini menunjukkan bahwa arsitektur ekonomi global yang berubah termasuk relokasi industri dan peningkatan konsumsi domestik turut membentuk konstelasi baru sumber-sumber emisi gas rumah kaca.

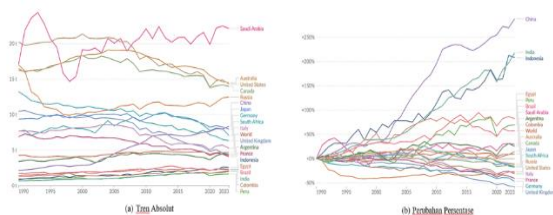


Gambar 9. Emisi Gas Rumah Kaca: (a) tren absolut berbagai negara dari 1990 hingga 2022, (b) perubahan persentase relatif terhadap tahun 1990 [11].

Melangkah ke tingkat analisis yang lebih mendetail, pengamatan terhadap emisi CO_2 per kapita seperti yang ditunjukkan Gambar 10 menawarkan dimensi tambahan dalam memahami tanggung jawab dan intensitas kontribusi setiap negara. Sejumlah

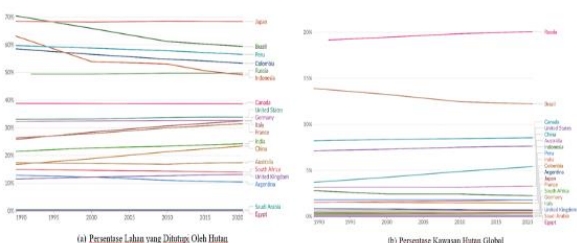
negara maju, seperti Amerika Serikat, Australia, dan Kanada, memiliki tingkat emisi per kapita yang secara historis tinggi. Meski beberapa di antaranya mulai menurun, catatan historis menunjukkan bahwa per kapita, penduduk di negara-negara tersebut sejak lama menikmati standar hidup tinggi yang ditopang oleh konsumsi energi fosil dalam jumlah besar. Sebaliknya, peningkatan emisi per kapita di negara-negara berkembang termasuk China, India, dan Indonesia—baru terjadi dalam beberapa dekade terakhir seiring dengan upaya peningkatan taraf hidup, industrialisasi, dan urbanisasi.

Fakta ini menimbulkan pertanyaan mendasar tentang keadilan iklim: sejauh mana negara-negara berkembang dapat membangun ekonomi mereka tanpa mengulang pola pencemaran yang sama seperti yang telah terjadi di negara maju pada masa lalu?



Gambar 10. Emisi CO₂ per Kapita: (a) tren absolut berbagai negara dari 1990 hingga 2023, (b) perubahan persentase relatif terhadap tahun 1990 [12].

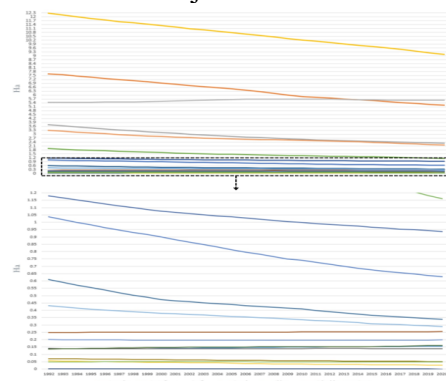
Di samping isu emisi, aspek ekosistem seperti hutan juga berperan krusial dalam siklus karbon global. Data mengenai cakupan hutan pada berbagai negara antara 1990 hingga 2020 seperti ditunjukkan pada Gambar 11 mengindikasikan bahwa daerah tropis, yang seharusnya berfungsi sebagai penyerap karbon alami (carbon sink), justru mengalami penurunan penutupan hutan yang signifikan. Brasil dan Indonesia, dua negara yang dikenal memiliki kekayaan hutan tropis, menunjukkan tren deforestasi yang mengkhawatirkan. Kondisi ini tidak hanya mengurangi kapasitas biosfer dalam menyerap CO₂, tetapi juga mengancam keanekaragaman hayati dan stabilitas sistem iklim regional. Sementara itu, beberapa negara beriklim sedang atau dingin, seperti beberapa negara Eropa dan Amerika Utara, cenderung lebih mampu mempertahankan atau sedikit meningkatkan luas hutan mereka, meskipun seringkali penambahan tersebut tidak sebanding dengan laju kehilangan hutan di wilayah tropis, baik dari segi skala maupun kualitas ekosistemnya.



Gambar 11. Kontribusi dan Cakupan Hutan masing masing negara (1990–2020): (a) luas hutan terhadap total luas daratan, (b) kontribusi terhadap total luas hutan global [13].

Integrasi kelima aspek anomali suhu, laju emisi global, emisi per kapita, deforestasi, dan kapasitas penyerapan karbon oleh hutan menggarisbawahi bahwa kontribusi terhadap perubahan iklim adalah fenomena yang multidimensional. Tidak ada satu indikator tunggal yang dapat secara adil dan tuntas menjelaskan tingkat tanggung jawab suatu negara. Sebaliknya, diperlukan pendekatan holistik yang mempertimbangkan faktor historis, tingkat pembangunan ekonomi, inovasi teknologi, keberlanjutan sistem energi, serta pengelolaan sumber daya alam. Negara negara maju, meskipun mungkin berhasil menurunkan emisi dalam beberapa dekade terakhir, tetap memiliki “utang karbon” historis yang tidak dapat diabaikan begitu saja.

Sementara itu, negara negara berkembang menghadapi dilema kompleks: mereka perlu meningkatkan kesejahteraan dan membangun infrastruktur ekonomi tanpa mengorbankan kondisi iklim global yang sudah rapuh. Situasi ini menuntut suatu kerangka kerja internasional yang adil dan fleksibel, di mana negara negara dengan kapasitas teknologi dan finansial lebih kuat memberikan dukungan dan insentif bagi negara negara berkembang untuk bertransisi menuju ekonomi rendah karbon.



Gambar 12. Kawasan Hutan Per Kapita

Dalam konteks Kesepakatan Paris dan kerangka Perjanjian Iklim PBB (UNFCCC), data data tersebut menjadi landasan penting untuk memformulasikan kebijakan mitigasi dan adaptasi iklim yang komprehensif. Strategi transisi energi, konservasi hutan, peningkatan efisiensi energi, dan pengembangan teknologi penyerapan karbon semuanya memerlukan pengetahuan yang mendalam tentang bagaimana masing masing negara berkontribusi terhadap perubahan iklim.

Dengan memandang data ini secara terpadu, pembuat kebijakan, peneliti, dan masyarakat global dapat membangun narasi yang lebih seimbang dan proporsional tentang tanggung jawab serta peran

setiap negara, sehingga solusi yang dihasilkan bukan hanya efektif dari sudut pandang teknis, tetapi juga adil dalam konteks sosial, ekonomi, dan moral.

Pada akhirnya, interpretasi menyeluruh dari kelima visualisasi ini menegaskan bahwa tantangan perubahan iklim tidak dapat diatasi dengan pendekatan sepihak. Ia membutuhkan kolaborasi internasional yang erat, pertukaran teknologi yang adil, pembiayaan yang memadai, serta komitmen politik yang kuat. Hanya dengan demikian kita dapat berharap untuk menurunkan laju pemanasan global, menstabilkan sistem iklim, serta melindungi generasi mendatang dari ancaman lingkungan yang kian hari kian intensif.

1.3. Potensi & Realisasi Biomass Indonesia

3.1. 3.3.1. Limbah Kelapa Sawit

Indonesia merupakan negara dengan luas perkebunan kelapa sawit terbesar di dunia, mencapai total 16,83 juta hektar pada tahun 2022. Berdasarkan Gambar 13, data tersebut menunjukkan tren peningkatan potensi seiring waktu. Pada tahun yang sama, produksi Crude Palm Oil (CPO) nasional mencapai 46,82 juta ton. ton per tahun menurut data Kementerian Pertanian Indonesia. Meskipun produksi CPO menunjukkan fluktuasi, dalam delapan tahun terakhir terjadi peningkatan produksi sebesar 48,43%, yang mengindikasikan bahwa potensi energi dari kelapa sawit di Indonesia bersifat berkelanjutan karena melebihi laju pertumbuhan penduduk di Indonesia.

Limbah industri kelapa sawit, seperti tandan kosong, serat mesokarp, dan cangkang sawit, memiliki nilai energi yang dapat dikonversi menjadi berbagai bentuk energi terbarukan, termasuk listrik, bahan bakar cair, gas, serta padat (untuk keperluan memasak atau penghangat. Potensi energi yang dapat dimanfaatkan dari limbah kelapa sawit dapat dihitung dengan Potensi energi yang dapat dimanfaatkan dari limbah kelapa sawit dapat dihitung dengan mengestimasi jumlah limbah yang dihasilkan serta nilai kalor masing masing jenis limbah.

Rendemen Crude Palm Oil (CPO) dari tandan buah segar kelapa sawit berkisar antara 19,68% hingga 27%, tergantung pada tahun tanam dan tingkat kematangan buah [14]. Selain itu, dari tandan buah segar kelapa sawit dihasilkan berbagai produk sampingan, yaitu tandan kosong sebesar 22,48%, serat mesokarp sebesar 15,58%, dan cangkang sebesar 6,03% [15]. Nilai kalor tandan kosong yang diperoleh melalui proses torrefaksi menggunakan reaktor Counter Flow Multi Baffle mencapai 17,90 MJ/kg [16], sedangkan nilai kalor serat mesokarp dan cangkang kelapa sawit masing masing adalah 18,3 MJ/kg dan 18,5 MJ/kg. Berdasarkan data tersebut,

estimasi ketersediaan berat limbah kelapa sawit dapat dilakukan sebagai berikut;

$$product (ton) = TBS (ton) \times product(\%) \quad (1)$$

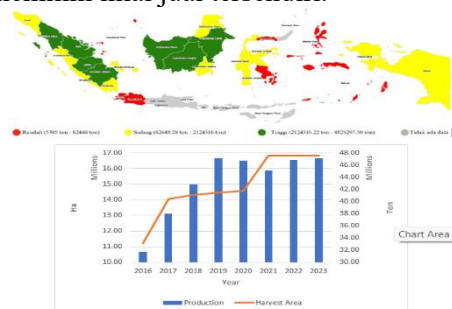
$$TBS (ton) = \frac{Total \text{ Produksi CPO } (ton)}{CPO (\%)} \quad (2)$$

Pada tahun 2022, produksi Tandan Buah Segar (TBS) mencapai sekitar 234,10 juta ton dengan estimasi rendemen Crude Palm Oil (CPO) sebesar 20%. Limbah yang dihasilkan meliputi tandan kosong 52,63 juta ton, serat mesokarp 36,47 juta ton, dan cangkang 14,12 juta ton. Penghitungan realisasi energi memerlukan pertimbangan beberapa faktor, seperti konversi energi dan kehilangan energi yang terjadi. Faktor faktor tersebut memiliki nilai yang bervariasi tergantung pada metode dan kondisi yang digunakan; oleh karena itu, dilakukan pendekatan dengan menggunakan nilai asumsi umum. Untuk menghitung nilai realisasi energi, dapat digunakan persamaan berikut;

$$P = \frac{\left(\frac{\sum (m_{prod} \times HV) \times \eta}{3.6 \times 10^6} \right) \times (1-L)}{t} \quad (3)$$

Dimana P adalah daya rata rata (GW), m_{prod} adalah Massa limbah (kg), HV adalah nilai kalor (MJ/kg), η adalah Efisiensi konversi (%) mencerminkan rasio energi yang berhasil dikonversi menjadi listrik, L merepresentasikan losses (%) yang terjadi, konstanta 3.6×10^6 digunakan untuk mengonversi energi dari megajoule ke megawatt jam, t adalah waktu dalam setahun (hours).

Dengan asumsi efisiensi konversi sebesar 25%, yang merupakan rasio energi yang berhasil dikonversi menjadi listrik, serta kehilangan energi sebesar 10% selama proses transmisi, realisasi energi yang diperoleh mencapai 13,34 GW. Realisasi energi ini tergolong relatif kecil bila dibandingkan dengan penelitian lain, hal ini disebabkan oleh metode perhitungan yang mempertimbangkan estimasi realisasi terendah dengan memasukkan berbagai faktor yang dapat mengurangi potensi energi yang umumnya terjadi dalam kondisi aktual. Selain itu, daya rata rata yang diperoleh tidak mencerminkan nilai keseluruhan dari potensi kelapa sawit seperti Crude Palm Oil (CPO), karena CPO bukanlah limbah dan memiliki nilai jual tersendiri.



Gambar 13. Produksi CPO dan Luas Area Kelapa Sawit Indonesia

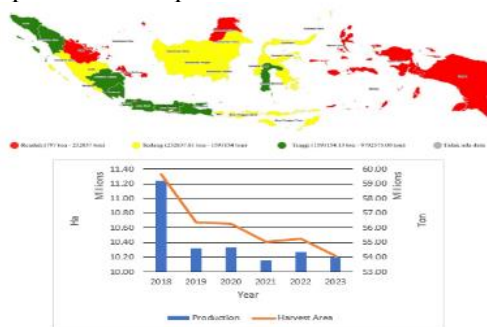
3.3.2. Padi

Padi merupakan komoditas pangan strategis di Indonesia yang berperan penting dalam ketahanan pangan dan perekonomian nasional. Pada tahun 2022, produksi padi nasional mencapai 54,75 juta ton dengan luas panen 10,45 juta hektar berdasarkan data Kementerian Pertanian Indonesia (Gambar 14). Selain sebagai sumber pangan, padi menghasilkan limbah berupa jerami dan sekam yang berpotensi dimanfaatkan sebagai biomassa. Setiap kilogram padi menghasilkan sekitar 0,41–3,96 kg jerami dan 20–33% sekam dari berat gabah (Pode, 2016).

Nilai kalor jerami berkisar 14,08–15,09 MJ/kg (Arianti et al., 2024), sedangkan sekam memiliki nilai kalor 13,4–17,4 MJ/kg [17]. Berdasarkan data tersebut, potensi ketersediaan jerami dan sekam dapat diestimasi sebagai berikut:

$$\text{prod (ton)} = \text{prod (\%)} \times \text{total prod (ton)} \quad (4)$$

Pada tahun 2022, limbah padi diperkirakan menghasilkan 10,95 juta ton sekam dan 76,65 juta ton jerami. Dengan nilai kalor masing-masing 16 MJ/kg dan 14 MJ/kg serta mempertimbangkan efisiensi konversi energi dan kehilangan transmisi, potensi energi yang dapat dimanfaatkan mencapai 7,12 GW. Namun, tren penurunan produksi padi sebesar 8,84% dan luas panen sebesar 9,91% selama periode 2018–2023 berpotensi mengurangi ketersediaan biomassa sebagai sumber energi terbarukan di masa depan, terutama di tengah meningkatnya kebutuhan energi akibat pertumbuhan penduduk.

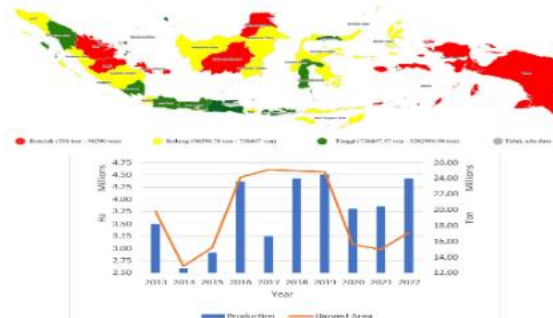
**Gambar 14.** Produksi dan Luas Area Padi Indonesia (KEMENTERIAN PERTANIAN REPUBLIK INDONESIA, 2024)

3.3.3. Jagung

Pada tahun 2022, produksi jagung Indonesia mencapai 24,02 juta ton dengan luas panen 3,32 juta hektar berdasarkan data Kementerian Pertanian Indonesia. Produksi jagung selama 2013–2022 berfluktuasi secara signifikan, dengan peningkatan tertinggi pada 2016 dan penurunan tajam pada 2014 serta 2020. Fluktuasi ini memengaruhi ketersediaan limbah jagung sebagai biomassa, sehingga stabilitas

produksi menjadi faktor penting dalam pemanfaatannya sebagai sumber energi terbarukan.

Menurut Kerdsuwan dan Laohalidanond [18], limbah sampah, kulit, dan batang jagung mencapai 176–195% dari produksi jagung, sedangkan tongkol sekitar 19%, dengan nilai kalor masing-masing 13–15 MJ/kg dan 15–16 MJ/kg.

**Gambar 15.** Produksi dan Luas Area Jagung Indonesia

3.2. 3.3.4. Kotoran Ternak

Indonesia memiliki populasi ternak yang besar dan beragam sehingga mampu memenuhi kebutuhan domestik. Berdasarkan data Kementerian Pertanian tahun 2022, produksi ternak nasional didominasi oleh ayam pedaging, diikuti ayam buras, sapi potong, kambing, domba, babi, kerbau, dan sapi perah. Selama periode 2016–2022, produksi ternak menunjukkan tren yang bervariasi, dengan peningkatan pada ayam pedaging, ayam buras, sapi potong, dan kambing, sedangkan sapi perah, dan kerbau, cenderung menurun, sementara domba berfluktuasi.

Kondisi ini menunjukkan bahwa limbah ternak dari komoditas yang produksinya meningkat memiliki potensi besar sebagai sumber energi terbarukan, sedangkan komoditas dengan tren produksi menurun memerlukan strategi pengelolaan yang tepat agar pemanfaatan limbah ternak tetap berkelanjutan dalam mendukung penyediaan energi.

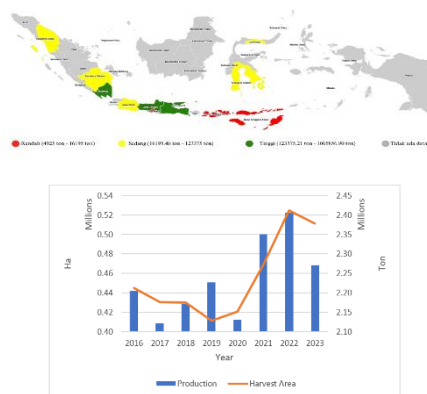
Tabel 1. Produksi Kotoran Ternak per 1.000 lb Berat Hidup per Hari dan Nilai Kalor [19]

Livestock	Wet mass (kg)	Total dry solid (kg)	CV (MJ/kg)
Feeder cattle	23,6	3,22	16,3
Dairy	35,4	4,85	14,9
Swine	40,1	3,67	
Broiler	39,9	11,2	
Hens	33,0	8,07	22,8
Turkey	24,9	5,58	
Sheep	17,7	5,13	13,2
Horse	24,5	7,48	13,0

Data produksi kotoran ternak dan nilai kalor kotoran ternak digunakan untuk mengestimasi potensi energi biomassa dari limbah ternak. Dengan asumsi bobot rata-rata masing-masing jenis ternak, total produksi kotoran ternak diperkirakan mencapai sekitar 74,12 juta ton per tahun. Berdasarkan nilai kalor 13 MJ/kg, efisiensi konversi energi 20%, dan kehilangan transmisi 10%, potensi energi biomassa yang dapat dimanfaatkan diperkirakan mencapai sekitar 5,5 GW.

3.3.5. Tebu

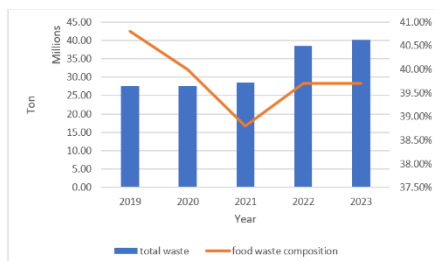
Berdasarkan data Kementerian Pertanian Indonesia, produksi tebu pada tahun 2022 mencapai 2,27 juta ton dengan luas panen sekitar 0,51 juta hektar, yang sebagian besar berada di Pulau Jawa. Selama periode pengamatan, produksi tebu menunjukkan tren meningkat meskipun berfluktuasi, sehingga memengaruhi ketersediaan bagas sebagai bahan baku energi terbarukan. Dengan asumsi bagas tebu mencapai 30% dari total produksi tebu dan memiliki nilai kalor sekitar 17 MJ/kg, estimasi produksi bagas tebu di Indonesia mencapai sekitar 681 ribu ton per tahun. Berdasarkan efisiensi konversi energi 20% dan kehilangan transmisi 10%, potensi energi yang dapat dihasilkan dari bagas tebu diperkirakan sebesar 0,066 GW.



Gambar 16. Produksi dan Luas Area Tebu Indonesia (KEMENTERIAN PERTANIAN REPUBLIK INDONESIA, 2024)

3.3.6. Sampah Perkotaan

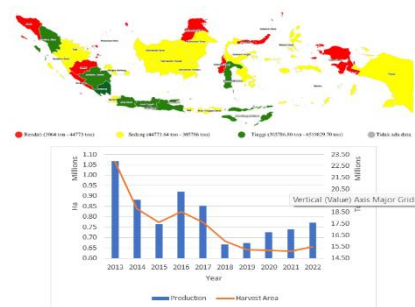
Berdasarkan data SIPSN (2024), volume sampah perkotaan di Indonesia selama periode 2019–2023 menunjukkan tren yang berfluktuasi, dengan sampah makanan tetap menjadi komponen terbesar sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi terbarukan. Pada tahun 2022, total sampah perkotaan mencapai sekitar 38,48 juta ton, dengan 40% berupa limbah organik. Berdasarkan nilai kalor 10 MJ/kg, efisiensi konversi 20%, dan kehilangan transmisi 10%, potensi energi yang dihasilkan diperkirakan mencapai sekitar 0,9 GW.



Gambar 18. Total Produksi Sampah Indonesia (SIPSN, 2024)

3.3.7. Ubi Kayu

Berdasarkan data Kementerian Pertanian Indonesia, produksi ubi kayu selama periode 2013–2022 menunjukkan fluktuasi dengan tren menurun, meskipun wilayah berproduksi tinggi masih berpotensi menghasilkan limbah sebagai bahan baku energi terbarukan seperti biogas, bioetanol, dan biomassa. Penurunan produksi menjadi tantangan terhadap keberlanjutan pasokan bahan baku sehingga diperlukan peningkatan budidaya, teknologi pengolahan, dan efisiensi rantai pasok. Menurut Okudoh et al. (2014), sekitar 28% biomassa ubi kayu merupakan limbah. Pada tahun 2022, produksi ubi kayu mencapai sekitar 17,6 juta ton, dengan estimasi potensi energi sebesar 0,3 GW berdasarkan nilai kalor 10 MJ/kg, efisiensi konversi 20%, dan kehilangan transmisi 10%.



Gambar 17. Produksi dan Luas Panen Ubi Kayu Indonesia (KEMENTERIAN PERTANIAN REPUBLIK INDONESIA, 2024)

Pada tahun 2023, konsumsi energi final Indonesia mencapai sekitar 240 GW, dengan kontribusi energi terbarukan dari biomassa sekitar 31 GW atau 13% dari total konsumsi energi nasional (Anditya et al., 2023). Kontribusi tersebut terutama berasal dari limbah biomassa yang tidak bernilai ekonomis, seperti limbah kelapa sawit (13,3 GW), jerami padi (7,1 GW), dan kotoran ternak (5,5 GW).

Potensi biomassa sebenarnya masih lebih besar karena belum memperhitungkan sumber bernilai ekonomis, seperti Crude Palm Oil (CPO). Oleh karena itu, diperlukan kebijakan yang memprioritaskan pemanfaatan limbah biomassa melalui teknologi konversi yang efisien serta penguatan infrastruktur pengolahan.

Optimalisasi biomassa tidak hanya meningkatkan kontribusi energi terbarukan, tetapi juga mengurangi limbah, mendukung mitigasi perubahan iklim, dan memperkuat ketahanan energi nasional secara berkelanjutan.

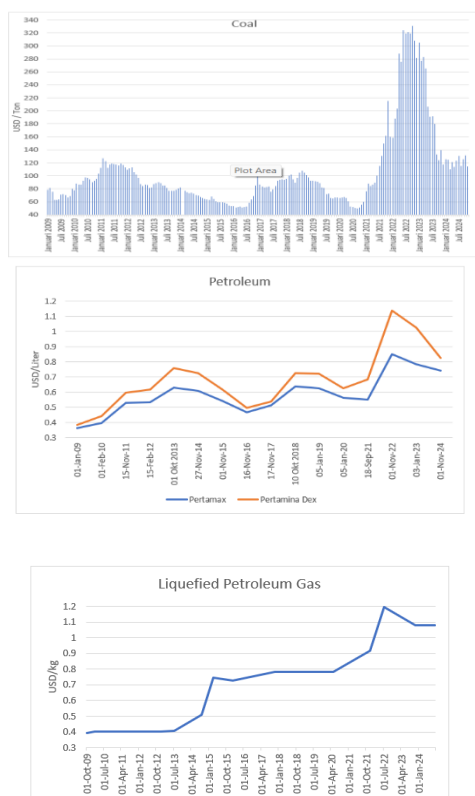
3.3.8. Biaya Komsumsi Energi

Berdasarkan data dari pemerintah Indonesia (Irzon, 2012) (Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Bumi, 2023) (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2023), Pertamina memiliki nilai kalor sebesar 10,575 cal/g. Dengan berat jenis rata-rata Pertamina

sekitar 0,7425 kg/liter, nilai kalor energi yang dihasilkan oleh Pertamina adalah sebesar 9,13 kWh/liter. Sementara itu, LPG memiliki nilai kalor sebesar 11.254,6 kcal/kg, yang setara dengan 13,08 kWh/kg, dan batubara memiliki nilai kalor tinggi sebesar 6.322 kcal/kg, setara dengan 7,35 kWh/kg. Data ini mencerminkan perbedaan kandungan energi dari berbagai jenis bahan bakar, yang menjadi dasar untuk analisis lebih lanjut terkait biaya konsumsi energi.

Evaluasi biaya konsumsi energi memerlukan pendekatan yang komprehensif untuk mencakup tidak hanya biaya langsung yang dibayar oleh pengguna, tetapi juga biaya eksternal yang ditimbulkan oleh emisi bahan bakar. Berdasarkan kerangka Gross External Damages (GED) yang dikembangkan oleh (Muller et al., 2011) [20], GED merupakan indikator penting untuk mengukur kerugian lingkungan akibat polusi yang dihasilkan selama pembakaran bahan bakar seperti batubara, Pertamina, dan LPG.

Dalam konteks ini, nilai GED untuk batubara sekitar 0,04 USD/kWh (interval 0,03–0,05 USD/kWh), petroleum sekitar 0,03 USD/kWh (interval 0,02–0,04 USD/kWh), dan gas alam sekitar 0,01 USD/kWh (interval 0,00–0,01 USD/kWh). Nilai tersebut menunjukkan besarnya kontribusi masing-masing bahan bakar terhadap kerusakan lingkungan yang perlu diperhitungkan dalam analisis biaya total energi.



Gambar 19. Harga Energi di Indonesia (Direktorat Jenderal Mineral dan Batubara, 2024) (PT Pertamina (Persero), 2023) (PT Pertamina (Persero), 2023)

Dalam perhitungan biaya total konsumsi energi (C_{total}), dua komponen utama yang diperhitungkan adalah biaya langsung (C_{direct}) dan biaya eksternal (GED). Rumus perhitungan biaya total dapat dirumuskan sebagai berikut:

$$C_{total} = C_{direct} + GED$$

Di mana C_{direct} mewakili biaya pasar bahan bakar per unit energi (kWh), sedangkan GED mencerminkan kerugian eksternal yang ditimbulkan oleh emisi bahan bakar. Untuk analisis ini, karena harga energi cenderung fluktuatif, nilai patokan harga diambil berdasarkan data harga pada November 2024 di Indonesia.

Pada periode tersebut, harga batubara adalah USD 114,43/ton, Pertamina USD 0,74/liter, dan LPG USD 1,07/kg. Ketika dikonversi ke dalam biaya energi per unit kWh, data menunjukkan bahwa batubara memiliki biaya langsung sekitar 0,015 USD/kWh, Pertamina 0,081 USD/kWh, dan LPG 0,082 USD/kWh seperti ditunjukkan pada Gambar 21.

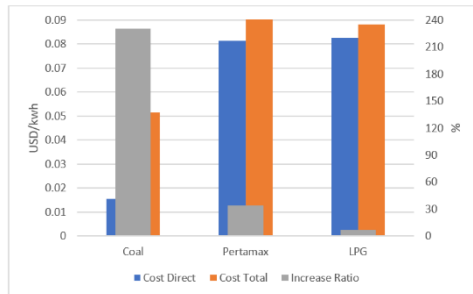
Pada komponen biaya langsung, batubara menunjukkan nilai terendah, yaitu sekitar 0,015 USD/kWh, dibandingkan dengan Pertamina (0,081 USD/kWh) dan LPG (0,082 USD/kWh). Hal ini mencerminkan karakteristik batubara sebagai salah satu sumber energi yang relatif murah berdasarkan harga pasar. Namun, ketika dampak eksternal diintegrasikan dalam analisis melalui *Gross External Damages* (GED), biaya total batubara meningkat secara signifikan menjadi sekitar 0,051 USD/kWh, yang merupakan hampir 2,5 kali lipat dari biaya langsungnya.

Peningkatan ini menyoroti tingginya dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh pembakaran batubara, terutama dari emisi karbon dioksida (CO_2), sulfur dioksida (SO_2), dan partikel halus ($PM_{2.5}$). Dengan rasio peningkatan biaya total sebesar 240%, batubara memiliki lonjakan tertinggi di antara semua bahan bakar yang dianalisis, menjadikannya bahan bakar dengan biaya eksternal tertinggi.

Sebaliknya, Pertamina memiliki biaya langsung yang lebih tinggi dibandingkan batubara, yaitu sekitar 0,081 USD/kWh. Ketika GED diperhitungkan, biaya total Pertamina meningkat menjadi sekitar 0,108 USD/kWh, dengan rasio peningkatan sekitar 33,7%. Meskipun biaya total Pertamina lebih tinggi dibandingkan batubara, dampak eksternalnya relatif lebih rendah. Hal ini dapat dijelaskan oleh emisi polutan yang lebih sedikit dibandingkan batubara, khususnya sulfur dioksida (SO_2) dan partikel halus ($PM_{2.5}$), meskipun emisi karbon dioksida (CO_2) tetap menjadi kontributor utama.

LPG, yang dikenal sebagai salah satu bahan bakar fosil dengan emisi yang lebih bersih, memiliki biaya langsung sekitar 0,082 USD/kWh, sedikit lebih tinggi dibandingkan batubara dan hampir setara dengan

Pertamax. Ketika dampak eksternal diperhitungkan, biaya total LPG meningkat menjadi sekitar 0,088 USD/kWh, dengan rasio peningkatan hanya 6,78%. Angka ini menunjukkan bahwa LPG adalah bahan bakar dengan dampak lingkungan terendah di antara ketiganya. Hal ini terutama disebabkan oleh emisi polutan yang jauh lebih rendah, termasuk karbon dioksida (CO₂) dan senyawa sulfur.

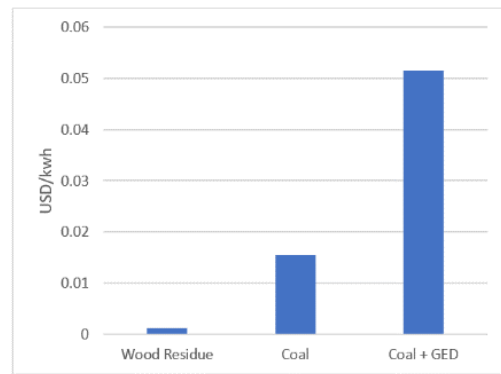


Gambar 20. Perbandingan Biaya Langsung dan Biaya Total Energi di Indonesia

Hasil analisis ini seperti ditunjukkan pada Gambar 20 mengungkapkan bahwa total biaya energi sangat dipengaruhi oleh dampak eksternal yang sering kali tidak tercermin dalam harga pasar. Meskipun batubara memiliki peningkatan signifikan pada biaya eksternal dibandingkan Pertamina dan LPG, biaya totalnya tetap menjadikan batubara sebagai bahan bakar yang paling murah di antara ketiganya.

Sebaliknya, LPG, meskipun memiliki dampak eksternal yang paling rendah, tetap menjadi bahan bakar dengan biaya tertinggi secara langsung maupun total. Pertamina berada di tengah-tengah kedua bahan bakar tersebut, dengan kombinasi biaya langsung yang lebih tinggi dibandingkan batubara, tetapi dampak eksternal yang lebih rendah. Temuan ini menekankan pentingnya mempertimbangkan biaya eksternal dalam analisis energi untuk memberikan penilaian yang lebih holistik dan mendukung pengambilan keputusan berbasis keberlanjutan.

Penelitian yang dilakukan oleh Simangunsong et al., (2017) [21] memperkirakan bahwa nilai ekonomis residu kayu di Indonesia berada pada kisaran USD 5,6 per ton. Perhitungan ini didasarkan pada selisih antara harga pasar internasional pelet kayu, yaitu USD 135/ton, dengan biaya produksi sebesar USD 73/ton ditambah margin keuntungan sebesar 25%. Angka ini mencerminkan potensi ekonomis residu kayu sebagai bahan baku bioenergi sebelum melalui proses pengolahan lebih lanjut, sekaligus memberikan gambaran tentang peluang yang dapat dioptimalkan melalui pengelolaan sumber daya hutan yang lebih berkelanjutan. Namun, nilai ekonomis ini sangat bergantung pada fluktuasi harga pelet kayu di pasar internasional, sehingga perubahan harga secara signifikan dapat memengaruhi kelayakan ekonomi biomassa di Indonesia.



Gambar 21. Harga per Unit Energi Dari Sumber Biomassa dan Fosil

Dalam membandingkan energi fosil dan energi biomassa, batubara dipilih sebagai representasi energi fosil yang paling murah, sedangkan residu kayu atau pelet kayu dapat menjadi perwakilan biomassa. Dengan mempertimbangkan faktor efisiensi konversi energi sebesar 85% dan nilai kalor residu kayu sebesar 18,2 MJ/kg, biaya energi residu kayu di Indonesia saat ini setara dengan USD 0,0013/kWh seperti ditunjukkan pada Gambar 21.

Nilai ini jauh lebih rendah dibandingkan biaya energi batubara tanpa memperhitungkan dampak eksternal (USD 0,0156/kWh) dan semakin tertinggal jika dibandingkan dengan batubara yang mencakup GED, yaitu USD 0,0515/kWh. Harga yang sangat rendah ini, meskipun tampak kompetitif secara langsung, menjadi salah satu hambatan utama dalam menarik minat para pemangku kepentingan untuk berinvestasi di sektor energi biomassa. Hal ini mengindikasikan bahwa nilai biomassa saat ini belum sepenuhnya mencerminkan kontribusinya dalam mendukung transisi energi bersih dan berkelanjutan.

Saat ini, harga biomassa yang rendah di Indonesia mencerminkan ketidakseimbangan antara nilai ekonomi langsung dan manfaat jangka panjangnya. Untuk mencapai pasar energi yang lebih adil dan mencerminkan nilai sebenarnya dari biomassa, harga ideal residu kayu seharusnya mendekati biaya energi batubara dengan GED, yaitu sekitar USD 221,36 per ton. Penyesuaian ini tidak hanya akan meningkatkan daya saing biomassa, tetapi juga mendorong pengembangan rantai pasok yang lebih baik, mulai dari investasi dalam teknologi pengolahan hingga distribusi energi berbasis biomassa. Selain itu, penyesuaian harga ini akan memberikan sinyal ekonomi yang kuat kepada pasar tentang pentingnya biomassa sebagai energi rendah emisi yang mendukung keberlanjutan lingkungan.

Namun, kritik utama terhadap kebijakan energi biomassa saat ini adalah bahwa harga biomassa yang terlalu rendah tidak mencerminkan total biaya energi jika memperhitungkan dampak eksternal. Secara teoritis, bahkan tanpa subsidi tambahan, transisi ke biomassa tetap akan menguntungkan pemerintah

dalam jangka panjang. Hal ini disebabkan oleh pengurangan biaya lingkungan dan kesehatan masyarakat yang signifikan akibat emisi batubara yang tinggi. Ketika biaya eksternal ini diinternalisasikan melalui kebijakan energi yang komprehensif, biomassa dapat menjadi sumber energi yang lebih ekonomis dibandingkan energi fosil seperti batubara. Dalam konteks ini, meskipun harga biomassa yang lebih tinggi dari batubara tanpa GED tampak kurang kompetitif, nilai biomassa tetap setara atau bahkan lebih baik ketika dampak eksternal diperhitungkan.

Oleh karena itu, diperlukan kebijakan yang mampu mendukung harga biomassa yang lebih realistis dan kompetitif di pasar energi. Salah satu langkah strategis yang dapat dilakukan adalah menginternalisasi biaya eksternal dari emisi batubara melalui instrumen ekonomi seperti pajak karbon atau penetapan harga emisi. Kebijakan ini tidak hanya menciptakan pasar yang lebih adil, tetapi juga memberikan insentif kepada biomassa untuk menjadi pilihan energi utama. Selain itu, insentif langsung seperti pengurangan pajak atau pendanaan untuk teknologi biomassa juga dapat mempercepat adopsi energi terbarukan ini. Dengan kebijakan yang terarah, biomassa dapat menjadi tulang punggung transisi energi nasional, memberikan kontribusi yang signifikan terhadap keberlanjutan lingkungan, peningkatan kesehatan masyarakat, dan keamanan energi jangka panjang. Langkah ini tidak hanya akan mengurangi ketergantungan Indonesia pada energi fosil, tetapi juga memastikan bahwa biomassa berperan lebih besar dalam mendukung agenda pembangunan rendah karbon.

4. SIMPULAN

1. Biomassa di Indonesia memiliki potensi yang sangat besar sebagai sumber energi terbarukan dengan estimasi kapasitas mencapai 30,76 GW, atau setara dengan 12,8% dari konsumsi energi final nasional tahun 2023. Potensi terbesar berasal dari limbah kelapa sawit, diikuti residu padi dan kotoran ternak.
2. Pemanfaatan biomassa tidak hanya mendukung diversifikasi bauran energi nasional dan peningkatan ketahanan energi, tetapi juga berkontribusi terhadap pengurangan limbah, penurunan emisi gas rumah kaca, serta mitigasi perubahan iklim melalui pemanfaatan limbah pertanian, perkebunan, peternakan, dan sampah organik.
3. Hasil analisis menunjukkan bahwa Indonesia memiliki tingkat intensitas energi yang relatif efisien dibandingkan banyak negara lain. Namun, kontribusi energi terbarukan dalam bauran energi nasional masih perlu ditingkatkan melalui

optimalisasi pemanfaatan sumber daya biomassa yang tersedia.

4. Analisis *Gross External Damages* (GED) menunjukkan bahwa biomassa memiliki daya saing ekonomi yang lebih baik dibandingkan energi fosil apabila biaya eksternal akibat dampak lingkungan diinternalisasikan. Hal ini menegaskan bahwa biomassa merupakan alternatif energi yang lebih berkelanjutan dalam jangka panjang.
5. Untuk mengoptimalkan pemanfaatan biomassa, diperlukan dukungan kebijakan berupa pengembangan teknologi konversi yang lebih efisien, penguatan infrastruktur dan rantai pasok biomassa, pemberian insentif investasi, serta penerapan instrumen ekonomi seperti internalisasi biaya eksternal atau pajak karbon guna mempercepat transisi menuju sistem energi nasional yang berkelanjutan dan rendah karbon.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Amiruddin, A., Liebman, A., Dargaville, R., & Gawler, R. (2024). Optimal energy storage configuration to support 100 % renewable energy for Indonesia. *Energy for Sustainable Development*, 81(February).
- [2] Presiden Republik Indonesia. (2017). Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional. Jakarta: Pemerintah Indonesia.
- [3] Reyseliani, N., Pratama, Y. W., Hidayatno, A., Mac Dowell, N., & Purwanto, W. W. (2024). Power sector decarbonisation in developing and coal-producing countries: A case study of Indonesia. *Journal of Cleaner Production*, 454(January).
- [4] Halimatussadiyah, A., Kruger, W., Wagner, F., Afifi, F. A. R., Lufti, R. E. G., & Kitizing, L. (2024). The country of perpetual potential: Why is it so difficult to procure renewable energy in Indonesia? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 201(April).
- [5] Rhofita, E. I., Ouaret, R., Montastruc, L., & Meyer, M. (2024). Mapping analysis of farmers' perceptions of rice straw valorization in Indonesia. *Environmental Development*.
- [6] Anditya, C., Lasnawatin, F., Prananto, A. B., & Halim, L. (2023). *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2023* (2023 editi). Ministry of Energy and Mineral Resources, Republic of Indonesia.
- [7] Hersaputri, L. D., Yeganyan, R., Cannone, C., Plazas-Niño, F. A., Osei-Owusu, S., Kountouris, Y., & Howells, M. (2024). Technoeconomic data and assumptions for long-term energy systems modelling in Indonesia. *Data in Brief*.
- [8] Wibisono, H., Lovett, J., Chairani, M. S., &

- Suryani, S. (2024). The ideational impacts of Indonesia's renewable energy project failures. *Energy for Sustainable Development*.
- [9] Energy Institute - Statistical Review of World Energy. (2024, September 13). *Renewable Energy*. Retrieved from Our World in Data: <https://ourworldindata.org/renewable-energy>
- [10] Met Office Hadley Centre. (2024, October 12). Average temperature anomaly, Global. Retrieved from Our World in Data: <https://ourworldindata.org/grapher/temperature-anomaly>
- [11] Richie, H., Rosado, P., & Roser, M. (2024, January 13). Greenhouse gas emissions. Retrieved from Our World in Data
- [12] Global Carbon Budget. (2024, November 25). Per capita CO₂ emissions. Retrieved from Our World in Data
- [13] Susilawardani, Rizal, A., & Hartini. (2022). Analisis Rendemen Tandan Buah Sawit Berdasarkan Tahun Tanam Dan Varietas
- [14] Bejarano, P. A. C., Rodriguez-Miranda, J. P., Maldonado-Astudillo, R. I., Maldonado-Astudillo, Y. I., & Salazar, R. (2022). Circular Economy Indicators for the Assessment of Waste and By-Products from the Palm Oil Sector. *Processes*, 10(5).
- [15] Hidayat, W., Rani, I. T., Yulianto, T., Febryano, I. G., Iryani, D. A., Hasanudin, U., Lee, S., Kim, S., Yoo, J., & Haryanto, A. (2020). Peningkatan Kualitas Pelet Tandan Kosong Kelapa Sawit melalui Torefaksi Menggunakan Reaktor Counter-Flow Multi Baffle (COMB). *Jurnal Rekayasa Proses*, 14(2), 182.
- [16] Quispe, I., Navia, R., & Kahhat, R. (2017). Energy potential from rice husk through direct combustion and fast pyrolysis: A review. *Waste Management*, 59, 200–210
- [17] Kerdsuwan, S., & Laohalidanond, K. (2015). Approach of using Corn Residue as Alternative Energy Source for Power Production: A Case Study of the Northern Plain Area of Thailand. In *Energy Procedia* (Vol. 79). Elsevier B.V.
- [18] Sahu, P. K., Chakradhari, S., Dewangan, S., & Patel, K. S. (2016). Combustion Characteristics of Animal Manures. *Journal of Environmental Protection*, 07(06), 951–960.
- [19] Muller, N. Z., Mendelsohn, R., & Nordhaus, W. (2011). Environmental Accounting for Pollution in the United States Economy. *American Economic Review*, 101, 1649–1675.
- [20] Simangunsong, B. C. H., Sitanggang, V. J., Manurung, E. G. T., Rahmadi, A., Moore, G. A., Aye, L., & Tambunan, A. H. (2017). Potential forest biomass resource as feedstock for bioenergy and its economic value in Indonesia. *Forest Policy and Economics*, 81(April 2017), 10–17.