

Potensi Dekarbonisasi Pembangkit Listrik Batubara Melalui Cofiring Biomassa Dan Carbon Capture Utilization

Meiri Triani^{1*}, Didi Dwi Anggoro², Vitus Dwi Yuniyanto²

¹PT PLN (Persero) Puslitbang Ketenagalistrikan (Research Institute)
Jl. Duren Tiga No. 102, Jakarta Selatan, 12760 Indonesia

²Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, 50275 Indonesia
Email: meiri2mail@gmail.com

Abstrak

Dekarbonisasi sektor pembangkit listrik adalah langkah penting untuk mencapai pengurangan emisi karbon secara signifikan. Proses transisi energi di Indonesia dihadapkan pada tantangan bahwa bahan bakar fosil masih mendominasi kebutuhan pembangkit listrik. Studi ini dilakukan untuk menganalisis potensi dan tantangan upaya dekarbonisasi sistem pembangkitan listrik di Indonesia, terutama dalam pengembangan *cofiring* biomassa dan *carbon capture utilization storage* (CCUS) dimasa mendatang dengan melakukan *literature review* terhadap berbagai publikasi yang relevan dari database *science direct*, serta laporan dan publikasi dari situs resmi organisasi (*The International Energy Agency*, Perusahaan Listrik Negara, Dewan Energi Nasional) yang terkait dengan fokus utama artikel ini. Hasilnya menunjukkan bahwa *cofiring* memiliki potensi besar untuk dikembangkan sebagai inisiatif strategis untuk mempercepat pencapaian target proporsi energi terbarukan sebesar 23% pada tahun 2025, namun perlu peningkatan perhatian kepada pengembangan konsep penyediaan pasokan biomassa yang berkelanjutan. Di sisi lain implementasi teknologi CCUS perlu pertimbangan matang, dengan alasan faktor biaya yang tinggi dan tingkat pengembangan teknologi yang belum meluas.

Kata kunci: Dekarbonisasi, Emisi karbon, Ketahanan energi, Pembangkit listrik, Transisi energi

Abstract

Potential of Decarbonizing Coal-Fired Power Plants through Cofiring Biomass and Carbon Capture Utilization

One of the critical steps in significantly reducing carbon emissions is through decarbonization of the electricity sector. The high dependence of the electricity sector on fossil fuels is a critical challenge in the energy transition process in Indonesia. This study was conducted to analyze the potential and challenges of the decarbonization strategies for the electricity sector in Indonesia, especially for the future development of cofiring biomass and carbon capture utilization storage (CCUS), by conducting a literature review of various relevant publications from the science direct database, reports, and publications from the official website organizations (The International Energy Agency, Indonesian state-owned electricity company, National Energy Council) related to the main focus discussed in this article. The results show that cofiring has the potential to be developed as a strategic initiative in accelerating the achievement of a renewable energy mix of 23% by 2025. However, increased attention is needed to develop strategies for providing sustainable biomass supply. While implementing the CCUS project needs to be further consideration to be applied, primarily due to the high-cost factor and the level of technological development that has yet to be widespread.

Keywords: Decarbonization, Carbon emissions, Energy security, Electricity sector, Energy transition

PENDAHULUAN

Ketergantungan dunia pada energi fosil dihadapkan pada isu perubahan iklim dan ketahanan energi. Risiko terkait kegagalan mitigasi perubahan iklim termasuk sebagai lima risiko teratas di dunia hingga 10 tahun mendatang (World Economic Forum, 2023). Dampak perubahan iklim dapat mempengaruhi ketahanan energi, yaitu keadaan di mana ketersediaan dan akses masyarakat terhadap energi berkelanjutan dengan harga yang terjangkau, serta memperhatikan perlindungan lingkungan (Pemerintah Republik Indonesia, 2014). Peningkatan kesadaran di seluruh dunia terhadap isu perubahan iklim dan keterbatasan cadangan energi fosil telah mempercepat transisi bahan bakar fosil ke energi terbarukan secara global (Lin *et al.*, 2022). Transisi energi fosil ke energi terbarukan menjadi langkah penting dalam membatasi dampak perubahan iklim (Vatalis *et al.*, 2022) dan membutuhkan kontribusi ambisius dari semua negara dalam mengurangi emisi karbon secara signifikan (Adewuyi *et al.*, 2020) karena perubahan iklim bukan merupakan permasalahan satu negara atau kawasan saja tetapi menjadi permasalahan bersama (global).

Pengurangan emisi karbon yang menjadi penyebab utama perubahan iklim, dapat dicapai dengan dekarbonisasi pada sektor energi, karena sektor energi telah menjadi sumber penting gas rumah kaca (GRK) (Hassan *et al.*, 2022; Huang *et al.*, 2020). Emisi karbon dari sektor energi global tumbuh sebesar 0,9% atau 321 Mt pada tahun 2022 (IEA, 2022a). Pembatasan penggunaan bahan bakar fosil untuk proses produksi listrik khususnya batubara tidak dapat dihindari, karena batubara telah menjadi kontributor lebih dari 40% terhadap keseluruhan pertumbuhan emisi karbon global pada tahun 2021 (IEA, 2021). Dekarbonisasi sektor energi telah menjadi topik penelitian selama beberapa tahun dan mendapatkan peningkatan perhatian baru-baru ini seiring dengan meningkatnya komitmen dunia terhadap upaya mitigasi perubahan iklim (Figueiredo *et al.*, 2021). Dekarbonisasi sektor pembangkit listrik biasanya melibatkan dua strategi: 1) meningkatkan efisiensi energi, misalnya, dengan meningkatkan infrastruktur transmisi dan interkoneksi, atau dengan meningkatkan efisiensi

pembangkit listrik tenaga batubara yang menghasilkan emisi yang lebih rendah per unit output energi, dan 2) mengganti sumber energi intensif karbon dengan sumber energi rendah karbon seperti nuklir, dan pembangkit listrik yang dilengkapi dengan fasilitas *carbon capture utilization storage* atau CCUS (Cormos & Dinca, 2021; Jafari *et al.*, 2022).

Secara umum cara yang paling jelas untuk mencapai dekarbonisasi adalah penggunaan energi terbarukan Figueiredo *et al.*, 2021), karena memiliki potensi yang signifikan pada semua aspek pembangunan; sosial, ekonomi, dan lingkungan (Algarni *et al.*, 2023; Verástegui *et al.*, 2021). Oleh karena itu, banyak negara sudah meningkatkan pemanfaatan energi berkelanjutan seperti angin, panas bumi, surya, dan hidro untuk menghasilkan listrik. Beberapa negara sudah mencapai porsi energi terbarukan yang tinggi untuk pembangkit listrik tenaga air seperti Paraguay (99%), Norwegia (97%), dan Kosta Rika (93%) (Papadis & Tsatsaronis, 2020). China berkontribusi atas hampir 70% pertumbuhan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB) pada tahun 2021, diikuti oleh Amerika Serikat sebesar 14%, dan Brasil sebesar 7% (IEA, 2022).

Cofiring batubara dengan berbagai jenis biomassa telah mendapat banyak perhatian karena dianggap sebagai opsi dekarbonisasi berbiaya rendah (Hariana *et al.*, 2022; Mohd Idris *et al.*, 2021; Song *et al.*, 2021). Sementara itu, memenuhi tujuan adaptasi perubahan iklim jangka panjang tanpa menerapkan teknologi CCUS pada sektor ketenagalistrikan, akan memerlukan penghapusan pembangkit listrik berbahan bakar batubara yang ada dan sedang dibangun saat ini, dan pada akhirnya diikuti juga dengan penghentian dini operasi pembangkit listrik berbahan bakar gas juga sehingga terdapat potensi yang signifikan untuk aset terlantar (IEA, 2020). Namun, bisa jadi pembangkit listrik konvensional mungkin masih diperlukan untuk memenuhi kebutuhan beban akibat fluktuasi pembangkit listrik dari energi terbarukan (Papadis & Tsatsaronis, 2020). Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah mengkaji pilihan teknologi untuk dekarbonisasi sektor pembangkit listrik di Indonesia terutama melalui upaya implementasi *cofiring* biomassa dan instalasi fasilitas CCUS pada pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) berbahan

bakar batubara dengan menganalisis potensi dan tantangan dari kedua opsi tersebut, karena pada saat ini belum banyak peneliti yang khusus mengeksplorasi kedua teknologi tersebut. Keduanya dianggap dapat mewakili strategi dekarbonisasi jangka pendek dan jangka panjang untuk Indonesia jika mempertimbangkan kondisi saat ini.

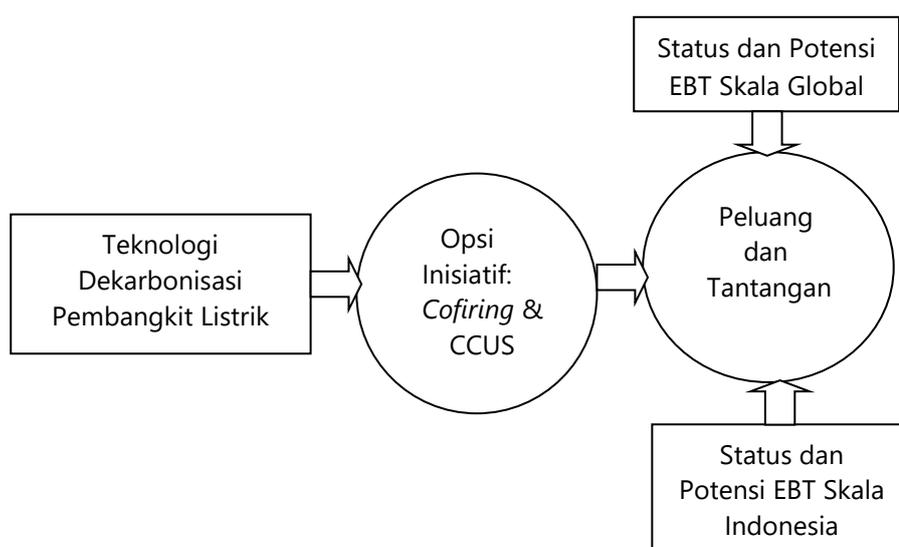
METODOLOGI

Pada artikel ini, metode penelitian yang digunakan adalah berfokus pada menemukan materi yang relevan atau sesuai dengan konteks yang akan dibahas dengan menggunakan pendekatan *traditional literature review*. *Literature review* biasanya dilakukan untuk menganalisis konten spesifik dari artikel relevan yang dipilih secara komprehensif (Esquiaqui *et al.*, 2023). Proses *literature review* mengikuti pendekatan yang disarankan oleh Moshood *et al.*, (2022) dengan cara: (1) mengidentifikasi publikasi terkini, (2) memilih dan menilai temuan artikel tersebut, dan (3) mengevaluasi dan mensintesis. *Database* penelitian yang paling banyak digunakan untuk penyusunan artikel ini adalah *scopus* melalui pencarian kata kunci "*decarbonization electricity sector*". Publikasi dari database *scopus* yang dipertimbangkan selama pengumpulan data adalah publikasi yang berasal dari lima tahun terakhir (2023-2019), tipe artikel berupa *review articles* dan *research articles* dengan topik terkait

energi, dan secara spesifik judul publikasi adalah tentang energi, review energi terbarukan berkelanjutan, serta kebijakan energi. Sebanyak 1.000 artikel ditemukan selama pencarian dan dilakukan penyaringan. Namun, hanya sekitar 30 publikasi yang digunakan karena dianggap paling relevan dengan fokus utama dari artikel ini, yaitu *cofiring* dan CCUS. Publikasi tersebut digabungkan ke dalam literatur akademik bersama dengan publikasi dari situs resmi organisasi seperti *The International Energy Agency*, Perusahaan Listrik Negara, Dewan Energi Nasional, publikasi lain yang relevan, serta kebijakan terkait. Untuk memudahkan peneliti menentukan langkah – langkah dalam melakukan penelitian ini, maka disusun kerangka berpikir sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 1.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Situasi global saat ini menuntut tindakan dan strategi yang jelas dalam mengurangi perubahan iklim, perencanaan energi menjadi fundamental untuk menemukan seperangkat sumber daya energi dan teknologi yang optimal untuk memenuhi permintaan energi secara berkelanjutan, terjangkau, dan dapat diandalkan (Kalantari *et al.*, 2021; Mohd Idris *et al.*, 2021). Proses dekarbonisasi memainkan peran penting dalam pengurangan emisi karbon dan juga menyiratkan perubahan besar pada sistem pembangkitan listrik untuk banyak negara dengan



Gambar 1. Kerangka Berpikir

beralih kepada penggunaan energi terbarukan (Del Río & Kiefer, 2023; Verástegui *et al.*, 2021). Penggunaan sumber daya energi terbarukan meningkat pesat dalam pembangunan negara-negara berkembang terutama di sektor kelistrikan, dimana tantangan secara teknis dan ekonomi masih menjadi masalah untuk penerapan dalam skala besar (Relva *et al.*, 2021).

Status dan Potensi Energi Terbarukan Dalam Skala Global

Sumber energi untuk produksi listrik di setiap negara bisa sangat berbeda. Batubara masih menjadi sumber bahan bakar utama untuk sektor pembangkit listrik di banyak negara, sementara di beberapa negara lain penggunaan sumber energi yang memiliki emisi karbon lebih rendah seperti gas, tenaga nuklir, dan energi terbarukan telah menjadi sumber energi alternatif (Lin & Li, 2020). Penggunaan sumber energi primer dalam pembangkit listrik tergantung pada ketersediaan sumber daya alam, keadaan ekonomi dan sejarah perkembangan masing - masing wilayah (Papadis & Tsatsaronis, 2020).

Pengembangan energi terbarukan umumnya dihadapkan pada masalah biaya yang lebih tinggi dan teknologi penyimpanan energi yang belum matang dibandingkan dengan penggunaan energi fosil. Dipengaruhi oleh faktor alam, pengembangan energi terbarukan tidak mudah terutama dengan karakteristik fluktuasi energi angin, energi surya, dan sumber energi lainnya. Disamping itu, volatilitasnya juga akan menyebabkan fluktuasi frekuensi sistem yang besar sehingga menurunkan kualitas daya (Yu *et al.*, 2023). Bioenergi (*bioliquid*, biogas, dan biomassa padat) menjadi salah satu pilihan utama untuk menggantikan bahan bakar fosil dalam bauran energi (Lindroos *et al.*, 2021), namun kekhawatiran terhadap ketahanan pangan, potensi kerusakan ekosistem, skalabilitas, dan ekonomi pedesaan yang tidak berkelanjutan menjadi perhatian, terutama di negara berkembang. Porsi bioenergi juga bergantung pada biaya dan potensi sumber daya biomassa yang tersedia (Plazas-Niño *et al.*, 2022).

Pada skala regional *Asosiation of South East Asian Nations* (ASEAN), total produksi listrik yang dihasilkan dari pembangkit listrik di ASEAN pada tahun 2019 adalah sebesar 1.129 TWh. Dari jumlah

tersebut, 43% berasal dari batubara, 34% dari gas, 2% dari bahan bakar minyak, 14% dari tenaga air, dan hanya 7% dari energi terbarukan lainnya (bioenergi (3,3%), panas bumi (2,2%), energi surya (1,0%), angin (0,5%)), sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2. Negara dengan persentase energi terbarukan tertinggi adalah Laos sebesar 63,5%, Kamboja (48,5%), Myanmar (43,5%) dan Vietnam (31,3%). Negara-negara tersebut, bersama dengan Malaysia dan Indonesia bergantung pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA). Negara-negara yang sangat bergantung pada batubara untuk pembangkit listrik adalah Indonesia sebesar 59,1%, Filipina (54,6%), Vietnam (49,9%), Malaysia (45,9%), dan Kamboja (43,0%). Negara-negara yang sangat bergantung pada gas untuk pembangkit listrik adalah Singapura (95,0%), dan Brunei (89,2%) (Lau, 2023).

Status dan Potensi Energi Terbarukan di Indonesia

Total potensi energi baru terbarukan yang dimiliki Indonesia cukup besar (3.643 GW), namun pemanfaatannya baru mencapai 11,6 GW (Tabel 1). Biaya produksi pembangkit berbasis energi terbarukan yang masih relatif tinggi menjadi penyebab rendahnya penggunaan energi terbarukan dalam ketenagalistrikan, karena sulit bersaing dengan bahan bakar fosil, khususnya batubara (Suharyati *et al.*, 2022). Berdasarkan Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014, target bauran energi baru dan terbarukan di Indonesia pada tahun 2025 sebesar 23%. Biomassa telah diakui secara luas sebagai sumber energi terbarukan. Penggunaan biomassa untuk tujuan menghasilkan energi telah meningkat pesat di banyak negara (Zahraee *et al.*, 2020). Hingga tahun 2021, realisasi bauran energi terbarukan di Indonesia baru mencapai 12,74% (PLN, 2021a). *Cofiring* biomassa pada PLTU batubara dengan memanfaatkan berbagai biomassa (*sawdust*, pelet kayu, dll) menjadi salah satu inisiatif yang ditetapkan dalam Rencana Penyediaan Usaha Tenaga Listrik (RUPTL) PLN tahun 2021-2030 untuk dapat mempercepat pencapaian target bauran energi tahun 2025 (PLN, 2021b).

Cofiring Biomassa dan Batubara

Cofiring biomassa dengan batubara, dibandingkan dengan pembakaran batubara saja dapat membantu mengurangi total emisi per unit

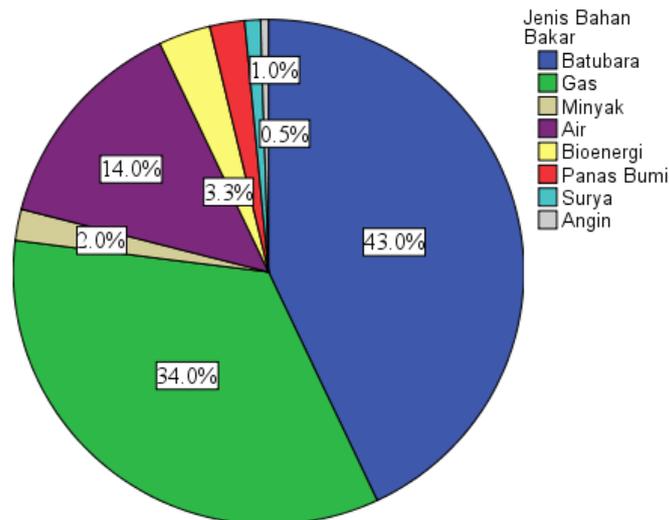
energi yang dihasilkan. Batubara dan bahan bakar biomassa sebetulnya sangat berbeda dalam komposisi. *Cofiring* biomassa dengan batubara memiliki potensi untuk mengurangi tingkat nitrogen oksida (NO_x) dan sulfur dioksida (SO₂) dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara yang ada, namun konsentrasi NO_x dan SO₂ tergantung pada kandungan nitrogen dan sulfur pada biomassa (Arifin *et al.*, 2023; Devaraja *et al.*, 2020). Pengurangan signifikan dalam biaya bioenergi dimungkinkan oleh ketersediaan teknologi substitusi bahan bakar fosil (yaitu, *cofiring*) dan penurunan harga bahan baku, biaya transportasi, biaya investasi, dan biaya infrastruktur (Mohd Idris *et al.*, 2021).

Sebagai sumber energi karbon-netral terbarukan, biomassa dapat menyerap dan mengubah karbon dioksida (CO₂) menjadi energi kimia melalui fotosintesis. Ketika biomassa digunakan untuk proses produksi listrik, maka CO₂

yang diserap dilepaskan kembali ke atmosfer setelah pembakaran atau gasifikasi (Sammarchi *et al.*, 2022). Bahan baku utama untuk biomassa menjadi bioenergi dapat diklasifikasikan sebagai biomassa darat dan biomassa perairan. Biomassa darat, biasanya terdiri dari dua kategori. Kategori pertama seperti biji jagung, tebu, dan kacang kedelai. Sedangkan, kategori kedua adalah biomassa selulosa (sisa pertanian, sisa hutan dan tanaman energi) (Raychaudhuri & Ghosh, 2016). Indonesia memiliki potensi sumber daya biomassa yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi, seperti kelapa sawit, beras, kayu, dan sampah perkotaan (Primadita *et al.*, 2020). Sebagian besar sumber biomassa berada di Sumatera (48%), wilayah Jawa dan Bali (28%) dan Kalimantan (16%). Kelapa sawit dan sekam padi memiliki potensi terbesar dibandingkan dengan jenis biomassa lainnya yang tersedia di Indonesia.

Tabel 1. Potensi kapasitas energi terbarukan tahun 2021 di Indonesia (Suharyati *et al.*, 2022)

| Jenis EBT | Potensi Energi (GW) | Kapasitas (GW) | Pemanfaatan (%) |
|------------|---------------------|----------------|-----------------|
| Samudera | 17,9 | - | - |
| Panas Bumi | 23,9 | 2,3 | 9,6% |
| Bioenergi | 56,9 | 2,3 | 4,0% |
| Bayu | 154,9 | 0,2 | 0,1% |
| Hidro | 95,0 | 6,6 | 7,0% |
| Surya | 3.294,4 | 0,2 | 0,01% |
| Total | 3.643,0 | 11,6 | 0,3% |



Gambar 2. Pembangkit listrik ASEAN pada tahun 2019 berdasarkan jenis bahan bakar

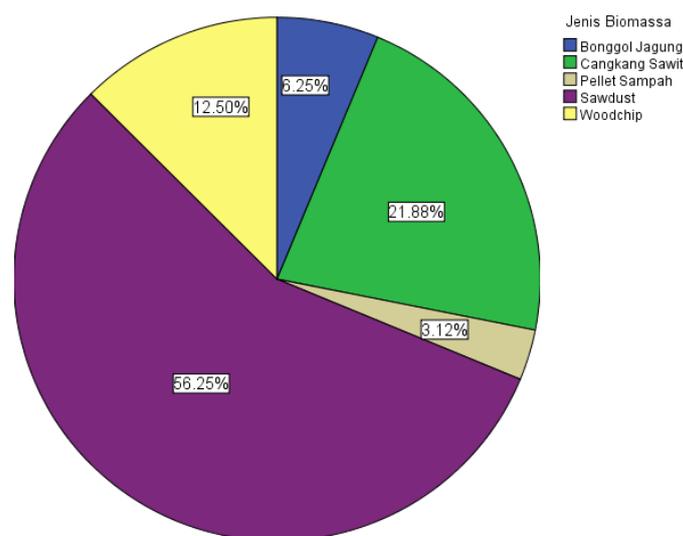
Sebagian besar masalah teknis dalam implementasi *cofiring* biomassa dengan batubara adalah terkait dengan karakteristik bahan bakar. Dibandingkan dengan bahan bakar fosil padat, biomassa mengandung lebih sedikit karbon dan lebih banyak oksigen, kadar air tinggi serta memiliki nilai kalor yang rendah. Selain itu, kandungan klorin dari biofuel tertentu, seperti pada jerami padi bisa melebihi kadar batubara. Dalam aplikasi pembakaran, biomassa dapat dibakar secara langsung, baik sendiri maupun bersama dengan bahan bakar utama. Kadar air dan abu yang tinggi dalam bahan bakar biomassa dapat menyebabkan masalah pada pembakaran. Titik leleh abu terlarut juga bisa rendah, yang menyebabkan masalah *fouling* dan *slagging*. Klorin yang ditemukan dalam jenis biomassa tertentu dapat mempengaruhi operasi pembangkit listrik karena memiliki potensi korosi (Demirbaş, 2003). Potensi biomassa sebagai sumber energi terbarukan di Indonesia sebesar 49,81 GW. Meskipun Indonesia memiliki basis sumber daya biomassa yang besar, namun pengelolaan dan pengangkutannya masih menjadi tantangan utama saat ini (Yana *et al.*, 2022).

Ada tiga metode utama untuk melakukan *cofiring*, terdiri dari: 1) pembakaran bersama secara langsung (*direct*), 2) tidak langsung (*indirect*), dan 3) paralel. Pembakaran bersama secara langsung melibatkan pengumpanan langsung biomassa ke sistem pembakaran

batubara. *Indirect cofiring*, biomassa digasifikasi atau dibakar secara terpisah dan gas yang dihasilkan diinjeksikan dan dibakar dalam ruang bakar batubara. *Parallel cofiring* digambarkan bahwa pembakaran biomassa dan batubara terjadi dalam ruang bakar terpisah (Tillman, 2000). Diantara ketiga teknologi *cofiring* yang tersedia, *direct cofiring* adalah pilihan metode paling populer, sebagian besar karena pertimbangan biaya investasi yang relatif rendah untuk mengubah PLTU batubara yang ada menjadi pembangkit listrik *cofiring*. Metode *direct cofiring* adalah metode yang digunakan pada penerapan *cofiring* di PLTU milik PLN saat ini. *Cofiring* berbasis gasifikasi mengatasi beberapa masalah umum yang terkait dengan *cofiring*, seperti memisahkan abu biomassa dari abu batubara.

Status Implementasi Cofiring Biomassa dan Batubara Pada PLTU di Indonesia

Uji coba program *cofiring* biomassa pada PLTU batubara PLN *Group* telah dilakukan lebih dari satu tahun di lebih dari tiga puluh (30) lokasi unit pembangkit, meskipun belum dapat beroperasi secara kontinu dan dengan rasio *cofiring* yang masih rendah ($\pm 5\%$). Pelaksanaan *cofiring* pada PLTU berbahan bakar batubara dilakukan dengan memanfaatkan berbagai jenis biomassa seperti *sawdust*, cangkang sawit, *woodchip woodchip* (Gambar 3).



Gambar 3. Jenis Biomassa Yang Dimanfaatkan Untuk *Cofiring* Pada PLTU Batubara Di Indonesia (data PLN, 2022)

Berdasarkan Gambar 3, *sawdust* adalah jenis biomassa yang paling banyak dimanfaatkan (>50%) dalam kegiatan *cofiring* biomassa dengan batubara pada PLTU dibandingkan jenis biomassa lainnya. Penerapan *cofiring* pada PLTU dilaksanakan dengan metode *direct cofiring*, baik pada *boiler* tipe *pulverized combustion* (PC), *circulating fluidized bed* (CFB), dan *stoker* (Tabel 2).

Sebagian besar pelaksanaan *cofiring* dilakukan pada PLTU batubara yang

menggunakan teknologi *boiler* PC (15 lokasi), CFB (10 lokasi), dan sisanya oleh PLTU batubara dengan teknologi *boiler* tipe stoker (7 lokasi). Tantangan utama yang dihadapi dalam pengembangan biomassa di Indonesia saat ini adalah pada permasalahan ketersediaan dan keekonomian pasokan biomassa, sehingga menyebabkan program *cofiring* belum dapat dilakukan secara kontinu (Sugiyono *et al.*, 2022).

Tabel 2. Pelaksanaan *cofiring* di berbagai lokasi PLTU (data PLN, 2022)

| Lokasi | Tipe Boiler |
|-------------------------------------|-------------|
| Probolinggo, Jawa Timur | PC |
| Pacitan, Jawa Timur | PC |
| Lombok Barat, Nusa Tenggara Barat | CFB |
| Ketapang, Kalimantan Barat | CFB |
| Sanggau, Kalimantan Barat | Stoker |
| Cilegon, Banten | PC |
| Gorontalo Utara, Gorontalo | CFB |
| Rembang, Jawa Tengah | PC |
| Pandeglang, Banten | PC |
| Tangerang, Banten | PC |
| Cilegon, Banten | PC |
| Probolinggo, Jawa Timur | PC |
| Sukabumi, Jawa Barat | PC |
| Barru, Sulawesi Selatan | CFB |
| Cilacap, Jawa Tengah | PC |
| Tuban, Jawa Timur | PC |
| Indramayu, Jawa Barat | PC |
| Kupang, Nusa Tenggara Timur | CFB |
| Muara Enim, Sumatera Selatan | PC |
| Cilegon, Banten | PC |
| Konawe, Sulawesi Tenggara | Stoker |
| Ende, Nusa Tenggara Timur | Stoker |
| Tanah Laut, Kalimantan Selatan | PC |
| Sintang, Kalimantan Barat | Stoker |
| Pulang Pisau, Kalimantan Tengah | CFB |
| Lampung Selatan, Lampung | CFB |
| Nagan Raya, Aceh | CFB |
| Jeneponto, Sulawesi Selatan | CFB |
| Belitung, Kepulauan Bangka Belitung | Stoker |
| Berau, Kalimantan Timur | Stoker |
| Minahasa Selatan, Sulawesi Utara | CFB |
| Sumbawa Barat, Nusa Tenggara Barat | Stoker |

Carbon Capture Utilization Storage (CCUS)

Secara umum, cara mendekarbonisasi emisi CO₂ dari pembakaran bahan bakar fosil dapat dibagi menjadi metode penangkapan dan pemanfaatan karbon (*carbon capture utilization, CCU*), dan metode penangkapan dan penyimpanan karbon (*carbon capture storage, CCS*). CCU terdiri dari proses menangkap emisi CO₂ yang diemisikan dan mengubahnya menjadi bahan kimia yang berguna seperti beton, agregat, bahan bakar, polimer. Sampai saat ini, implementasi CCU dalam skala besar masih memerlukan penelitian dan pengembangan yang substansial karena sebagian besar teknologi masih dalam tahap percontohan. CCS terdiri dari proses menangkap CO₂ yang diemisikan dan menyimpannya di *reservoir* bawah permukaan.

Beberapa peneliti menggunakan istilah CCUS untuk memasukkan CCU dan CCS (Bokka & Lau, 2023). Saat ini, ada dua fasilitas CCUS berskala besar beroperasi di sektor pembangkitan listrik, salah satunya di Petra Nova. Proyek CCUS Petra Nova di Texas telah beroperasi dengan sukses sejak tahun 2017, merupakan sistem penangkapan karbon pasca-pembakaran terbesar yang dipasang pada PLTU batubara, dan menangkap hingga 1,4 MtCO₂ setiap tahun untuk digunakan dalam pemulihan ekstraksi minyak bumi (IEA, 2020). Teknologi sistem penangkapan emisi CO₂, dapat dikategorikan menjadi pra-pembakaran, pasca-pembakaran, dan *oxy-fuel*. Teknologi pasca-pembakaran adalah pemisahan CO₂ dari gas buang setelah proses pembakaran terjadi (**Error! Reference source not found.**).

Metode penangkapan pada teknologi pasca-pembakaran dapat dikategorikan sebagai adsorpsi, absorpsi, dan pemisahan membran. Penangkapan karbon pasca-pembakaran berbasis *monoethanolamine* (MEA) adalah teknologi mapan dengan aplikasi skala industri dalam pemisahan CO₂ dari gas alam, hidrogen, dan gas buang (Shu *et al.*, 2023). Namun MEA sebetulnya dapat menimbulkan risiko lingkungan mengingat fakta bahwa MEA bersifat korosif dan dapat dengan mudah terurai untuk melepaskan NH₃, selain membutuhkan input air tambahan (Sammarchi *et al.*, 2022). Karena persyaratan kualitas gas input pada fasilitas penangkapan karbon yang sangat ketat, maka selain dibutuhkan pemasangan unit pengendali partikel halus seperti

electrostatic precipitator (EP), mungkin diperlukan juga tambahan peralatan seperti *selective catalytic reduction* (SCR) untuk mereduksi konsentrasi NO_x, dan *flue gas desulfurization* (FGD) untuk mereduksi konsentrasi sulfur. Teknologi penangkapan pra-pembakaran memisahkan CO₂ sebelum proses pembakaran dimulai, memungkinkan produk untuk memenuhi persyaratan emisi CO₂. Sementara *oxy-fuel*, menggunakan oksigen murni, bukan udara sebagai oksidan untuk pembakaran (McLaughlin *et al.*, 2023). Keuntungan dan kerugian dari ketiga teknologi tersebut ditunjukkan Tabel 3.

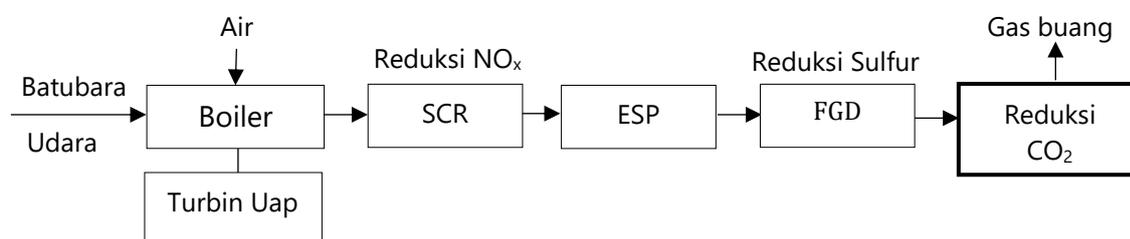
Secara garis besar, bahwa tantangan dalam pengembangan proyek CCUS, terutama disebabkan karena biaya yang relatif tinggi terkait dengan proses penangkapan emisi CO₂ dan kebutuhan infrastruktur, disamping tren perkembangan dan aplikasinya yang belum signifikan.

Aspek Keselamatan dan Kesehatan Kerja Pada Penerapan Upaya Dekarbonisasi Pembangkit Listrik

Urgensi transisi energi pada prinsipnya didorong oleh persoalan lingkungan dan kesehatan manusia yang sebagian besar disebabkan oleh ekstraksi dan pembakaran bahan bakar fosil (Grubert & Zacarias, 2022). Aspek keselamatan dan kesehatan kerja sangat penting dalam upaya dekarbonisasi pembangkit listrik di Indonesia. Penerapan teknologi energi terbarukan dapat memberikan manfaat bagi lingkungan dan mengurangi emisi GRK yang menyebabkan perubahan iklim. Namun, implementasi teknologi ini harus dilakukan dengan memperhatikan juga aspek keselamatan dan kesehatan kerja, terutama terkait dengan instalasi dan operasi pembangkit listrik. Kegagalan sistem atau insiden yang tidak terduga dapat menyebabkan kerusakan lingkungan, kehilangan nyawa, dan kerusakan ekonomi yang signifikan. Oleh karena itu, pengembangan teknologi harus memastikan bahwa teknologi yang diterapkan aman dan andal, dan bahwa operasi dan pemeliharaannya dilakukan dengan standar keselamatan yang tinggi. Dengan memperhatikan aspek keselamatan dan kesehatan kerja, maka transisi ke sumber energi terbarukan dapat dilakukan dengan sukses dan berkelanjutan (Liu *et al.*, 2022).

Tabel 3. Rangkuman Karakteristik Ketiga Teknologi CCUS

| Teknologi | Keuntungan | Keterbatasan |
|------------------|--|--|
| Pra-pembakaran | - Kisaran CO ₂ 15-60% - Gas kaya H ₂ digunakan sebagai bahan bakar | - Tambahan biaya untuk peralatan penangkapan |
| Pasca-Pembakaran | - Teknologi sangat berkembang - Dapat dengan mudah dipasang ke unit yang ada | - Tingkat CO ₂ cukup rendah - Tingkat konsumsi energi tinggi |
| Oxy fuel | - Konsentrasi CO ₂ lebih dari 80% - Aliran CO ₂ dimurnikan untuk menghilangkan gas yang tidak terkondensasi | - Besarnya oksigen yang dibutuhkan membuat proses mahal - Teknologi kurang berkembang |

**Gambar 4.** Ilustrasi Sederhana Proses Penangkapan Karbon Pasca-Pembakaran

Pada praktik dekarbonisasi perlu juga diperhatikan pengelolaan sumber daya secara bertanggung jawab atau efisien sehingga tidak menghambat proses pembangunan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Ancaman perubahan iklim memotivasi perubahan mendesak dengan melakukan upaya dekarbonisasi pada sektor energi secara global yang didominasi bahan bakar fosil. Dekarbonisasi atau upaya pengurangan emisi karbon adalah kebutuhan saat ini, dan esensi dekarbonisasi bergantung pada pengurangan intensitas emisi. Skenario dekarbonisasi di sektor pembangkit listrik dapat dilakukan melalui peningkatan porsi energi terbarukan, atau dengan mengintegrasikan PLTU batubara dengan teknologi CCUS karena bagaimanapun proses transisi sepenuhnya ke energi non-fosil membutuhkan waktu yang tidak sebentar. Penggunaan biomassa untuk penerapan *cofiring* biomassa dan batubara pada PLTU batubara memiliki potensi besar untuk membatasi emisi karbon bagi sektor pembangkitan listrik. Namun penerapan *cofiring* biomassa dihadapkan pada tantangan ketersediaan pasokan biomassa

secara kontinu. Sementara, penerapan teknologi CCUS di Indonesia perlu pertimbangan yang matang terutama karena faktor biaya yang tinggi dan trend proyek CCUS yang sebagian besar masih dalam tahap studi dan pengembangan. Oleh karena itu, pengembangan konsep penyediaan biomassa berkelanjutan perlu menjadi fokus penelitian pada tahap selanjutnya dengan tujuan untuk memperkuat ekosistem pasokan biomassa di masa mendatang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada PT PLN (Persero) Puslitbang Ketenagalistrikan yang telah mendukung keberlangsungan studi ini, dan Program Studi PPI Universitas Diponegoro untuk kolaborasinya.

DAFTAR PUSTAKA

Adewuyi, O.B., Kiptoo, M.K., Afolayan, A.F., Amara, T., Alawode, O.I., & Senjyu, T. 2020. Challenges and Prospects of Nigeria's Sustainable Energy Transition With Lessons from Other Countries' Experiences. *Energy*

- Reports*, 6: 993–1009. DOI: 10.1016/j.egy.2020.04.022
- Algarni, S., Tirth, V., Alqahtani, T., Alshehery, S., & Kshirsagar, P. 2023. Contribution of Renewable Energy Sources to the Environmental Impacts and Economic Benefits for Sustainable Development. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 56: p.103098. DOI: 10.1016/j.seta.2023.103098
- Arifin, Z., Insani, V.F.S., Idris, M., Hadiyati, K.R., Anugia, Z., & Irianto, D. 2023. Techno-Economic Analysis of Co-firing for Pulverized Coal Boilers Power Plant in Indonesia. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(2): 261–269. DOI: 10.14710/ijred.2023.48102
- Bokka, H.K., & Lau, H.C. 2023. Decarbonising Vietnam's power and industry Sectors by Carbon Capture and Storage. *Energy*, 262: p.125361. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125361
- Cormos, C.C., & Dinca, C. 2021. Techno-Economic and Environmental Implications of Decarbonization Process Applied for Romanian Fossil-Based power Generation Sector. *Energy*, 220: p.119734. DOI: 10.1016/j.energy.2020.119734
- Del Río, P., & Kiefer, C.P. 2021. Academic Research on Renewable Electricity Auctions: Taking Stock and Looking Forward. *Energy Policy*, 173: p.113305. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113305
- Demirbaş, A. 2003. Sustainable Cofiring of Biomass with Coal. *Energy Conversion and Management*, 44(9): 1465–1479. DOI: 10.1016/S0196-8904(02)00144-9
- Devaraja, U.M.A., Supunsala, S.D.S., & Gunarathne, D.S. 2020. Technical and Environmental Feasibility of Co-firing Torrefied Biomass in a Coal-fired Power Plant. *MERCon 2020 - 6th International Multidisciplinary Moratuwa Engineering Research Conference, Proceedings*, pp.499–504. DOI: 10.1016/j.mercon.2020.09.185228
- Esquiaqui, L., de Oliveira Miranda Santos, S.D.F., & Ugaya, C.M.L. 2023. A systematic review of densified biomass products life cycle assessments. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(8): 9311–9334. DOI: 10.1007/s13762-022-04752-1
- Figueiredo, R., Nunes, P., & Brito, M.C. 2021. The Resilience of a Decarbonized Power System to Climate Variability: Portuguese Case Study. *Energy*, 224: p.120125. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120125
- Grubert, E., & Zacarias, M. 2022. Paradigm shifts for environmental assessment of decarbonizing energy systems: Emerging dominance of embodied impacts and design-oriented decision support needs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159: p.112208. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112208
- Hariana, Prabowo, Hilmawan, E., Milky Kuswa, F., Darmawan, A., & Aziz, M. 2022. A Comprehensive Evaluation of Cofiring Biomass With Coal and Slagging-Fouling Tendency in Pulverized Coal-Fired Boilers. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(7): p.102001. DOI: 10.1016/j.asej.2022.102001
- Hassan, T., Song, H., Khan, Y., & Kirikkaleli, D. 2022. Energy Efficiency a Source of Low Carbon Energy Sources? Evidence From 16 High-Income OECD Economies. *Energy*, 243: p.123063. DOI: 10.1016/j.energy.2021.123063
- Huang, X., Zhang, H., & Zhang, X. 2020. Decarbonising Electricity Systems in Major Cities Through Renewable Cooperation – A Case Study of Beijing and Zhangjiakou. *Energy*, 190: p.116444. DOI: 10.1016/j.energy.2019.116444
- IEA. 2020. The Role of CCUS in Low-Carbon Power Systems. DOI: 10.1787/7be68d30-en
- IEA. 2021. Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021 Global Emissions Rebound Sharply to Highest Ever Level.
- IEA. 2022. Renewable Energy Market Update. DOI: 10.1787/faf30e5a-en
- Jafari, M., Botterud, A., & Sakti, A. 2022. Decarbonizing Power Systems: A Critical Review of the Role of Energy Storage. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158: p.112077. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112077
- Kalantari, H., Sasmito, A.P., & Ghoreishi-Madiseh, S.A. 2021. An Overview of Directions for Decarbonization of Energy Systems in Cold Climate Remote Mines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152: p.111711. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111711

- Lau, H.C. 2023. Decarbonization of ASEAN's Power Sector: A Holistic Approach. *Energy Reports*, 9: 676–702. DOI: 10.1016/j.egy. 2022.11.209
- Lin, B., & Li, Z. 2020. Is More Use of Electricity Leading to Less Carbon Emission Growth? An Analysis with a Panel Threshold Model. *Energy Policy*, 137: p.111121. DOI: 10.1016/j.enpol.2019.111121
- Lin, Chau, K.Y., Moslehpour, M., Linh, H.V., Duong, K.D., & Ngo, T.Q. 2022. Factors Influencing the Sustainable Energy Technologies Adaptation in ASEAN Countries. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53(PC): p.102668. DOI: 10.1016/j.seta.202 2.102668
- Lindroos, T.J., Mäki, E., Koponen, K., Hannula, I., Kiviluoma, J., & Raitila, J. 2021. Replacing Fossil Fuels With Bioenergy in District Heating – Comparison of Technology Options. *Energy*, 231: p.120799. DOI: 10.1016/j.energy.2021.120799
- Liu, H., Khan, I., Zakari, A., & Alharthi, M. 2022. Roles of trilemma in the World Energy Sector and Transition Towards Sustainable Energy: A Study of Economic Growth and the Environment. *Energy Policy*, 170: p.113238. DOI: 10.1016/j.enpol.2022.113238
- McLaughlin, H., Littlefield, A.A., Menefee, M., Kinzer, A., Hull, T., Sovacool, B.K., Bazilian, M. D., Kim, J., & Griffiths, S. 2023. Carbon Capture Utilization and Storage in Review: Sociotechnical Implications for a Carbon Reliant World. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 177: p.113215. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113215
- Mohd Idris, M.N., Hashim, H., Leduc, S., Yowargana, P., Kraxner, F., & Woon, K.S. 2021. Deploying bioenergy for decarbonizing Malaysian energy sectors and alleviating renewable energy poverty. *Energy*, 232: p.120967. DOI: 10.1016/j.energy.2021. 120967
- Moshood, T.D., Nawanir, G., Ahmad, M.H., Lee, K. L., & Hussain, S. 2022. Sustainable Business Model Innovation and Perspective of Using Microalgae To Produce Biofuel: a Systematic Literature Review. *Journal of Sustainability Science and Management*, 17(3): 291–312. DOI: 10.46754/jssm.2022.03.022
- Papadis, E., & Tsatsaronis, G. 2020. Challenges in the decarbonization of the energy sector. *Energy*, 205: p.118025. DOI: 10.1016/j.energy.2020.118025
- Pemerintah Republik Indonesia. 2014. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 79 Tahun 2014 Tentang Kebijakan Energi Nasional (pp. 1–36).
- Plazas-Niño, F.A., Ortiz-Pimiento, N.R., & Montes-Páez, E.G. 2022. National Energy System Optimization Modelling for Decarbonization Pathways Analysis: A Systematic Literature Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162: p.112406. DOI: 10.1016/j.rser.2 022.112406
- PLN. 2021a. Laporan Keberlanjutan PLN 2021 “Optimizing Strategy in Realizing Sustainable Energy Transition.”
- PLN. 2021b. Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021–2030. <https://web.pln.co.id/statics/uploads/2021/10/ruptl-2021-2030.pdf>
- Primadita, D.S., Kumara, I.N.S., & Ariastina, W.G. 2020. A Review on Biomass for Electricity Generation in Indonesia. *Journal of Electrical, Electronics and Informatics*, 4(1): 1-4. DOI: 10.24843/jeei.2020.v04.i01.p01
- Raychaudhuri, A., & Ghosh, S.K. 2016. Biomass Supply Chain in Asian and European Countries. *Procedia Environmental Sciences*, 35: 914–924. DOI: 10.1016/j.proenv.2016.07. 062
- Relva, S.G., Silva, V.O. da, Gimenes, A.L.V., Udaeta, M.E.M., Ashworth, P., & Peyerl, D. 2021. Enhancing Developing Countries' Transition to a Low-Carbon Electricity Sector. *Energy*, 220: p.119659. DOI: 10.1016/j.energy.2020. 119659
- Sammarchi, S., Li, J., Izikowitz, D., Yang, Q., & Xu, D. 2022. China's Coal Power Decarbonization Via CO2 Capture and Storage and Biomass Co-firing: A LCA Case Study in Inner Mongolia. *Energy*, 261: p.125158. DOI: 10.1016/j.energy.2022.125158
- Shu, D.Y., Deutz, S., Winter, B.A., Baumgärtner, N., Leenders, L., & Bardow, A. 2023. The Role of Carbon Capture and Storage to Achieve Net-Zero Energy Systems: Trade-Offs Between Economics and the Environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178: p.113246. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113246
- Song, F., Mehedi, H., Liang, C., Meng, J., Chen, Z.,

- & Shi, F. 2021. Review of transition paths for coal-fired power plants. *Global Energy Interconnection*, 4(4): 354–370. DOI: 10.1016/j.gloe.2021.09.007
- Sugiyono, A., Febijanto, I., Hilmawan, E., & Adiarso. 2022. Potential of biomass and coal co-firing power plants in Indonesia: a PESTEL analysis. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 963(1): p.012007. DOI: 10.1088/1755-1315/963/1/012007
- Suharyati, Pratiwi, N.I., Pambudi, S.H., Wibowo, J. L., Arifin, F.D., Sauqi, A., Damanik, J.T., Pangaribuan, D.B.T., & Kristanto, N. 2022. Outlook Energi Indonesia 2022. Energi Berkelanjutan untuuk Transportasi Darat. Jakarta: Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi (PPIPE) dan Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT).
- Tillman, D.A. 2000. Biomass Cofiring: The Technology, the Experience, the Combustion Consequences. *Biomass and Bioenergy*, 19(6): 365–384. DOI: 10.1016/S0961-9534(00)00049-0
- Vatalis, K.I., Avlogiaris, G., & Tsalis, T. 2022. Just Transition Pathways of Energy Decarbonization Under the Global Environmental Changes. *Journal of Environmental Management*, 309: p.114713. DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.114713
- Verástegui, F., Lorca, Á., Olivares, D., & Negrete-Pincetic, M. 2021. Optimization-Based Analysis of Decarbonization Pathways and Flexibility Requirements in Highly Renewable Power Systems. *Energy*, 234: p.121242. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121242
- World Economic Forum. 2023. The Global Risks Report 2023. https://www3.weforum.org/docs/WEF_Global_Risks_Report_2023.pdf
- Yana, S., Nizar, M., Irhamni, & Mulyati, D. 2022. Biomass Waste as a Renewable Energy in Developing Bio-based Economies in Indonesia: A Review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160(5): p.112268. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112268
- Yu, B., Fang, D., Xiao, K., & Pan, Y. 2023. Drivers of Renewable Energy Penetration and Its Role in Power Sector's Deep Decarbonization Towards Carbon Peak. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 178: p.113247. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113247
- Zahraee, S.M., Shiwakoti, N., & Stasinopoulos, P. 2020. Biomass Supply Chain Environmental and Socio-Economic Analysis: 40-Years Comprehensive Review of Methods, Decision Issues, Sustainability Challenges, and the Way Forward. *Biomass and Bioenergy*, 142: p.105777. DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105777