

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) dan Konteks Indonesia

2.1.1 Karakteristik dan Dampak PLTU

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbahan bakar batu bara telah lama menjadi tulang punggung sistem kelistrikan di banyak negara, termasuk Indonesia. Di Indonesia, PLTU batu bara memegang peran penting dalam penyediaan listrik. Hingga tahun 2021, PLTU batu bara menyumbang sekitar 60% dari total kapasitas pembangkit listrik nasional (ESDM, 2022). Ketersediaan batu bara domestik dan biaya operasional yang relatif rendah menjadi faktor utama dominasi PLTU batu bara dalam bauran energi Indonesia (Clark, Zucker & Urpelainen, 2020).

Meskipun relatif efisien dalam produksi listrik, di dalam operasionalnya PLTU batu bara itu mengeluarkan berbagai macam polutan seperti sulfur dioksida (SO_2), Nitrogen Oksida (NO_x) partikulat (Dai, et al., 2019), bahkan timbal dan merkuri (Yulinawati et al. 2019). Dampak ini, terutama emisi CO_2 , berkontribusi pada perubahan iklim (Burniaux dan Chateau, 2014) dan membahayakan kualitas udara dan kesehatan masyarakat (Hannun dan Razzaq, 2022).

Menurut (Kumara, 2009), pertumbuhan pembangunan PLTU di Indonesia mengalami peningkatan yang signifikan sejak Program PLT10 diluncurkan pada tahun 2006. Pertumbuhan ini didorong oleh permintaan listrik yang tinggi, ketersediaan batu bara, dan kebijakan pemerintah yang pro-PLTU. Program pembangunan 10.000 Megawatt (MW) Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) batu bara dilandaskan pada Peraturan Presiden Republik Indonesia (Perpres) Nomor 71 Tahun 2006. Melalui Perpres ini, pemerintah menunjuk Perusahaan Listrik Negara (PLN) sebagai Penyelenggara Ketenagalistrikan Umum (PKUK) untuk melaksanakan program percepatan pembangunan pembangkit listrik baru. Program ini meliputi pembangunan 10 PLTU di pulau Jawa dan 25 PLTU di luar Jawa dan Bali.

Berdasarkan data dari Global Energy Monitor (2024) mengenai pembangunan PLTU baru tahunan per negara di dunia periode 2000-2023, kapasitas PLTU Nasional Indonesia secara total mencapai 44.867 MW. Pada Gambar 2.1 diperlihatkan bahwa pembangunan PLTU baru mayoritas terjadi pada kurun waktu antara 2011-2023. Dengan demikian, usia PLTU di Indonesia sebagian besar masih sekitar 14 tahun. Relatif muda untuk masa operasi batu bara secara umum yang bisa mencapai 57 tahun (Wang, 2019).

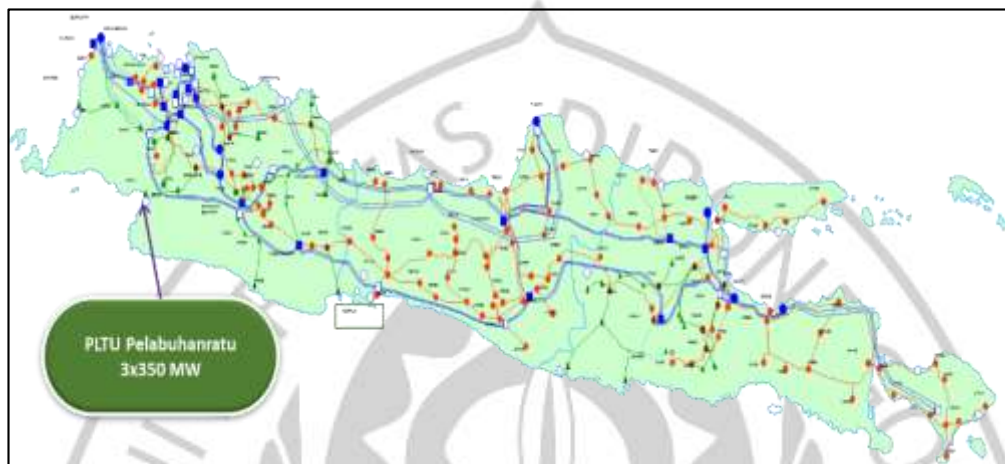


Gambar 2.1 Tren pembangunan kapasitas listrik PLTU batu bara baru di Indonesia pada 2000-2023

2.1.2 PLTU Pelabuhan Ratu: Profil dan Signifikansi

PLTU Pelabuhan Ratu dengan kapasitas 3x350 MW, untuk saat ini adalah PLTU batu bara terbesar di Provinsi Jawa Barat. PLTU Pelabuhan Ratu terletak di pesisir pantai selatan Jawa Barat sekitar 60 KM ke arah Selatan Kota Sukabumi atau sekitar 120 KM ke arah Selatan Jakarta.

PLTU Pelabuhan Ratu dibangun di atas lahan seluas 81 hektar yang dikelilingi oleh pantai yang curam dan tebing-tebing yang terjal serta hutan yang masih lebat sebagai paru-paru bagi lingkungan sekitar, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Peta sub sistem jaringan listrik

PLTU Pelabuhan Ratu adalah salah satu pembangkit PT PLN (Persero) yang dibangun sejak tahun 2008 dan merupakan bagian program pembangunan pembangkit 10.000 MW. Tetapi diawali dengan Keputusan Menteri BUMN Nomor: SK-352/MBU/10/2021 tanggal 22 Oktober 2021 jo. Keputusan Menteri BUMN Nomor: SK-033/MBU/Wk1/03/2022 tanggal 16 Maret 2022 tentang Tim Percepatan Pembentukan Subholding PT Perusahaan Listrik Negara (Persero), telah dilaksanakan serangkaian tahapan oleh Manajemen PLN dengan dukungan lintas Kementerian untuk membentuk Holding PLN dan Subholding. Peluncuran organisasi Holding dan Subholding PLN oleh Bapak Menteri BUMN pada 21 September 2022 adalah salah satu tonggak penting, yang ditandai dengan perubahan nomenklatur dan struktur Dewan Direksi Holding, serta penetapan 4 Subholding yang akan dibentuk. Tahapan ini dilaksanakan berdasarkan Surat Direksi PLN, Tanggapan Tertulis Dewan Komisaris PLN tanggal 19 September 2022 dan Keputusan RUPS PLN tanggal 20 September 2022 tentang Penetapan Blueprint Organisasi. Referensi kajian yang mendukung proses persetujuan

tersebut yang terdiri atas Kajian Kelayakan (Feasibility Study) dan Kajian Rencana Pengembangan Perusahaan dan Implementation Program. Empat Subholding yang dibentuk tersebut terdiri dari 2 Subholding Pembangkitan, 1 Subholding Energi Primer, dan 1 Subholding Beyond kWh. Salah satu Subholding Pembangkitan yang ditetapkan adalah PT PLN Indonesia Power (PLN IP).

Aspek pertama adalah terkait dengan lingkup utama aktivitas bisnis Subholding PLN IP, yaitu ditetapkannya PLN IP sebagai salah satu Subholding Pembangkitan PLN. Sebagai konsekuensi atas pembagian peran tersebut, PLN mengalihkan kepemilikan aset-aset pembangkit yang tersebar di seluruh wilayah Indonesia ke PLN IP, sehingga kapasitas terpasang pembangkit PLN IP meningkat dari 10,2 GW (164 mesin) sebelum HSH, menjadi 21,08 GW (399 mesin) pasca HSH. Maka per 1 Januari 2023 PLTU Pelabuhan Ratu kepemilikannya di bawah PT PLN Indonesia Power.

Tabel 2.1 menyajikan informasi mengenai tanggal resmi ketika pembangkit listrik mulai beroperasi secara komersial dan memasok listrik ke jaringan. PLTU Pelabuhan Ratu mulai masuk ke sistem interkoneksi Jawa Bali dengan jaringan sub sistem Cibinong sejak 3 Desember 2012 untuk unit 1, unit 2 pada tanggal 7 Mei 2013, sedangkan unit 3 pada tanggal 7 September 2013.

Tabel 2.1 Deskripsi Aset Pembangkit (sumber: internal PT PLN IP)

<i>Nama Mesin</i>	<i>Tahun COD</i>	<i>DTP (MW)</i>	<i>DMN (MW)</i>	<i>Jaringan</i>	<i>Sistem</i>
<i>PLTU Pelabuhan Ratu 1</i>	2013	350	323	150 kV	Cibinong
<i>PLTU Pelabuhan Ratu 2</i>	2014	350	323	150 kV	Cibinong
<i>PLTU Pelabuhan Ratu 3</i>	2014	350	323	150 kV	Cibinong

PLTU Pelabuhan Ratu berperan sebagai pembangkit *base load* yang dilengkapi program anti *blackout* berupa *free governor* dan Automatic Generation Control (AGC) pada sub sistem Cibinong – Depok – Salak – Pratu 150 kV yang memiliki peran dalam menyuplai beban di Jawa Barat dengan porsi sebesar 51,8% dari total pembebanan sebesar 1.871 MW.

[illegible]

Berdasarkan Gambar 2.3 di atas, PLTU Pelabuhan Ratu menyuplai beban sebesar 45,05% porsi dari total pembebanan, atau sebesar 864 MW. Dari data PT PLN (Persero) UP2B Jakarta dan Banten menunjukkan bahwa periode beban puncak teramati pada siang tanggal 6 Juni 2024 Pukul 13:30 WIB. Kontribusi pembebanan pada sub sistem Cibinong yang terdiri dari PLTU Pelabuhan Ratu, PLTP Salak, *Interbus Transformer* (IBT) 500/150 kV terlihat pada Tabel 2.2.

<i>PLTU Pelabuhan Ratu 1-3</i>	864
<i>PLTP Salak 1-6</i>	339
<i>IBT Cibinong 1-2</i>	469
<i>IBT Depok 2</i>	246
<i>Total</i>	1.918

Berdasarkan data pada Tabel 2.2, PLTU Pelabuhan Ratu memiliki kontribusi yang lebih dominan dibandingkan pasokan listrik dari pembangkit listrik maupun IBT yang lain di sub sistem Cibinong. Dengan demikian, keberadaan PLTU Pelabuhan Ratu saat ini krusial dalam manajemen pasokan energi listrik. Berikut beberapa kinerja operasional terkait PLTU Pelabuhan Ratu :

2.1.2.1 EAF (*Equivalent Availability Factor*)

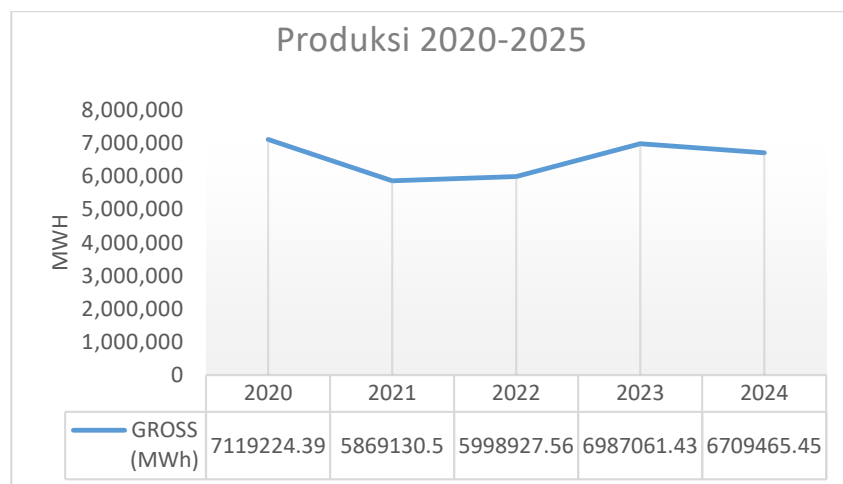
EAF (*Equivalent Availability Factor*) adalah faktor kesiapan unit pembangkit. Nilai EAF berupa perbandingan yang didapat dari kesiapan pembangkit untuk beroperasi (baik dalam kondisi stand by ataupun operasi) dibagi terhadap waktu



Gambar 2.4 Trend Kinerja EAF PLTU Pelabuhan Ratu 5 Tahun Terkait (Buku Power Generation Plan PLTU Pelabuhan Ratu)

2.1.2.2 Produksi

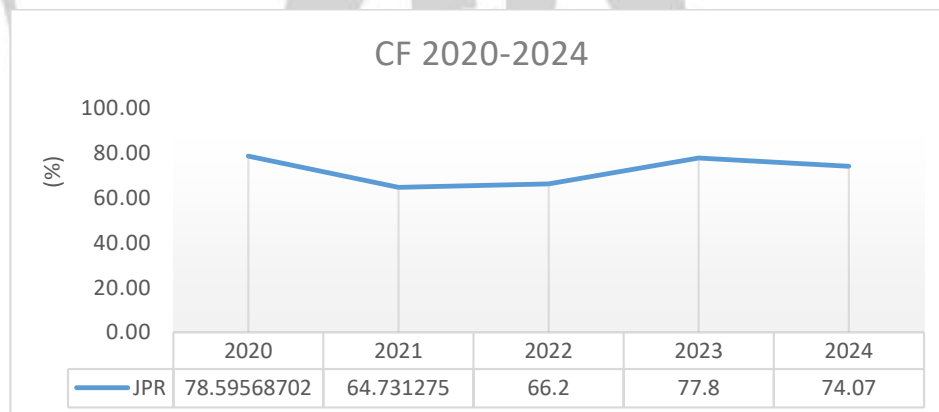
Produksi listrik dalam satuan kWh (kilowatt-hour) dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah hasil dari proses konversi energi kimia bahan bakar (seperti batu bara) menjadi energi panas, lalu energi panas tersebut digunakan untuk memanaskan air menjadi uap, dan akhirnya uap tersebut menggerakkan turbin yang terhubung dengan generator untuk menghasilkan listrik. Berikut data histori 5 tahun terakhir PLTU Pelabuhan Ratu 2020-2024.



Gambar 2.5 Trend Produksi PLTU Pelabuhan Ratu 5 Tahun Terkait (Buku Power Generation Plan PLTU Pelabuhan Ratu)

2.1.2.3 Capacity Factor

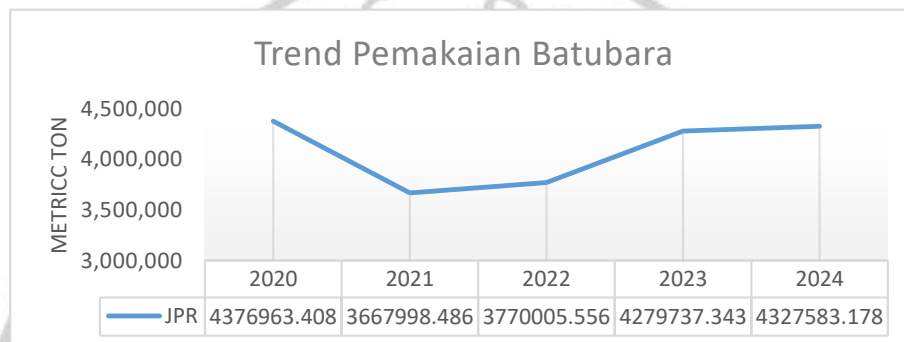
Capacity factor (CF) PLTU adalah rasio antara energi listrik yang sebenarnya dihasilkan oleh pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) dalam periode tertentu, dibandingkan dengan energi maksimum yang bisa dihasilkan jika PLTU beroperasi penuh. Berikut data histori 5 tahun terakhir PLTU Pelabuhan Ratu 2020-2024.



Gambar 2.6 Trend CF PLTU Pelabuhan Ratu 5 Tahun Terkait (Buku Power Generation Plan PLTU Pelabuhan Ratu)

2.1.2.4 Pemakaian Batubara

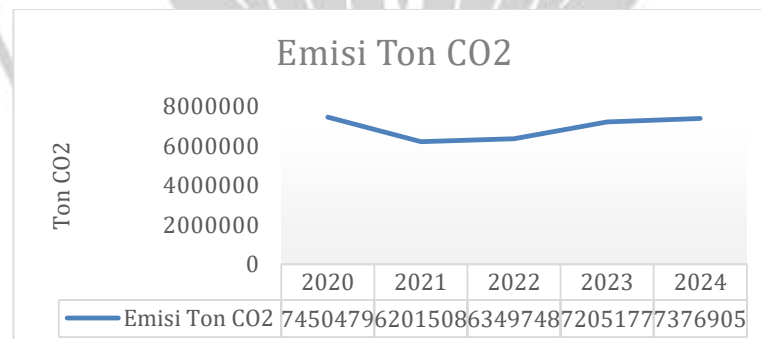
Pemakaian batubara di Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah sebagai bahan bakar utama untuk memanaskan air dan mengubahnya menjadi uap bertekanan tinggi, yang kemudian digunakan untuk memutar turbin dan menghasilkan energi listrik. Berikut data histori 5 tahun terakhir PLTU Pelabuhan Ratu 2020-2024.



Gambar 2.7 Trend Pemakaian Batubara PLTU Pelabuhan Ratu 5 Tahun Terkait (Buku Power Generation Plan PLTU Pelabuhan Ratu)

2.1.2.5 Emisi CO₂

Nilai emisi CO₂ merupakan perkiraan besaran emisi CO₂ yang akan dihasilkan oleh masing-masing pembangkit sampai dengan berakhirnya masa kontrak. Nilai emisi CO₂ dihitung berdasarkan formula Faktor Emisi CO₂ (Setya Budi, 2013). Berikut data histori 5 tahun terakhir PLTU Pelabuhan Ratu 2020-2024.



Gambar 2.8 Trend Emisi Ton CO₂ PLTU Pelabuhan Ratu (Aplikasi Perhitungan & Pelaporan Emisi Ketenagalistrikan Kementrian ESDM)

2.1.2.6 *Early Retirement* PLTU Pelabuhan Ratu

Pemerintah juga telah menerbitkan Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan Untuk Penyediaan Tenaga Listrik, dimana salah satu upayanya adalah melalui percepatan pengakhiran (*early retirement*) masa operasional PLTU. Di dalam Perpres tersebut disebutkan bahwa Menteri akan menetapkan daftar PLTU yang akan dicantumkan dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) untuk dilakukan *early retirement* dengan kriteria-kriteria antara lain: kapasitas, usia pembangkit, utilisasi, emisi Gas Rumah Kaca (GRK) PLTU, nilai tambah ekonomi, ketersediaan dukungan pendanaan dalam dan luar negeri, dan ketersediaan dukungan teknologi dalam dan luar negeri.

PLN sebagai BUMN kelistrikan juga melakukan upaya transisi energi yang berhubungan dengan *early retirement* PLTU yang ditunjukkan dalam RUPTL PT PLN (Persero) tahun 2021-2030, dimana antara lain disebutkan (Menteri ESDM, 2021):

1. Akan dikembangkan penambahan porsi energi terbarukan sebesar 21 Giga Watt.
2. (GW) yang bersumber dari Solar Photo Voltaic (Solar PV) sekitar 4,7 GW dan sumber energi terbarukan lainnya hingga 25% bauran energi sampai 2030, namun demikian masih terdapat 14 GW PLTU yang telah terkontrak dan akan bertambah dalam 10 tahun ke depan.
3. Komitmen untuk melakukan rencana pemberhentian operasional lebih cepat sekitar 9,2 GW PLTU sampai dengan 2030 yang berusia di bawah 20 tahun dan pemberhentian operasional PLTU yang berusia di atas 30 tahun. Namun demikian, pada RUPTL ini juga menyebutkan bahwa PLTU tua bisa saja memiliki usia operasi yang lebih lama jika dapat dilakukan *refurbished* atau *retrofit* yang akan menambah usia operasi hingga 10 sampai 20 tahun ke depan.

Rencana *early retirement* PLTU sebesar sekitar 9,2 GW berdasarkan RUPTL 2021- 2030 setara dengan pengurangan emisi karbon sebesar 53 juta ton CO₂. Hal

ini akan berdampak pada kontribusi pengurangan emisi secara global. Selanjutnya PLTU akan digantikan oleh pembangkit ramah lingkungan dari energi baru terbarukan. Jika hal ini berjalan sesuai rencana, maka rangkaian perwujudan transisi energi dari energi fosil ke energi baru terbarukan akan dapat terlaksana sesuai dengan peta jalan yang telah disusun dan semakin dekat pada perwujudan target NZE di tahun 2060. PLTU Pelabuhan Ratu adalah salah satu pembangkit yang masuk kedalam salah satu pembangkit yang masuk wacana dalam program early retirement, hal ini diperkuat pada saat penandatanganan *Principal Framework Agreement (PFA)* antara PLN dan PT BA pada acara G20 di tanggal 18 Oktober 2022.

2.2 Transisi Energi dan Dekarbonisasi Sektor Kelistrikan

Dalam penelitian ini, transisi energi didefinisikan sebagai proses pergeseran dari sistem energi berbasis bahan bakar fosil menuju sistem energi rendah karbon, dengan tujuan utama mengurangi emisi gas rumah kaca dan memitigasi perubahan iklim.

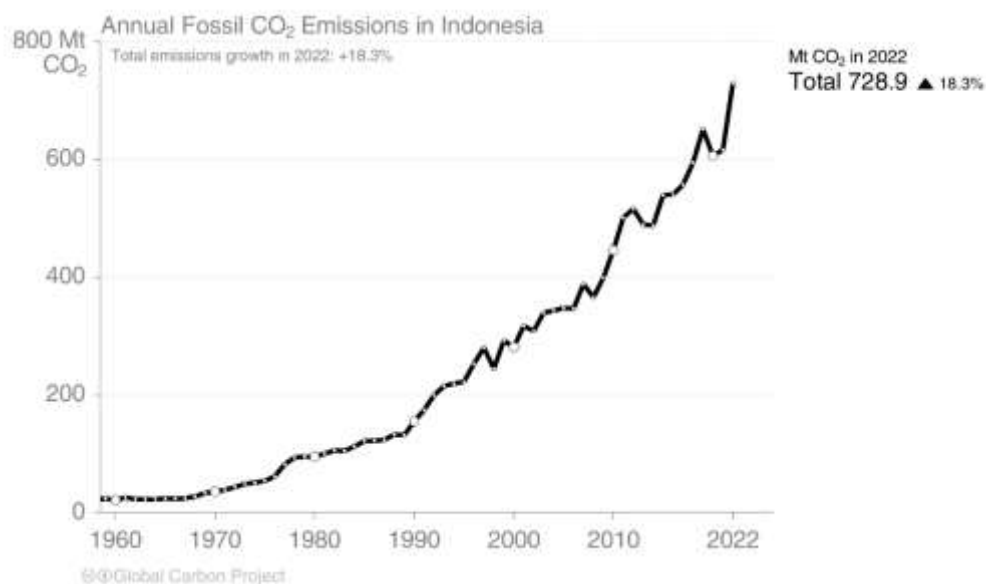
2.2.1 Konsep dan Urgensi Transisi Energi Global

Menurut IPCC (2022), transisi energi mengusung upaya peralihan jangka panjang dari sistem energi berbasis bahan bakar fosil menuju sistem energi yang didasarkan pada sumber energi rendah karbon atau nol karbon. Konsep serupa juga dikemukakan oleh IRENA (2023), yang menjelaskan transisi energi sebagai transformasi sektor energi menuju masa depan yang lebih berkelanjutan, aman, dan rendah karbon. Sedangkan, World Bank (2023) menjelaskan transisi energi sebagai **proses peralihan sistem energi global dari konsumsi bahan bakar fosil menuju teknologi rendah karbon, untuk mendukung tujuan internasional dalam membatasi perubahan iklim.**

Berdasarkan ide-ide di atas, konsep transisi energi merupakan konsep proses transformasi sistem energi yang bersifat gradual dan konteksnya untuk memenuhi tuntutan perubahan adaptasi iklim global, proses jangka panjang dan rendah karbon.

Transisi energi bertujuan untuk menciptakan sistem energi yang lebih berkelanjutan, mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, dan meningkatkan penggunaan energi terbarukan. Tujuan utamanya adalah dekarbonisasi sektor energi untuk mencapai target pengurangan emisi gas rumah kaca sesuai Persetujuan Paris 2015.

Sektor ketenagalistrikan merupakan salah satu kontributor utama emisi gas rumah kaca (GRK) global, dengan menyumbang sekitar 35% dari total emisi GRK dunia pada tahun 2023 (IEA, 2024; Bruckner, et al., 2014)). Di Indonesia, situasinya bahkan lebih signifikan, di mana sektor ini menyumbang sekitar 41% dari total emisi nasional (Global Carbon Budget, 2023), sebagaimana tersaji pada Gambar 2.4. Dominasi pembangkit listrik berbahan bakar fosil, terutama batu bara yang menyumbang lebih dari 60% dari bauran energi listrik nasional, menjadi penyebab utama tingginya emisi dari sektor ini (ESDM, 2022).



Gambar 2.9 Emisi CO₂ tahunan di Indonesia dari 1950-an hingga 2023.
(Sumber: Global Carbon Budget, 2023).

Oleh karena itu, dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan menjadi kunci dalam upaya mitigasi perubahan iklim, baik di tingkat global maupun nasional. Urgensi dekarbonisasi ini semakin dipertegas oleh komitmen Indonesia dalam Persetujuan Paris untuk mengurangi emisi GRK sebesar 29% dengan usaha sendiri atau hingga 41% dengan dukungan internasional pada tahun 2030 (Pemerintah

Indonesia, 2016). Dalam konteks ini, transformasi sektor ketenagalistrikan menjadi lebih bersih dan berkelanjutan tidak hanya penting untuk mencapai target iklim, tetapi juga berpotensi memberikan manfaat tambahan seperti peningkatan kualitas udara, penciptaan lapangan kerja hijau, dan penguatan ketahanan energi nasional (IRENA, 2023).

Namun, dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan di Indonesia menghadapi tantangan yang kompleks. Ini termasuk ketergantungan yang tinggi pada infrastruktur berbasis batu bara yang sudah ada, kebutuhan investasi yang besar untuk transisi ke energi terbarukan, serta isu-isu teknis seperti *intermittency* dan stabilitas jaringan (ADB, 2022). Meskipun demikian, berbagai inisiatif telah diluncurkan untuk mendorong transisi ini, termasuk kebijakan percepatan pengembangan energi terbarukan, rencana *early retirement* pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batu bara, serta skema inovatif seperti Energy Transition Mechanism (ETM) yang didukung oleh Asian Development Bank (Perpres No. 112 Tahun 2022, 2022).

Dengan demikian, upaya dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan di Indonesia tidak hanya menjadi keharusan dalam konteks mitigasi perubahan iklim global, tetapi juga menjadi katalis potensial untuk transformasi menuju sistem energi yang lebih berkelanjutan, efisien, dan berdaya saing di masa depan.

Strategi transisi energi di sektor pembangkit listrik melibatkan berbagai pendekatan komprehensif untuk mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan meningkatkan peran energi bersih. Beberapa strategi kunci meliputi:

1. Peningkatan efisiensi pembangkit listrik eksisting
2. Pengembangan energi terbarukan secara masif
3. Implementasi teknologi penyimpanan energi
4. Penerapan *smart grid* dan manajemen beban
5. *Early retirement* pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang tidak efisien.

Peningkatan efisiensi pembangkit listrik eksisting berfokus pada optimalisasi kinerja pembangkit listrik yang sudah ada, terutama pembangkit berbahan bakar fosil. Menurut siaran pers Kementerian ESDM (2024), peningkatan

efisiensi pembangkit konvensional dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 25% tanpa perubahan bahan bakar dari total upaya reduksi emisi GRK di Indonesia. Teknik-teknik seperti pembaruan turbin (Campbell, 2013), optimalisasi proses pembakaran (Jasbeer Singh et al., 2023), dan penerapan sistem manajemen energi yang lebih baik dapat meningkatkan efisiensi secara signifikan (IEA, 2021).

Ekspansi besar-besaran energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, hidro, dan geotermal menjadi inti dari strategi transisi energi. IRENA (2022) melaporkan bahwa biaya energi terbarukan terus menurun, dengan tenaga surya dan angin darat menjadi sumber listrik termurah di banyak negara. Di Indonesia, target 23% bauran energi terbarukan pada tahun 2025 mendorong pengembangan proyek-proyek energi bersih skala besar (ESDM, 2021).

Early retirement pembangkit listrik menjadi opsi yang saat ini sedang dalam proses implementasi kebijakan. Strategi ini melibatkan penghentian operasi pembangkit listrik berbahan bakar fosil, terutama batu bara, sebelum akhir masa operasionalnya yang direncanakan. Menurut analisis Carbon Tracker (2020), hingga 45% pembangkit batu bara global tidak lagi ekonomis dibandingkan dengan energi terbarukan. Di Indonesia, program Energy Transition Mechanism (ETM) yang didukung ADB bertujuan untuk memfasilitasi *early retirement* PLTU batu bara dan mempercepat transisi ke energi bersih (ADB, 2022).

Implementasi strategi-strategi ini secara terpadu diperlukan untuk mencapai transisi energi yang efektif. Namun, tantangan seperti kebutuhan investasi yang besar, kendala teknis, dan resistensi dari pemangku kepentingan tertentu perlu diatasi melalui kebijakan yang koheren, inovasi teknologi, dan kerjasama internasional.

Energi terbarukan seperti tenaga surya, angin, hidro, dan geotermal memegang peran kunci dalam transisi energi. Di Indonesia, pengembangan energi terbarukan didorong melalui berbagai kebijakan dan insentif, dengan target 23% bauran energi terbarukan pada tahun 2025 (ESDM, 2022).

2.2.2 Peran *early retirement* PLTU dalam dekarbonisasi kelistrikan

Menurut studi oleh Climate Analytics (2019), untuk memenuhi target Persetujuan Paris dalam membatasi pemanasan global di bawah 1,5°C, negara-negara OECD dan Uni Eropa harus menghentikan penggunaan batu bara pada tahun 2031, sedangkan negara-negara lain termasuk Indonesia harus melakukannya pada tahun 2037. Hal ini menunjukkan pentingnya strategi *early retirement* PLTU dalam konteks global.

Persetujuan Paris 2015 menetapkan target global untuk membatasi pemanasan global di bawah 2°C, lebih disukai 1,5°C, dibandingkan era pra-industri. Menurut Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2022), untuk mencapai target ini, emisi global harus mencapai puncaknya sebelum 2025 dan turun 43% pada 2030 dibandingkan level 2019. Sektor energi, terutama pembangkit listrik berbahan bakar fosil, menjadi fokus utama upaya pengurangan emisi ini.

Banyak negara telah mengadopsi kebijakan dan regulasi yang mendukung transisi energi. Misalnya, Uni Eropa melalui European Green Deal berkomitmen mencapai netral karbon pada 2050 (European Commission, 2019). Di Asia, Jepang dan Korea Selatan telah mengumumkan target net-zero emissions pada 2050, sementara China menargetkan hal serupa pada 2060 (Climate Action Tracker, 2021). Kebijakan-kebijakan ini menciptakan tekanan untuk mempercepat penonaktifan pembangkit listrik berbahan bakar fosil.

Di Indonesia, ADB (2022) telah meluncurkan proyek percontohan ETM dengan nilai US\$250-300 juta untuk memfasilitasi *early retirement* satu unit PLTU. Proyek ini diharapkan dapat mengurangi emisi CO₂ hingga 30 juta ton selama 15 tahun. Beberapa contoh implementasi *early retirement* PLTU di berbagai negara:

- Jerman: Program phase-out batu bara dengan target penghentian total pada 2038 (Bang, Rosendahl dan Bohringer, 2022).
- AS: Beberapa negara bagian seperti California dan New York telah menerapkan kebijakan penghentian PLTU batu bara (Arnold & Beck, 2023)
- Cina: Rencana penghentian bertahap PLTU batu bara yang tidak efisien (Pan et al., 2023).

Upaya peningkatan efisiensi energi di berbagai sektor telah berkontribusi pada penurunan atau stabilisasi permintaan listrik di beberapa negara maju. International Energy Agency (IEA,2020) melaporkan bahwa peningkatan efisiensi energi telah mengurangi pertumbuhan permintaan energi global sebesar sepertiga sejak 2000. Tren ini, dikombinasikan dengan adopsi teknologi hemat energi dan perubahan pola konsumsi, dapat mengurangi kebutuhan akan kapasitas pembangkit listrik berbahan bakar fosil.

Implementasi *Early retirement* PLTU dalam dekarbonisasi tidak hanya berpengaruh terhadap sektor kelistrikan, namun juga memberikan dampak ekonomi dan lingkungan yang signifikan, diantaranya:

- *Early retirement* PLTU dapat mengakibatkan aset terdampar (*stranded assets*), yang menurut Carbon Tracker Initiative (2018) dapat mencapai \$638 miliar secara global pada 2030. Di Indonesia, potensi kerugian finansial dari penghentian dini PLTU diperkirakan mencapai \$35 miliar (IEEFA, 2020).
- Transisi ke energi terbarukan memerlukan investasi besar. IRENA (2021) memperkirakan bahwa investasi tahunan global dalam transisi energi perlu mencapai \$4,4 triliun pada 2050. Untuk Indonesia, kebutuhan investasi dalam pengembangan energi terbarukan diproyeksikan mencapai \$167,4 miliar hingga 2050 (Dewan Energi Nasional, 2019).
- Transisi energi akan mengubah lanskap ketenagakerjaan. ILO (2018) memproyeksikan bahwa transisi ke ekonomi rendah karbon dapat menciptakan 24 juta pekerjaan baru secara global pada 2030. Namun, hal ini juga berpotensi menghilangkan sekitar 6 juta pekerjaan di sektor energi fosil.
- *Early retirement* PLTU dapat berkontribusi signifikan terhadap pengurangan emisi. Studi oleh Climate Analytics (2019) menunjukkan bahwa penghentian PLTU global pada 2040 dapat mengurangi emisi CO₂ sebesar 12,5 Gt per tahun.
- Pengurangan operasi PLTU batu bara berkorelasi dengan peningkatan kualitas udara. Penelitian di China menunjukkan bahwa pengurangan

kapasitas PLTU sebesar 86 GW antara 2014-2017 menurunkan konsentrasi PM2.5 sebesar 11% (Tong et al., 2018).

- Pengurangan dampak negatif terhadap ekosistem akibat operasi PLTU. PLTU batu bara berdampak negatif terhadap ekosistem melalui pencemaran air, tanah, dan udara. Studi oleh Greenpeace (2017) mengungkapkan bahwa PLTU di Indonesia telah mencemari sumber air dan tanah pertanian di sekitarnya.

2.3 *Multi-level governance* dalam Transisi Energi

2.3.1 Konsep dan Teori Multi-Level Governance

Multi-level governance (MLG) adalah konsep yang menggambarkan kompleksitas proses pengambilan keputusan yang melibatkan berbagai tingkat pemerintahan dan aktor non-pemerintah. Teori ini pertama kali diperkenalkan oleh Gary Marks (1993) dalam konteks kebijakan Uni Eropa, namun sejak itu telah diterapkan secara luas dalam berbagai bidang kebijakan, termasuk transisi energi.

MLG mengakui bahwa kekuasaan dan otoritas tidak lagi terkonsentrasi secara eksklusif pada pemerintah pusat, tetapi tersebar di antara berbagai tingkat pemerintahan (supranasional, nasional, regional, dan lokal) serta aktor non-pemerintah seperti organisasi masyarakat sipil dan sektor swasta (Hooghe & Marks, 2003). Dalam konteks transisi energi, MLG menekankan pentingnya koordinasi dan interaksi antara berbagai pemangku kepentingan dalam merumuskan dan mengimplementasikan kebijakan.

2.3.2 Peran Berbagai *Stakeholders* Dalam Kebijakan Energi Indonesia

Dalam konteks kebijakan energi, MLG telah terbukti menjadi kerangka analitis yang berharga. Penelitian oleh Goldthau (2014) menunjukkan bahwa transisi energi memerlukan pendekatan MLG karena kompleksitas dan sifat lintas sektoral dari tantangan yang dihadapi. MLG memungkinkan analisis yang lebih komprehensif tentang bagaimana kebijakan energi dibentuk dan diimplementasikan melalui interaksi antara berbagai tingkat pemerintahan dan aktor non-pemerintah.

Studi kasus di berbagai negara menunjukkan pentingnya MLG dalam kebijakan energi. Misalnya, di Jerman, keberhasilan *Energiewende* (transisi energi) sebagian besar dikaitkan dengan pendekatan MLG yang memungkinkan partisipasi aktif dari pemerintah federal, negara bagian, kota, dan masyarakat (Schreurs, 2016).

Meskipun MLG menawarkan kerangka yang kuat untuk memahami dan mengelola kompleksitas transisi energi, namun juga menghadirkan tantangan signifikan. Koordinasi antar tingkat pemerintahan seringkali rumit karena perbedaan prioritas, kapasitas, dan sumber daya. Penelitian oleh Sovacool (2011) mengidentifikasi beberapa tantangan utama dalam MLG transisi energi, termasuk konflik yurisdiksi, ketidakselarasan kebijakan, dan kesenjangan implementasi.

Namun, MLG juga menawarkan peluang penting. Ini memungkinkan inovasi kebijakan di tingkat lokal yang dapat menginspirasi perubahan di tingkat nasional. Selain itu, MLG dapat meningkatkan legitimasi kebijakan melalui partisipasi yang lebih luas dari berbagai pemangku kepentingan (Bache, Bartle & Flinders, 2016).

Dalam konteks Indonesia, penerapan MLG dalam kebijakan transisi energi, khususnya terkait *early retirement* PLTU, memerlukan pemahaman mendalam tentang dinamika hubungan antar tingkat pemerintahan dan peran aktor non-pemerintah seperti PLN, sektor swasta, dan masyarakat sipil.

2.4 Kerangka Regulasi dan Perencanaan Energi di Indonesia

2.4.1 UU No. 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan

Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan merupakan landasan hukum utama yang mengatur pengelolaan sektor ketenagalistrikan di Indonesia. UU ini menggantikan UU No. 15 Tahun 1985 dan bertujuan untuk menjamin ketersediaan tenaga listrik dalam jumlah yang cukup, kualitas yang baik, dan harga yang wajar dalam rangka meningkatkan kesejahteraan dan kemakmuran rakyat secara adil dan merata.

Beberapa aspek kunci yang diatur dalam UU No. 30 Tahun 2009 meliputi:

1. Penyediaan dan pemanfaatan tenaga listrik: UU ini mengatur bahwa penyediaan tenaga listrik dikuasai oleh negara yang penyelenggaraannya

dilakukan oleh pemerintah dan pemerintah daerah. Namun, badan usaha swasta, koperasi, dan swadaya masyarakat dapat berpartisipasi dalam usaha penyediaan tenaga listrik (Purwanto, 2016).

2. Perizinan usaha ketenagalistrikan: UU ini mengatur tentang izin usaha penyediaan tenaga listrik dan izin operasi yang diberikan sesuai dengan jenis usahanya. Hal ini membuka peluang bagi partisipasi sektor swasta dalam industri ketenagalistrikan (PwC Indonesia, 2018).
3. Hak dan kewajiban pemegang izin usaha penyediaan tenaga listrik: UU menetapkan hak dan kewajiban pemegang izin usaha, termasuk kewajiban untuk menyediakan tenaga listrik yang memenuhi standar mutu dan keandalan, serta hak untuk memperoleh pembayaran dari konsumen.
4. Penggunaan tanah: UU ini mengatur tentang penggunaan tanah oleh pemegang izin usaha penyediaan tenaga listrik untuk kepentingan ketenagalistrikan (Hasyim, C., et al. 2020).
5. Keselamatan ketenagalistrikan: UU ini menekankan pentingnya keselamatan ketenagalistrikan, termasuk keselamatan instalasi, pemanfaatan tenaga listrik, dan lingkungan.
6. Pembinaan dan pengawasan: UU ini memberikan kewenangan kepada pemerintah dan pemerintah daerah untuk melakukan pembinaan dan pengawasan terhadap usaha penyediaan tenaga listrik (Purwanto, 2016).

Implementasi UU No. 30 Tahun 2009 telah membawa beberapa perubahan signifikan dalam sektor ketenagalistrikan Indonesia, termasuk:

1. Peningkatan partisipasi sektor swasta dalam penyediaan tenaga listrik (ADB, 2020).
2. Desentralisasi kewenangan dalam pengelolaan ketenagalistrikan ke pemerintah daerah (Mori, 2021).
3. Peningkatan fokus pada aspek keselamatan dan perlindungan lingkungan dalam operasi ketenagalistrikan (ESDM, 2021).

Namun, implementasi UU ini juga menghadapi beberapa tantangan, seperti:

1. Kebutuhan harmonisasi dengan regulasi lain terkait investasi dan energi (OECD, 2021).

2. Kompleksitas dalam koordinasi antara pemerintah pusat dan daerah (Mori, 2021).
3. Tantangan dalam menyeimbangkan kepentingan berbagai pemangku kepentingan (Halim et al., 2020).

Dalam konteks transisi energi dan upaya dekarbonisasi, UU No. 30 Tahun 2009 menjadi landasan penting namun memerlukan penyesuaian lebih lanjut untuk mengakomodasi perkembangan teknologi dan kebutuhan transisi ke energi bersih (IESR, 2021).

2.4.2 PP No. 74 Tahun 2022 tentang RUKN

Peraturan Pemerintah Nomor 74 Tahun 2022 tentang Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) merupakan landasan hukum terbaru yang mengatur perencanaan ketenagalistrikan di Indonesia. RUKN ini menjadi pedoman dalam penyusunan Rencana Umum Ketenagalistrikan Daerah (RUKD) dan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL). PP ini mengatur berbagai aspek penting, termasuk proyeksi kebutuhan tenaga listrik, pengembangan pembangkit listrik dengan fokus pada energi terbarukan, serta target bauran energi nasional. Selain itu, peraturan ini juga membahas strategi penyediaan tenaga listrik, pengembangan transmisi dan distribusi, serta upaya peningkatan elektrifikasi nasional. RUKN 2021-2040 yang diatur dalam PP ini mencerminkan komitmen pemerintah dalam mewujudkan transisi energi menuju sistem kelistrikan yang lebih bersih dan berkelanjutan.

2.4.3 Perda Prov. Jabar No. 21 Tahun 2014 tentang RUKD tentang Penyelenggaraan Ketenagalistrikan

Peraturan Daerah Provinsi Jawa Barat Nomor 21 Tahun 2014 tentang Penyelenggaraan Ketenagalistrikan merupakan turunan teknis RUKN yang saat ini digunakan di daerah. RUKD Provinsi digunakan bersama dengan RUKN, rencana lima tahunan ketenagalistrikan Daerah Provinsi, dan RUPTL sebagai landasan upaya penyediaan tenaga listrik bagi kepentingan umum. Upaya penyediaan tenaga listrik ini sebagaimana diatur pada RUKN dalam konteks daerah Provinsi Jawa Barat.

2.4.4 Perpres No. 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan

Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik merupakan langkah strategis pemerintah Indonesia dalam mendorong transisi energi. Perpres ini mengatur berbagai aspek krusial dalam pengembangan energi terbarukan, termasuk mekanisme harga pembelian listrik dari sumber energi terbarukan, skema kerja sama pemerintah-swasta, serta insentif fiskal dan non-fiskal untuk proyek energi terbarukan. Regulasi ini juga menetapkan target bauran energi terbarukan dalam sistem ketenagalistrikan nasional dan mengatur peran serta kewajiban berbagai pemangku kepentingan dalam mewujudkan percepatan pengembangan energi terbarukan. Perpres ini mencerminkan komitmen pemerintah dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mempercepat pencapaian target penurunan emisi gas rumah kaca sesuai dengan komitmen internasional Indonesia.

2.4.5 Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)

Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) merupakan dokumen perencanaan energi nasional Indonesia yang ditetapkan melalui Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017. RUEN berfungsi sebagai pedoman dalam pengelolaan energi nasional hingga tahun 2050, mencakup kebijakan pengelolaan energi, strategi penyediaan energi, serta target bauran energi nasional. Dokumen ini mengatur berbagai aspek penting termasuk proyeksi kebutuhan energi, pengembangan infrastruktur energi, dan strategi pemanfaatan sumber daya energi terbarukan. RUEN juga menetapkan target kontribusi energi terbarukan dalam bauran energi nasional sebesar 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050. Selain itu, RUEN mengintegrasikan upaya konservasi energi, pengembangan teknologi energi baru dan terbarukan, serta peningkatan akses energi bagi masyarakat. Dokumen ini menjadi acuan bagi pemerintah pusat, pemerintah daerah, dan pemangku kepentingan lainnya dalam merumuskan kebijakan dan implementasi program-program energi di Indonesia.

2.4.6 Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL)

RUPTL adalah rencana pengembangan sistem ketenagalistrikan yang disusun oleh PT PLN (Persero) sebagai pemegang izin usaha penyediaan tenaga listrik untuk kepentingan umum. RUPTL memuat strategi dan program PT PLN (Persero) dalam penyediaan tenaga listrik selama 10 tahun ke depan. RUPTL disusun berdasarkan Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (RUKN) yang ditetapkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Fungsi utama RUPTL adalah:

1. Memastikan pemenuhan kebutuhan energi listrik nasional
2. Menjaga keandalan dan kualitas sistem ketenagalistrikan
3. Meningkatkan efisiensi dan efektivitas sistem ketenagalistrikan
4. Mendukung kebijakan energi nasional, termasuk transisi energi
5. RUPTL memiliki kedudukan sebagai instrumen kebijakan dan hukum dalam pengelolaan energi dan transisi energi di Indonesia. Hal ini didasarkan pada beberapa aspek:
 - a. **Landasan hukum:** RUPTL disusun berdasarkan Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi dan Peraturan Pemerintah Nomor 7 Tahun 2010 tentang Penyelenggaraan Ketenagalistrikan.
 - b. **Proses penyusunan:** RUPTL disusun dengan melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, akademisi, dan masyarakat sipil.
 - c. **Sifat mengikat:** RUPTL menjadi acuan bagi PT PLN (Persero) dalam menjalankan kegiatan usahanya dan menjadi dasar bagi pemangku kepentingan lain dalam menyusun kebijakan dan program terkait ketenagalistrikan.

RUPTL berperan penting dalam mendorong transisi energi di Indonesia melalui beberapa mekanisme:

1. **Pengembangan pembangkit energi terbarukan:** RUPTL menargetkan peningkatan bauran energi terbarukan dalam sistem ketenagalistrikan nasional.

2. **Peningkatan efisiensi energi:** RUPTL mendorong program-program efisiensi energi untuk mengurangi konsumsi energi dan emisi GRK.
3. **Pengembangan infrastruktur energi:** RUPTL mencantumkan rencana pembangunan infrastruktur energi yang mendukung transisi energi, seperti jaringan transmisi dan distribusi yang andal.
4. **Penciptaan pasar energi bersih:** RUPTL mendorong pengembangan pasar energi bersih melalui mekanisme seperti insentif dan harga yang kompetitif bagi energi terbarukan.

2.4.7 *Nationally Determined Contributions (NDC) Indonesia*

NDC adalah rencana aksi iklim yang diajukan oleh setiap negara peserta Persetujuan paris. NDC memuat target dan strategi pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) yang akan dicapai oleh negara tersebut (UNFCCC, 2015). Tujuan utama penetapan NDC adalah untuk mencapai tujuan utama Persetujuan paris, yaitu membatasi pemanasan global jauh di bawah 2 derajat Celcius, idealnya pada 1,5°C, dibandingkan dengan tingkat pra-industri. Selain itu, NDC juga bertujuan untuk meningkatkan ketahanan global terhadap dampak perubahan iklim dan membangun aliran keuangan untuk mendukung aksi iklim di negara-negara berkembang (UNFCCC, 2015).

Pemerintah Indonesia (2022) dalam draf pembaharuan NDC yang telah disampaikan kepada UNFCCC, menyatakan bahwa Indonesia berkomitmen untuk berkontribusi dalam upaya global untuk memerangi perubahan iklim. Indonesia memiliki dua target pengurangan emisi dalam NDC, yaitu target *unconditional* dan *conditional* (Pemerintah Indonesia, 2022). Target *unconditional* adalah target yang akan dicapai oleh Indonesia dengan usaha sendiri, tanpa dukungan keuangan internasional. Sedangkan target *conditional* adalah target yang dapat dicapai dengan dukungan keuangan internasional.

1. **Target *unconditional*:** Indonesia menargetkan pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 29% - 31% pada tahun 2030 dibandingkan dengan BAU (Business-as-Usual).

2. **Target conditional:** Indonesia menargetkan pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) sebesar 43,2% pada tahun 2030 dengan dukungan keuangan internasional.

Sektor energi merupakan salah satu penyumbang emisi GRK terbesar di Indonesia. Oleh karena itu, upaya untuk mencapai target NDC tidak dapat dilepaskan dari strategi dan rencana aksi terkait sektor energi. Pada NDC pertama yang telah disusun Pemerintah Indonesia (2016) berbagai strategi dan rencana aksi untuk mencapai target pengurangan emisi di sektor energi dalam NDC, sesuai dengan persetujuan paris 2015. Strategi dan rencana aksi tersebut antara lain:

1. Meningkatkan bauran energi terbarukan:
 - a. Meningkatkan kapasitas pembangkit energi terbarukan hingga 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2030.
 - b. Mendorong pengembangan energi surya, angin, air, panas bumi, dan bioenergi.
2. Meningkatkan efisiensi energi:
 - a. Menerapkan program efisiensi energi di berbagai sektor, seperti industri, rumah tangga, dan transportasi.
 - b. Mendorong penggunaan teknologi hemat energi.
3. Mengurangi emisi dari sektor transportasi:
 - a. Mengembangkan transportasi publik yang berkelanjutan.
 - b. Mempromosikan penggunaan kendaraan listrik.
4. Mengurangi emisi dari sektor industri:
 - a. Menerapkan teknologi rendah emisi di sektor industri.
 - b. Meningkatkan pengelolaan hutan dan lahan.

NDC menjadi landasan bagi Indonesia dalam menyusun Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) dan Roadmap Transisi Energi. RUEN dan Roadmap Transisi Energi memuat strategi dan rencana jangka panjang untuk mencapai target emisi dalam NDC dan mewujudkan transisi energi menuju energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

Early retirement PLTU batu bara dilakukan untuk mencapai target emisi dalam NDC dan mendukung transisi energi menuju energi yang lebih bersih dan

berkelanjutan. Penutupan PLTU batu bara secara dini akan membantu mengurangi emisi GRK dari sektor energi dan membuka jalan bagi pengembangan energi terbarukan.

Indonesia telah memperbarui NDC pada tahun 2022 dengan target pengurangan emisi yang lebih ambisius. Sebelumnya pada NDC pertama (2016), Indonesia menargetkan reduksi emisi sebesar 29% secara *unconditional* dan 41% secara *conditional* menjadi 31,89 (*unconditional*) dan 43,2 (*conditional*) pada NDC terbaru. Hal ini menunjukkan komitmen Pemerintah Indonesia dalam mengimplementasikan kebijakan transisi ke energi bersih dan terbarukan.



Gambar 2.10 Peta Jalan Transisi Energi Menuju NZE 2020 (DEN, 2024)

Gambar 2.10 menjelaskan secara rinci peta jalan transisi energi Indonesia menuju *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2060. Dalam peta jalan ini, tergambar perkembangan target bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) primer secara bertahap dari 17-19% pada tahun 2025 hingga mencapai 70%-73% pada tahun 2050, serta tahapan implementasi kebijakan seperti *early retirement* PLTU tahap pertama yang direncanakan pada tahun 2035. Selain itu, terdapat pula upaya pemanfaatan teknologi *Carbon Capture Storage* (CCS) dan *Carbon Capture, Utilization and Storage* (CCUS) yang diterapkan dalam sektor pembangkit listrik. Peta jalan ini juga memuat estimasi peningkatan kebutuhan listrik per kapita, pemanfaatan

biofuel, jaringan gas, serta penggunaan kendaraan listrik dalam mendukung upaya pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) secara nasional.

Nationally Determined Contributions (NDC) merupakan komitmen iklim nasional yang disampaikan setiap negara peserta dalam kerangka Paris Agreement untuk mengurangi emisi gas rumah kaca. Indonesia, dalam dokumen NDC terbarunya, menetapkan target pengurangan emisi sebesar 29% dengan usaha sendiri dan hingga 41% dengan dukungan internasional pada tahun 2030.

Sektor energi, khususnya ketenagalistrikan, menjadi kontributor emisi terbesar di Indonesia, dengan proporsi mencapai sekitar 41% dari total emisi nasional (Global Carbon Budget, 2023). Oleh karena itu, strategi pengurangan emisi di sektor ini termasuk program *early retirement* PLTU memegang peranan sentral dalam pencapaian target NDC.

Dalam konteks tersebut, kebijakan transisi energi Indonesia, seperti yang tertuang dalam RUPTL 2021–2030 dan Perpres No. 112 Tahun 2022, diarahkan untuk menyelaraskan upaya dekarbonisasi sektor energi dengan target-target NDC, termasuk melalui pengurangan bertahap PLTU berbasis batu bara dan pengembangan energi terbarukan secara masif.

2.4.8 Kebijakan dan Regulasi Terkait Transisi Energi

Berbagai kebijakan dan regulasi telah diterbitkan untuk mendukung transisi energi di Indonesia, termasuk kebijakan harga energi terbarukan, insentif fiskal, dan target pengurangan emisi sektor energi. Kebijakan harga energi terbarukan, seperti tarif pembelian terjamin (FIT) dan lelang kompetitif, telah menarik investasi dalam energi terbarukan, seperti pembangkit listrik tenaga surya dan angin (Kemenkeu, 2024). Insentif fiskal, seperti pengurangan pajak dan hibah, juga telah membantu mendorong pengembangan energi terbarukan (ESDM, 2022).

Pemerintah Indonesia telah menetapkan target pengurangan emisi sektor energi sebesar 29% pada tahun 2030 dibandingkan dengan baseline 2000 (Kemenko Perekonomian, 2024; Bappenas, 2019; Kemenko Perekonomian, 2017). Untuk mencapai target ini, pemerintah akan fokus pada pengembangan energi

terbarukan, peningkatan efisiensi energi, dan penerapan teknologi rendah karbon (ESDM, 2022).

Salah satu contoh kebijakan penting adalah Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Pencapaian Target Emisi Nol Bersih Setahun 2060 (Perpres 112/2022). Perpres ini bertujuan untuk mempercepat pengembangan energi terbarukan dan mencapai target emisi nol bersih pada tahun 2060 (Perpres 112/2022).

Penerapan kebijakan dan regulasi ini masih menghadapi beberapa tantangan, seperti tingginya biaya awal investasi untuk energi terbarukan, infrastruktur yang belum memadai, dan kurangnya kesadaran masyarakat (PSHK, 2023). Namun, dengan komitmen pemerintah dan berbagai pihak, transisi energi di Indonesia diharapkan dapat berjalan dengan lancar dan mencapai tujuannya.

2.4.9 Peran Pemangku Kepentingan dalam Pembuatan Kebijakan Energi

Pembuatan kebijakan energi di Indonesia melibatkan berbagai pemangku kepentingan, termasuk:

- Pemerintah pusat dan daerah
- Perusahaan listrik negara (PLN)
- Perusahaan energi swasta
- Lembaga keuangan dan investor
- Organisasi masyarakat sipil dan LSM
- Akademisi dan lembaga penelitian

Keterlibatan berbagai pemangku kepentingan ini penting untuk memastikan kebijakan yang dihasilkan mempertimbangkan berbagai perspektif dan kepentingan.

2.4.10 Kebijakan Internasional dan Komitmen Indonesia dalam Transisi Energi

Transisi energi global merupakan agenda strategis dalam upaya mitigasi perubahan iklim, yang dipercepat melalui berbagai kebijakan internasional dan komitmen nasional. Upaya ini bertujuan untuk menekan emisi gas rumah kaca (GRK), mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, serta meningkatkan

bauran energi terbarukan. Berbagai kesepakatan global telah menjadi landasan dalam kebijakan transisi energi Indonesia, mulai dari Paris Agreement, komitmen dalam forum G20, hingga perjanjian multilateral lainnya yang mendukung percepatan transisi energi.

1. Paris Agreement dan Implikasinya dalam Kebijakan Energi

Paris Agreement yang disepakati pada tahun 2015 dalam kerangka *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC) merupakan titik awal bagi negara-negara di dunia dalam menyusun strategi penurunan emisi GRK. Perjanjian ini menargetkan pembatasan kenaikan suhu global di bawah 2°C, dengan upaya maksimal untuk mencapai 1,5°C di atas tingkat pra-industri. Setiap negara yang tergabung dalam Paris Agreement diwajibkan untuk menyusun target penurunan emisi dalam dokumen *Nationally Determined Contributions* (NDC), serta melakukan evaluasi dan pembaruan secara berkala.

Sebagai bagian dari *Paris Agreement*, Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi melalui berbagai kebijakan, termasuk pergeseran bauran energi dari bahan bakar fosil ke energi terbarukan. Komitmen ini semakin diperkuat dengan Peraturan Presiden No. 112 Tahun 2022, yang mengatur percepatan pengembangan energi terbarukan untuk penyediaan tenaga listrik, termasuk kebijakan pensiun dini (*early retirement*) Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis batu bara.

2. Komitmen G20 terhadap Transisi Energi

Forum G20 telah memainkan peran penting dalam mendorong kebijakan transisi energi secara global. Pada G20 Bali Summit 2022, yang dipimpin oleh Indonesia sebagai Presidensi G20, transisi energi menjadi salah satu agenda utama dalam mempercepat dekarbonisasi sektor energi. Dalam forum ini, negara-negara anggota G20 menyepakati beberapa poin utama, antara lain:

1. Penghapusan subsidi energi fosil secara bertahap, guna mengalihkan investasi ke energi hijau.
2. Peningkatan pembiayaan transisi energi, melalui berbagai instrumen keuangan hijau seperti obligasi hijau (*green bonds*) dan investasi berkelanjutan.

3. Komitmen mendukung pengembangan energi terbarukan, dengan peningkatan kapasitas energi surya, angin, dan geothermal.

Indonesia, sebagai tuan rumah G20 2022, memperkenalkan inisiatif *Just Energy Transition Partnership* (JETP), yang berfungsi sebagai skema pendanaan transisi energi. JETP menjadi platform utama dalam mendanai kebijakan *early retirement* PLTU, memungkinkan percepatan pengurangan emisi dengan dukungan finansial dari berbagai negara maju.

3. Perjanjian-Perjanjian yang Mendukung Transisi Energi

Selain komitmen dalam forum G20, Indonesia juga terlibat dalam beberapa perjanjian multilateral yang berperan dalam mempercepat transisi energi, antara lain:

1. Just Energy Transition Partnership (JETP): Inisiatif ini menyediakan pendanaan untuk negara berkembang guna mempercepat dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan, termasuk pendanaan untuk pensiun dini PLTU.
2. Energy Transition Mechanism (ETM): Skema yang diinisiasi oleh Asian Development Bank (ADB) untuk mendukung transisi energi melalui blended finance, yang mengombinasikan pendanaan dari sektor publik dan swasta guna mengurangi risiko finansial dalam proyek energi terbarukan.
3. Indonesia ETM Country Platform: Platform ini diluncurkan untuk menarik investasi dalam proyek pensiun dini PLTU dan pengembangan energi terbarukan di Indonesia.

4. Nationally Determined Contributions (NDC) dan Target Net Zero Emission

Sebagai bagian dari kewajiban dalam Paris Agreement, Indonesia telah memperbarui dokumen NDC (Enhanced NDC - ENDC) yang diumumkan pada tahun 2022. Dalam dokumen ini, Indonesia menetapkan target penurunan emisi sebesar:

1. 31,89% secara mandiri (unconditional target).
2. 43,20% dengan dukungan internasional (conditional target) pada tahun 2030.

Selain itu, Indonesia juga menetapkan target Net Zero Emission (NZE) pada tahun 2060, yang sejalan dengan berbagai rencana strategis dalam kebijakan energi, seperti:

1. Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) yang menargetkan 23% bauran energi terbarukan pada tahun 2025.
2. Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2021-2030, yang menekankan pada pengurangan ketergantungan terhadap PLTU batu bara dan peningkatan kapasitas energi terbarukan.

5. Komitmen Indonesia terhadap Early Retirement PLTU

Sebagai bentuk implementasi konkret dari komitmen transisi energi, Indonesia mulai menerapkan skema early retirement PLTU sebagai langkah strategis dalam menurunkan emisi dari sektor ketenagalistrikan. Berdasarkan kajian yang dilakukan oleh PLN-E dan UGM, terdapat beberapa aspek utama dalam kebijakan pensiun dini PLTU:

1. Proyek percontohan penghentian dini operasional PLTU Pelabuhan Ratu 3x350 MW, yang menjadi salah satu proyek transisi energi pertama di Indonesia.
2. Pendanaan melalui skema JETP dan ETM, guna mengurangi dampak finansial bagi negara dalam mengganti pembangkit berbasis batu bara dengan energi terbarukan.
3. Dampak sosial-ekonomi, termasuk tantangan dalam transisi tenaga kerja dari sektor batu bara ke sektor energi hijau.
4. Implikasi terhadap biaya energi, di mana transisi ke energi terbarukan memerlukan investasi awal yang besar, namun diharapkan dapat memberikan efisiensi dalam jangka panjang.

Dalam kajian yang dilakukan oleh PLN-E dan UGM, disebutkan bahwa pensiun dini PLTU akan menurunkan kebutuhan batu bara sebesar 53,7 juta ton dan meningkatkan kebutuhan gas sebesar 62,9 kargo per tahun. Selain itu, terdapat risiko peningkatan Biaya Pokok Penyediaan (BPP) listrik, yang berpotensi menaikkan tarif listrik bagi konsumen jika tidak diimbangi dengan kebijakan subsidi yang tepat.

Sebagai negara yang turut menandatangani *Paris Agreement* pada tahun 2015, Indonesia memiliki kewajiban untuk berkontribusi dalam mitigasi perubahan iklim global dengan mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK). Komitmen ini tercermin dalam dokumen Nationally Determined Contributions (NDC) yang disusun oleh pemerintah Indonesia sebagai bagian dari implementasi perjanjian tersebut. Dalam NDC terbaru yang diperbarui pada tahun 2022, Indonesia menargetkan penurunan emisi sebesar 31,89% dengan upaya domestik dan 43,20% dengan dukungan internasional pada tahun 2030. Salah satu strategi utama dalam pencapaian target tersebut adalah percepatan transisi energi dari bahan bakar fosil ke energi baru terbarukan (EBT), termasuk kebijakan early retirement untuk PLTU berbasis batubara.

Untuk mengimplementasikan komitmen NDC, pemerintah Indonesia telah menetapkan berbagai aturan dan norma yang mengatur kebijakan energi dan transisi energi, di antaranya:

1. Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2007 tentang Energi

Undang-undang ini menjadi dasar hukum utama dalam pengelolaan energi nasional, termasuk peralihan menuju energi bersih. Dalam undang-undang ini, disebutkan bahwa pemerintah memiliki kewajiban untuk meningkatkan pemanfaatan EBT guna mengurangi ketergantungan pada energi fosil.

2. Undang-Undang Nomor 30 Tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan

Regulasi ini mengatur sistem ketenagalistrikan nasional, termasuk aspek produksi, distribusi, dan konsumsi listrik. Dalam konteks transisi energi, undang-undang ini memberikan landasan hukum bagi pemerintah dalam mengatur pengembangan energi terbarukan dan penghapusan bertahap pembangkit berbasis batubara.

3. Peraturan Presiden Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN)

RUEN merupakan dokumen kebijakan yang mengarahkan strategi transisi energi nasional. Salah satu target utama dalam RUEN adalah peningkatan bauran EBT menjadi 23% pada tahun 2025, yang sejalan dengan kebijakan

pensiun dini PLTU sebagai bagian dari upaya mengurangi emisi karbon dalam sektor ketenagalistrikan.

4. Peraturan Presiden Nomor 112 Tahun 2022 tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan untuk Penyediaan Tenaga Listrik
Peraturan ini mengatur strategi percepatan investasi dalam energi terbarukan serta skema pendanaan untuk transisi energi. Salah satu kebijakan yang diatur dalam regulasi ini adalah penghentian pembangunan PLTU baru, kecuali yang telah masuk dalam RUPTL PLN sebelum tahun 2022.
5. *Just Energy Transition Partnership* (JETP) dan *Energy Transition Mechanism* (ETM)

Selain regulasi nasional, Indonesia juga menerapkan skema transisi energi yang melibatkan pendanaan internasional. JETP merupakan kemitraan transisi energi yang mendukung percepatan penghentian PLTU melalui skema pembiayaan berkelanjutan. Sementara itu, ETM yang diinisiasi oleh Asian Development Bank (ADB) bertujuan untuk menyediakan mekanisme finansial berbasis *blended finance* bagi negara-negara berkembang dalam melakukan *early retirement* PLTU.

Dari perspektif norma dan prinsip hukum, kebijakan transisi energi di Indonesia juga berlandaskan pada konsep *just transition*, yang menekankan pentingnya keadilan sosial dalam proses peralihan energi. Dalam konteks *early retirement* PLTU Pelabuhan Ratu, prinsip ini menggarisbawahi perlunya perlindungan terhadap pekerja terdampak serta penyediaan alternatif ekonomi yang berkelanjutan bagi masyarakat yang bergantung pada industri batubara.

Berdasarkan regulasi dan norma yang telah diuraikan, kebijakan *early retirement* PLTU Pelabuhan Ratu memiliki dasar hukum yang kuat sebagai bagian dari strategi transisi energi nasional. Implementasi kebijakan ini tidak hanya selaras dengan komitmen NDC dan Paris Agreement, tetapi juga didukung oleh berbagai instrumen hukum dan mekanisme pendanaan yang telah tersedia. Namun, masih terdapat tantangan dalam aspek harmonisasi regulasi, khu

penyelarasan antara kebijakan transisi energi dengan kebijakan subsidi energi dan ketahanan listrik nasional. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan berbasis *multi-level governance* (MLG) yang dapat memastikan koordinasi efektif

antara pemerintah pusat, daerah, dan pemangku kepentingan lainnya dalam mendukung percepatan transisi energi di Indonesia.

2.5 Studi Bibliometrik dalam Penelitian Kebijakan *Early retirement* PLTU

2.5.1 Metode dan Aplikasi Analisis Bibliometrik

Analisis bibliometrik adalah metode kuantitatif untuk menganalisis pola publikasi ilmiah dalam bidang tertentu. Metode ini menggunakan teknik statistik dan analisis jaringan untuk memetakan struktur dan dinamika pengetahuan ilmiah (Aria & Cuccurullo, 2017). Dalam konteks kebijakan energi, analisis bibliometrik dapat memberikan wawasan berharga tentang tren penelitian, kolaborasi internasional, dan evolusi konsep-konsep kunci.

Aplikasi analisis bibliometrik dalam penelitian kebijakan energi telah meningkat secara signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Misalnya, studi oleh Merigo et al. (2016) menggunakan analisis bibliometrik untuk memetakan perkembangan penelitian energi terbarukan selama empat dekade, mengidentifikasi tren utama dan penulis paling berpengaruh dalam bidang ini.

2.5.2 Tren Penelitian Global Dalam Kebijakan *Early retirement* PLTU

Analisis bibliometrik tentang kebijakan *early retirement* PLTU masih relatif terbatas, mencerminkan kebaruan topik ini. Namun, beberapa studi telah mulai memetakan lanskap penelitian ini. Misalnya, penelitian oleh Firdaus & Mori (2023) dan Muchiri et al. (2022) menggunakan analisis bibliometrik untuk mengidentifikasi kluster penelitian utama terkait dekarbonisasi sektor listrik, termasuk kebijakan *early retirement* pembangkit berbasis batu bara.

Tren yang muncul dari analisis bibliometrik ini meliputi peningkatan fokus pada aspek ekonomi dari *early retirement*, analisis dampak sosial-lingkungan, dan studi tentang mekanisme pembiayaan inovatif untuk mendukung transisi. Selain itu, ada pertumbuhan signifikan dalam penelitian yang mengintegrasikan perspektif tata kelola multi-level dalam analisis kebijakan *early retirement*.

2.5.3 Kesenjangan Penelitian Dan Arah Masa Depan

Analisis bibliometrik juga membantu mengidentifikasi kesenjangan dalam literatur saat ini. Misalnya, meskipun ada banyak penelitian tentang kebijakan *early retirement* di negara maju, masih ada kekurangan studi yang berfokus pada konteks negara berkembang seperti Indonesia. Selain itu, integrasi antara analisis teknis, ekonomi, dan tata kelola dalam studi *early retirement* PLTU masih terbatas.

Arah masa depan yang diidentifikasi melalui analisis bibliometrik meliputi kebutuhan untuk lebih banyak studi interdisipliner yang menggabungkan perspektif teknis, ekonomi, sosial, dan tata kelola. Ada juga panggilan untuk lebih banyak penelitian komparatif yang membandingkan pengalaman berbagai negara dalam menerapkan kebijakan *early retirement* PLTU.

Dalam konteks penelitian ini, analisis bibliometrik dapat membantu memosisikan studi kasus Indonesia dalam lanskap penelitian global, mengidentifikasi praktik terbaik yang relevan, dan menggarisbawahi kontribusi potensial dari penelitian ini terhadap literatur yang ada.

2.6 Systematic Review

Menurut Hariyati (2010), *systematic review* adalah suatu metode penelaahan literatur terhadap artikel yang dilakukan secara terencana dan terstruktur. Metode ini bertujuan untuk menjawab pertanyaan secara spesifik, relevan dan terfokus. Terdapat beberapa langkah dalam melakukan *systematic review*:

- i) Mendefinisikan tujuan dari revidi dan menetapkan tipe dari *evidence* yang akan membantu menjawab tujuan revidi.
- ii) Pencarian literatur dengan menetapkan terlebih dahulu kriteria literatur yang akan dicari dan strategi pencariannya, seperti tahun publikasi, *database* dan *search engine* yang akan digunakan, serta apakah akan dilakukan metode input manual dalam *systematic review*.
- iii) Penilaian studi, yaitu menerapkan kriteria inklusi literatur yang akan dikumpulkan, baik meliputi kategori kuantitatif, kualitatif, maupun keduanya.

- iv) Kombinasi hasil pengumpulan literatur untuk memperoleh kesimpulan yang bermakna. Tahapan ini disebut juga *evidence synthesis*.
- v) Menetapkan hasil. Temuan-temuan dari pengelompokan data review didiskusikan untuk menghasilkan kesimpulan berdasarkan *evidence* yang diperoleh berdasarkan konteks penelitian.

Pada penelitian ini, metode *systematic review* akan dikombinasikan dengan analisis bibliometrik untuk memperoleh informasi yang lebih lengkap dan komprehensif meliputi *state-of-the-art* penelitian, tren penelitian yang berkembang dari kurun 2010-2024 mengenai studi kebijakan *early retirement* PLTU. Penggabungan metode gabungan ini juga diharapkan dapat memberikan kajian *evidence-based* dan terkini untuk menghasilkan rekomendasi dan studi kasus komparatif terhadap prospek implementasi kebijakan *early retirement* di Indonesia.

2.7 Sintesis Literatur

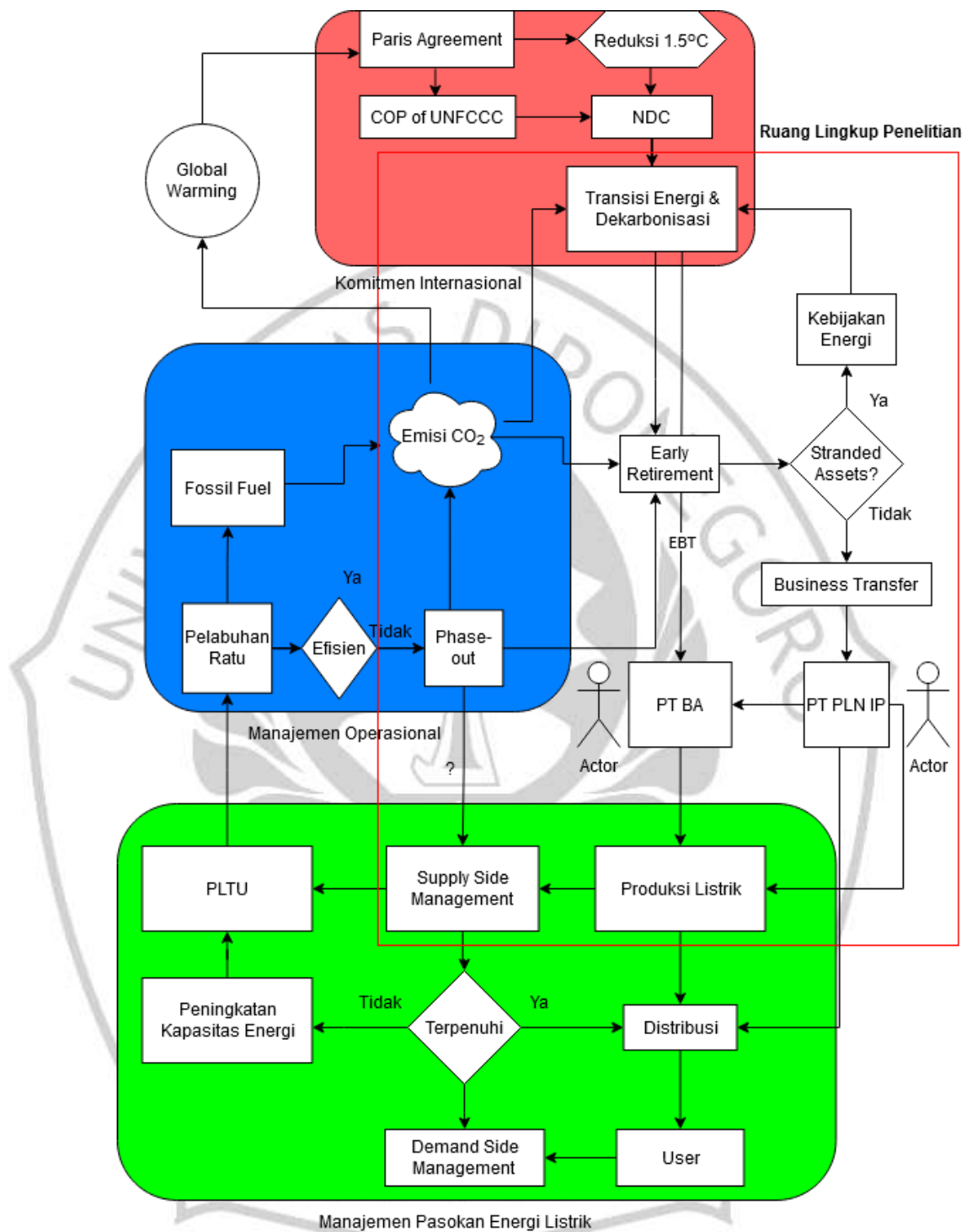
Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah disusun, analisis kebijakan *early retirement* PLTU Pelabuhan Ratu mengungkapkan kompleksitas yang melekat dalam upaya transisi energi di Indonesia. Dari perspektif hukum, desain kebijakan ini memerlukan penyesuaian signifikan terhadap kerangka regulasi yang ada, terutama terkait kontrak jangka panjang dan perjanjian pembelian listrik. Tantangan utama terletak pada penciptaan mekanisme hukum yang memungkinkan pemutusan kontrak secara adil, sambil tetap menjaga kepastian hukum bagi investor di sektor energi.

Dari sudut pandang ekonomi, *early retirement* PLTU berpotensi menimbulkan *trade-off* yang kompleks. Di satu sisi, skema pembiayaan untuk transisi energi dapat digunakan untuk pengurangan ketergantungan pada bahan bakar fosil dan penurunan biaya kesehatan akibat polusi. Namun, di sisi lain, terdapat risiko bisnis bagi penerima alih aset dari PLN jika ada kenaikan tarif listrik jangka pendek dan potensi gejolak ekonomi lokal. Analisis biaya-manfaat diperlukan untuk mengukur manfaat jangka panjang dan biaya jangka pendek yang akan dihadapi pada transisi energi. Selain itu, diperlukan juga strategi mitigasi yang cermat untuk mengelola dampak transisi.

Kontribusi kebijakan ini terhadap transisi energi di Indonesia membutuhkan penelitian yang komprehensif agar potensi pengurangan emisi karbon berdampak signifikan, sejalan dengan komitmen Indonesia dalam Persetujuan Paris. Lebih jauh, langkah ini dapat menjadi katalis untuk percepatan adopsi energi terbarukan, mendorong inovasi teknologi, dan menarik investasi baru di sektor energi bersih. Namun, tantangan utama terletak pada menjaga keseimbangan antara ambisi lingkungan dan keamanan pasokan energi nasional.

Perspektif multi pihak perlu diungkapkan, khususnya untuk pemerintah daerah yang mungkin menghadapi dilema antara tujuan pembangunan berkelanjutan dan stabilitas ekonomi jangka pendek. Sintesis berbagai pandangan ini menekankan pentingnya pendekatan inklusif dalam pengambilan keputusan dan implementasi kebijakan.

Pada Gambar 2.5 terlihat bahwa analisis kebijakan *early retirement* sangat kompleks yang melibatkan aspek manajemen operasional, manajemen energi serta proses siklus penyusunan kebijakan dan aspek ekonomi. Rencana implementasi kebijakan dalam transisi energi berkaitan dengan banyak aspek manajerial lain secara erat.



Gambar 2.11 Sintesis literatur terkait analisis kebijakan early retirement

Gambar 2.11 menggambarkan sintesis literatur terkait kebijakan early retirement PLTU Pelabuhan Ratu dalam konteks transisi energi dan dekarbonisasi.

Diagram ini terdiri dari tiga elemen utama yang direpresentasikan dalam tiga warna berbeda, yaitu merah, biru, dan hijau, yang masing-masing memiliki makna dalam sistem kebijakan energi dan manajemen ketenagalistrikan.

1. Ruang Lingkup Internasional dan Komitmen Global (Zona Merah)

Zona merah dalam diagram merepresentasikan ruang lingkup kebijakan internasional yang menjadi dasar bagi implementasi kebijakan transisi energi di Indonesia, termasuk penghentian bertahap PLTU berbasis batubara. Bagian ini menyoroti Paris Agreement, yang menjadi landasan bagi negara-negara dalam upaya reduksi emisi karbon dan pemanasan global hingga batas 1,5°C di atas tingkat pra-industri. Kesepakatan ini kemudian diimplementasikan dalam mekanisme Conference of the Parties (COP) di bawah United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), yang mewajibkan negara peserta untuk menyusun dan memperbarui Nationally Determined Contributions (NDC) sebagai bentuk kontribusi dalam mitigasi perubahan iklim. Dalam konteks Indonesia, komitmen ini diterjemahkan dalam kebijakan transisi energi dan dekarbonisasi, termasuk dengan strategi early retirement PLTU yang menjadi salah satu langkah konkret dalam mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil. Dengan demikian, zona merah dalam diagram menggambarkan kerangka kebijakan global yang mempengaruhi kebijakan nasional terkait penghentian PLTU batubara.

2. Sistem Manajemen Operasional PLTU (Zona Biru)

Zona biru dalam diagram merepresentasikan manajemen operasional PLTU, yang berfokus pada aspek teknis dan keputusan strategis dalam pengoperasian pembangkit berbasis batubara. Bagian ini dimulai dari penggunaan fossil fuel yang menghasilkan emisi karbon (CO₂), yang kemudian berkontribusi pada pemanasan global sebagaimana direpresentasikan dalam zona merah. Dalam konteks PLTU Pelabuhan Ratu, jika pembangkit masih dianggap efisien, maka tetap akan beroperasi. Namun, jika tidak efisien atau menghasilkan tingkat emisi yang tinggi, maka pembangkit akan menghadapi fase penghentian operasional (phase-out), yang

dalam skema transisi energi dapat diarahkan pada early retirement. Proses penghentian PLTU ini juga mempertimbangkan risiko stranded assets, di mana aset pembangkit yang dihentikan operasionalnya dapat mengalami penurunan nilai ekonomi yang signifikan. Jika risiko stranded assets dapat dikelola dengan baik, maka PLTU dapat dialihkan ke mekanisme bisnis lainnya, seperti melalui skema *business transfer* kepada PT PLN atau PT Bukit Asam (PT BA), yang kemudian dapat memanfaatkan aset untuk keperluan lain dalam sektor energi. Dengan demikian, zona biru mencerminkan proses pengambilan keputusan dalam manajemen PLTU, baik dalam hal efisiensi operasional, potensi fase penghentian (phase-out), maupun mekanisme mitigasi risiko akibat kebijakan transisi energi.

3. Manajemen Pasokan Energi Listrik dan Dampaknya bagi Pengguna (Zona Hijau)

Zona hijau dalam diagram merepresentasikan sistem manajemen pasokan energi listrik, yang menjadi bagian penting dalam transisi energi pasca-penghentian PLTU. Dalam sistem ini, produksi listrik dari PLTU akan dikelola dalam mekanisme supply side management, yang bertujuan untuk memastikan bahwa pasokan listrik tetap terpenuhi meskipun terjadi penghentian operasional PLTU berbasis batubara. Jika pasokan listrik masih mencukupi, maka produksi listrik akan berlanjut ke tahap distribusi energi hingga sampai ke pengguna (user). Namun, apabila terjadi ketidakseimbangan akibat penghentian PLTU, maka diperlukan peningkatan kapasitas energi terbarukan untuk mengisi kesenjangan dalam sistem ketenagalistrikan nasional.

Dalam konteks kebijakan early retirement PLTU Pelabuhan Ratu, sistem manajemen energi ini menjadi elemen krusial untuk memastikan bahwa penghentian pembangkit tidak mengganggu stabilitas ketahanan energi nasional. Oleh karena itu, strategi transisi energi harus mencakup upaya peningkatan infrastruktur energi terbarukan, optimalisasi jaringan listrik, serta diversifikasi sumber energi yang lebih ramah lingkungan. Dengan demikian, zona hijau dalam

diagram menggambarkan dampak dari kebijakan transisi energi terhadap sistem pasokan listrik dan kebutuhan pengguna.

