

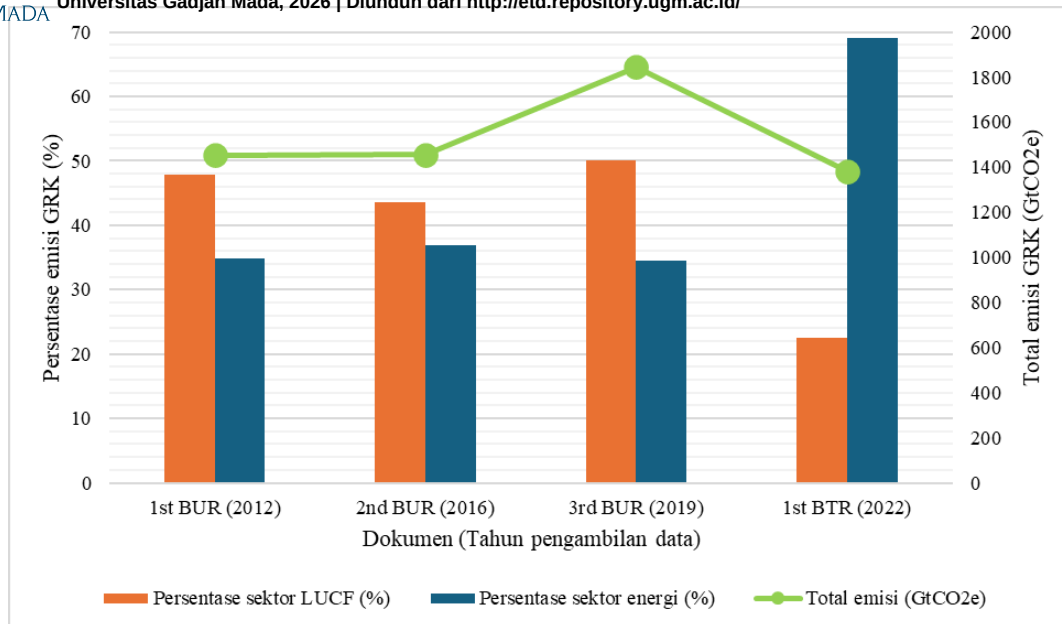
BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pemerintah Indonesia berupaya aktif untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) sebagaimana tertuang dalam dokumen *Nationally Determined Contribution (NDC)* [1], melalui Undang-Undang Nomor 16 Tahun 2016 tentang Pengesahan *Paris Agreement to The United Nations Framework Convention on Climate Change*. Pada dokumen NDC, Indonesia berkomitmen untuk mengurangi emisi GRK sebesar 29% dengan skenario *Business as Usual (BaU)* dan 41% dengan bantuan internasional pada tahun 2030. Komitmen ini diperbarui pada tahun 2022 dengan dokumen *Enhanced NDC* yang menyebutkan bahwa target penurunan emisi GRK yang sebelumnya 29% ditingkatkan menjadi 31,89% tanpa bantuan internasional, dan dengan bantuan internasional, target penurunan emisi GRK naik dari 41% menjadi 43,20% [2]. Pada Oktober 2025, *Second NDC* menjadi dokumen resmi terbaru dengan target penurunan emisi yang memperkuat dokumen *Enhanced NDC* [3]. Dokumen *Second NDC* juga menyebutkan data *Biennial Update Report (BUR)* dan *Biennial Transparency Report (BTR)* dengan persentase emisi pada beberapa sektor dituliskan pada Gambar 1.1. Pada tahun 2022, emisi di sektor energi sudah melampaui emisi dari sektor *land-use change and forestry (LUCF)*.

Penentuan target pada dokumen *Second NDC* telah mempertimbangkan Undang-undang No. 59 Tahun 2024 tentang Rencana Pembangunan Jangka Panjang Nasional (RPJPN) 2025-2045 yang juga mendukung penurunan emisi GRK. Salah satunya berfokus pada pembangunan nasional yang terintegrasi dengan ketahanan terhadap perubahan iklim dan pembangunan rendah karbon [4]. Hal ini diperkuat dengan Rencana Pembangunan Jangka Menengah Nasional (RPJMN) 2025-2029 melalui Peraturan Presiden No. 12 Tahun 2025 yang menyebutkan bahwa salah satu program prioritas pada periode menengah adalah mencapai swasembada pangan, energi dan air serta menjamin pelestarian lingkungan hidup [5].



Gambar 1.1 Emisi GRK dan kontribusi emisi pada sektor LUCF dan energi [3]

Emisi GRK terbesar saat ini dari sektor energi, Pemerintah Indonesia berupaya dengan memanfaatkan sumber energi baru dan terbarukan (EBT) pada pembangkit listrik. Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang tertuang dalam Peraturan Pemerintah Nomor 40 Tahun 2025 menjelaskan target *Net Zero Emissions* (NZE) dengan bauran EBT mencapai 70-72% pada tahun 2060 [6]. Sebelumnya, target EBT dalam bauran energi primer tertuang dalam KEN tahun 2014 dan Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) tahun 2017 sebesar 23% pada 2025 dan 31% pada 2050 [7][8]. KEN pasal 12 menyebutkan peran setiap jenis energi pada tahun 2030 hingga 2060 yang ditunjukkan oleh Tabel 1.1.

Empat sumber EBT yang memberikan kontribusi terbesar pada tahun 2060 adalah surya, nuklir, biomassa dan hidro yang dimanfaatkan untuk sektor ketenagalistrikan. Pada tahun 2060, bauran EBT minimal berada di angka 63,4% hingga 68,1%. Pemanfaatan energi fosil berupa minyak bumi digunakan utamanya untuk sektor industri; Batubara diarahkan untuk secara terbatas memproduksi batubara tercairkan, batubara tergaskan dan kelistrikan; Gas bumi diarahkan untuk sektor ketenagalistrikan dan industri.

Namun, pengembangan EBT pada sektor kelistrikan juga diharuskan memanfaatkan empat aspek, yaitu keekonomian, keterjangkauan harga, keamanan pasokan energi dan pelestarian lingkungan hidup, sebagaimana tercantum pada KEN pasal 17. Empat aspek ini juga diturunkan pada pemodelan pengembangan pembangkit listrik pada dokumen Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional 2025-2060 [9] dan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN 2025-2034 [10]. Hal ini berarti, pemilihan tidak hanya berdasarkan teknologi yang memberikan emisi GRK terkecil.

Tabel 1.1 Peran sumber energi fosil dan terbarukan dalam penurunan emisi GRK [6]

Jenis sumber energi	Persentase kontribusi (%)							
	2030		2040		2050		2060	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Hidro	1,8	2,3	3,6	3,8	4,6	4,9	4,9	5,1
Surya	1,3	1,6	13,1	16	23,3	25,3	29,8	32
Angin	0,3	0,5	0,9	1,1	1	1,2	1,2	1,3
Biomassa	7,2	9	6,5	6,7	7,4	7,6	12,2	13,4
Biogas	0,013	0,014	0,019	0,02	0,027	0,028	0,043	0,049
BBN	5,1	5,2	4,2	4,7	3,1	3,2	2,1	2,6
Nuklir	0,4	0,5	2,8	3,4	6,8	7	11,7	12,1
EBT lain	0,1	0,2	0,5	0,6	1,2	1,5	1,5	1,6
Minyak bumi	22,4	26,3	14,3	15,9	8,7	8,8	3,9	4,7
Batubara	40,7	41,6	28,9	31	19,1	20,9	7,8	11,9
Gas bumi	12,9	14,2	16,7	16,8	17,1	17,3	14,4	15,4

Pada RUPTL 2025-2034 disebutkan bahwa biaya penyediaan terendah (*least-cost*) dicapai dengan meminimalkan *net present value* (NPV) atas semua biaya penyediaan tenaga listrik yang terdiri atas biaya investasi, biaya bahan bakar, biaya operasi dan pemeliharaan (*operation and maintenance – O&M*) dan biaya *energy not served* (nilai penalti ekonomi yang dikenakan pada *objective function* untuk setiap kWh yang tidak dapat dinikmati konsumen akibat padam listrik). Mengacu pada definisi yang disebutkan dalam dokumen tersebut, dapat diperkirakan jenis pembangkit yang akan berkembang lebih cepat di masa mendatang adalah pembangkit dengan NPV paling kecil.

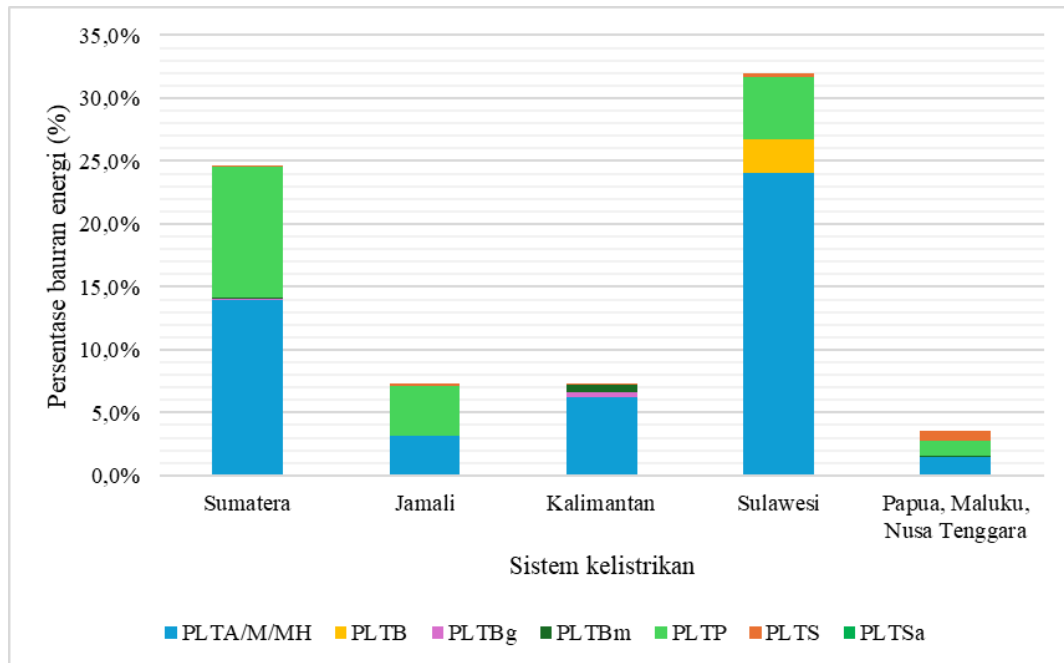
Nilai keekonomian ini dapat dilihat dari dokumen *Technology Data for the Indonesian Power Sector* [11] yang telah diterbitkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM). Pada penjelasan sebelumnya, diketahui bahwa EBT terbesar di masa mendatang akan didominasi oleh surya, nuklir, biomassa dan hidro. Tabel 1.2 menunjukkan perbandingan nilai keekonomian pada empat jenis pembangkit yang dipilih berdasarkan nilai kontribusi terbesarnya pada tahun 2060.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) secara konsisten memiliki nilai paling kecil dibandingkan dengan tiga jenis pembangkit lainnya, dengan nilai *nominal investment* sebesar 0,48 million USD/MW, *fixed O&M* sebesar 6.100 USD/MW/tahun, dan *variable O&M* sebesar 0,66 USD/MWh. Setelah PLTS, nilai investasi, operasional, dan pemeliharaan terendah selanjutnya adalah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA). Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dan Pembangkit Listrik Tenaga Biomassa (PLTBm) nilai keekonomiannya belum bisa bersaing dengan dua teknologi lainnya. Jika dilihat dari nilai keekonomian ini, maka dapat diprediksi bahwa arah pengembangan EBT ke depan kemungkinan akan didominasi oleh PLTS dan PLTA.

Tabel 1.2 Finansial data untuk setiap pembangkit di tahun 2050 [11]

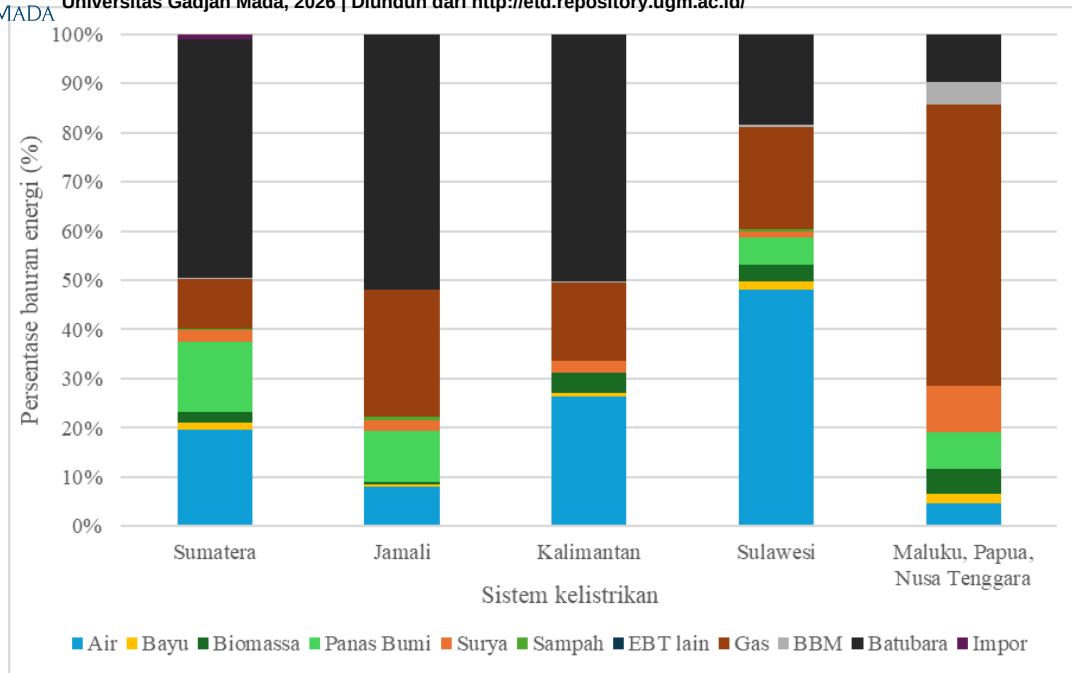
Jenis pembangkit	Nominal investment (Juta USD/MWe)	Fixed O&M (USD/MWe/tahun)	Variable O&M (USD/MWh)
PLTN	6,80	113.000	2,20
PLTS	0,48	6.100	0
PLTA	1,96	38.000	0,66
PLTBm	4,94	205.110	23,90

Jika melihat kondisi kelistrikan di setiap sistem saat ini, Gambar 1.2 menunjukkan komposisi pembangkit EBT dan fosil di masing-masing sistem [12]. Sulawesi memiliki bauran EBT terbesar dibandingkan sistem lainnya, yaitu sebesar 32%, dengan komposisi terbesar adalah hidro 24%, panas bumi 5%, angin 2,6%, dan surya 0,3%.



Gambar 1.2 Bauran EBT pada sistem kelistrikan di setiap pulau tahun 2024 [12]

Pada tahun 2034, RUPTL 2025-2034 telah menargetkan bauran energi di setiap sistem kelistrikan yang ditunjukkan pada Gambar 1.3. Sulawesi masih akan menjadi sistem dengan bauran EBT terbesar, mencapai 60%, yang terdiri dari hidro 48%, bayu 2%, biomassa 3%, panas bumi 6%, dan surya 1%. Batubara ditargetkan hanya menyumbang 19% dan gas sebesar 21% dari total penyediaan energi. Target bauran EBT sebesar 60% tersebut menjadikan Sulawesi sebagai studi kasus yang strategis untuk mengevaluasi ketahanan sistem kelistrikan berbasis energi terbarukan terhadap perubahan iklim dan perubahan tata guna lahan. Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan masukan bagi perencanaan sistem kelistrikan nasional dalam mendukung pencapaian target bauran EBT sebesar 63,4%–68,1% pada tahun 2060 sebagaimana ditetapkan dalam KEN.



Gambar 1.3 Bauran energi pada sistem kelistrikan di Indonesia pada tahun 2034 [10]

Mitigasi perubahan iklim dengan memanfaatkan EBT telah diupayakan. Namun, perubahan iklim telah terjadi saat ini. Hal ini dapat terlihat dari berbagai dampak yang telah dirasakan manusia. Salah satunya, perubahan rata-rata temperatur permukaan pada periode tahun 1850–1900 hingga 2010–2019 diperkirakan mencapai $0,8^{\circ}\text{C}$ hingga $1,3^{\circ}\text{C}$ [13]. Di Indonesia, Badan Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika (BMKG) mencatat pada tahun 2024 temperatur udara rata-rata tahunan di Indonesia naik sebesar $0,8^{\circ}\text{C}$ dibandingkan dengan temperatur udara rata-rata pada periode 1991-2020 [14]. BMKG juga menyebutkan bahwa sejak tahun 2009, Indonesia terus mengalami peningkatan temperatur udara rata-rata tahunan mulai dari $0,1^{\circ}\text{C}$ pada tahun 2011 hingga $0,8^{\circ}\text{C}$ pada tahun 2016 [15]. Sepanjang 2018 – 2020 peningkatan temperatur mulai dari $0,4^{\circ}\text{C}$, $0,6^{\circ}\text{C}$ dan $0,7^{\circ}\text{C}$. Bahkan di tahun 2024, menjadi tahun terpanas dibandingkan dengan pengamatan sepanjang periode 1981-2024 dengan nilai anomali sebesar $0,8^{\circ}\text{C}$ [14].

Kenaikan temperatur ini juga berpengaruh terhadap kualitas keluaran pembangkit EBT. Pada pembangkit surya, kenaikan temperatur lingkungan memberikan dampak negatif terhadap produksi listrik PLTS. Pada setiap peningkatan temperatur panel surya sebesar 1°C akan menurunkan produksi listrik sebesar 0,5% - 0,6% [16]. Nwokolo dkk [17] memprediksi pengaruh perubahan iklim pada enam jenis solar panel dari jenis monokristalin (m-Si), polikristalin (p-Si), amorphous (a-Si), hybrid silicon (h-Si), cadmium telluride (CdTe) dan copper indium gallium selenide (CIGS) di Afrika Selatan, India dan China hingga periode tahun 2100. Hasilnya menunjukkan bahwa India mengalami peningkatan radiasi solar dan input dari panel surya naik sebesar 2,95%. Di Afrika Selatan, output panel surya berkurang hingga 3% dan di China berkurang sebesar 3,8%.

Pada pembangkit hidro, perubahan siklus hidrologi memengaruhi output pembangkit dan stabilitas sistem [18]. Othman [19] merangkum dampak perubahan iklim terhadap pembangkit hidro secara global, regional, dan nasional untuk menilai kerentanan

(vulnerability) pembangkit akibat perubahan siklus hidrologi, sedimentasi, dan peristiwa iklim ekstrem. Pada skala global, dampak perubahan iklim sangat heterogen, beberapa wilayah mendapat manfaat dari peningkatan curah hujan, beberapa wilayah lain mengalami kekeringan. Siklus hidrologi berubah dan kenaikan temperatur menjadi salah satu penyebabnya. Samjhana dan Manan [20] memproyeksikan dampak perubahan iklim terhadap kapasitas pembangkit hidro di Asia Tenggara dan Asia Selatan berdasarkan data *capacity factor* pembangkit. Shuai [21] menganalisis ketahanan sistem kelistrikan di Amerika Serikat dengan skenario kekeringan akibat perubahan iklim. Tang [22] juga melakukan studi dengan mengintegrasikan dampak perubahan iklim pada sistem kelistrikan di China.

Kaitan perubahan iklim dengan sektor energi dan air menjadi perhatian dunia sejak awal tahun 2010. *World Economic Forum* dan *Bonn Nexus Conference* 2011 menyebutkan bahwa variabel air, energi dan pangan (*water, energy, food*) merupakan variabel yang saling terhubung dan tergantung satu sama lain, yang kemudian disebut sebagai *nexus* [23]. Pengelolaan *nexus* muncul sebagai tanggapan atas kekhawatiran langkanya sumber daya air, energi dan pangan di masa mendatang [23]. *Nexus* juga muncul sebagai respon atas perubahan iklim dan perubahan sosial yang meliputi pertumbuhan populasi, globalisasi, pertumbuhan ekonomi dan urbanisasi [24]. *Water-energy-food nexus (WEF nexus)* dapat diartikan sebagai konsep untuk menjelaskan sifat kompleks dan saling terkait antara sumber daya global, dimana manusia sangat bergantung, untuk mencapai tujuan manusia secara sosial, ekonomi, dan lingkungan.

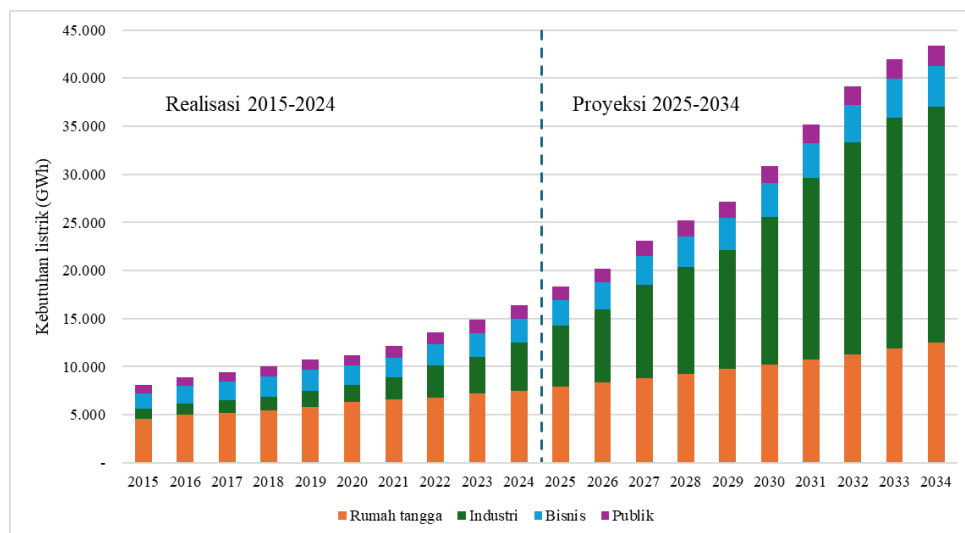
Dampak perubahan iklim terhadap *WEF nexus* telah diteliti di beberapa wilayah. Mondal [25] menganalisis dampak perubahan iklim terhadap *WEF nexus* dengan berfokus pada ketersediaan air, output energi dan hasil pertanian di Kangsabati, India. Alhassan melakukan studi di Newfoundland dan Labrador, Kanada untuk melihat dampak perubahan iklim terhadap *WEF nexus* dalam kaitannya dengan hasil pertanian [26]. ElZein menganalisis dampak perubahan iklim terhadap *WEF nexus* di area pesisir Matrouh, Mesir [27]. Chapagain [28] juga menganalisis dampak perubahan iklim dan tata guna lahan terhadap *WEF nexus* di daerah aliran sungai (DAS) Ping, Thailand. Selain tiga variabel yang menjadi awal pendekatan *nexus*, beberapa peneliti lainnya menambahkan variabel lain yang terkait, di antaranya ketersediaan lahan (*land*) [29][30], tata guna lahan (*land use*) [31], dan ekosistem [32].

Pada sektor energi, perencanaan pembangkit jangka panjang dengan mempertimbangkan keterkaitan energi dan air (*water-energy-WE*) *nexus* telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Ji [33] memodelkan perencanaan sistem kelistrikan dengan mempertimbangkan factor biaya dan resiko dengan metode *multi-stage stochastic* untuk dengan studi kasus Provinsi Shandong, China. Chen [34] melakukan penelitian optimasi *WE nexus* untuk pembangkit listrik, menganalisis dampak kebijakan, serta mengeksplorasi biaya minimum untuk pengurangan emisi karbon. Ketidakpastian model ditunjukkan oleh parameter stokastik dan *fuzzy* untuk mengatasi masalah air-energi di wilayah Beijing-Tianjin-Hebei. Zhen [35] juga melakukan analisis kelistrikan secara regional di Tangshan City, China dengan metode *hybrid interval two-stage fuzzy credibility constrained programming (ITFCP)*. Lim [36] melakukan analisis perencanaan

pembangkit jangka panjang dengan mempertimbangkan *WE nexus* di Uni Emirat Arab yang menencanakan 50% energi bersih pada tahun 2050.

Di Indonesia, analisis *WEF nexus* telah dilakukan oleh Purwanto [37] [38] untuk perencanaan wilayah Kabupaten Karawang tahun 2010-2030. Lupascu [39] juga mengadakan analisis hubungan peran lahan gambut dalam ketahanan pangan dan hubungannya dengan perubahan iklim di Indonesia. Hasil penelitian ini menyatakan bahwa konservasi dan restorasi lahan gambut perlu menjadi prioritas utama. Bahri [40] melakukan penelitian terkait *WEFL (water, energy, food, land) nexus* dengan studi kasus Waduk Jatiluhur untuk menganalisis ketersediaan air pada waduk yang digunakan tidak hanya untuk pembangkit, namun juga untuk pengairan lahan dan sektor industri di sekitarnya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa perlu ada kebijakan yang diterapkan untuk mendistribusikan air dan energi secara tepat. Pada penelitian *nexus* di Indonesia, terdapat persamaan analisis terkait tata guna lahan. Sebagai negara kepulauan, 2/3 bagian Indonesia terdiri dari laut [41]. Maka, keberadaan lahan menjadi krusial dalam pendekatan *nexus* bagi negara kepulauan seperti Indonesia.

Secara umum, perubahan iklim telah memberikan dampak yang nyata terhadap berbagai aspek kehidupan, di antaranya energi, air, dan pangan. Di Indonesia, analisis *WEF nexus* belum banyak dilakukan, terutama terkait perencanaan pembangkit jangka panjang. Mempertimbangkan target net zero emissions (NZE) 2060, target bauran EBT, dan penurunan GRK, Indonesia perlu melakukan perencanaan pembangkit listrik jangka panjang dengan mempertimbangkan *nexus*. Untuk itu, penelitian ini bermaksud menganalisis dampak perubahan iklim terhadap perencanaan pembangkit jangka panjang dengan mempertimbangkan energi, air dan tata guna lahan. Tutupan lahan ditambahkan sebagai variabel dalam analisis dengan mempertimbangkan kekhasan Indonesia sebagai negara kepulauan.



Gambar 1.4 Realisasi dan Proyeksi Penjualan Tenaga Listrik di Sulawesi (GWh) [9]

Sulawesi dipilih sebagai studi kasus dengan pertimbangan bahwa sistem bauran EBT saat ini dan di masa mendatang menjadi yang terbesar dibandingkan dengan sistem kelistrikan lainnya. Sistem Sulawesi dapat dijadikan sebagai “miniatur” Indonesia di masa mendatang. Selain itu, realisasi dan proyeksi penjualan listrik di Pulau Sulawesi

terus meningkat dari tahun ke tahun, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.4. Kebutuhan listrik diprediksi mencapai 43.412 GWh hingga tahun 2034. Termasuk di dalamnya penambahan industri baru melalui pengembangan industri smelter di klaster Huadi di Sulawesi Selatan, Pomala-Ceria (Poci), dan Konawe-Morowali (Kemo) di Sulawesi Tenggara [9]. Jenis pembangkit yang dianalisis dalam penelitian ini akan berfokus pada PLTS dan PLTA sesuai dengan penjelasan sebelumnya bahwa kedua pembangkit tersebut merupakan teknologi EBT dengan biaya terendah di masa mendatang.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, dapat diketahui bahwa penelitian terkait energi dan perencanaan pembangkit listrik lebih banyak berfokus pada mitigasi perubahan iklim, seperti penurunan emisi GRK melalui pemanfaatan EBT. Namun, penelitian terkait adaptasi terhadap perubahan iklim masih belum banyak dilakukan. Peningkatan penetrasi EBT dalam perencanaan pembangkit jangka panjang juga dipengaruhi oleh dinamika faktor lingkungan dan sumber daya alam yang rentan terhadap perubahan iklim. Misalnya, ketersediaan air pada PLTA dipengaruhi oleh perubahan pola curah hujan, debit air sungai, dan kondisi tutupan lahan, sedangkan kinerja PLTS dipengaruhi oleh perubahan temperatur dan radiasi matahari. Permasalahan utamanya adalah belum adanya pendekatan pemodelan yang mampu mengintegrasikan aspek perubahan iklim dan tata guna lahan dalam analisis perencanaan pembangkit listrik jangka panjang, khususnya di wilayah kepulauan tropis seperti Indonesia. Untuk itu, permasalahan yang diidentifikasi dalam disertasi ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Model sebab-akibat dampak perubahan iklim dan tata guna lahan di daerah tropis yang terkait dengan potensi pembangkit EBT masih terbatas. Pendekatan yang dilakukan cenderung bersifat umum dan tidak spesifik untuk setiap jenis teknologi pembangkit EBT.
2. Model untuk menentukan potensi PLTA dan PLTS sebagian besar masih menggunakan data historis debit air sungai dan radiasi matahari secara langsung. Integrasi yang mempertimbangkan perubahan iklim dan tata guna lahan dengan variabel temperatur lingkungan, curah hujan, jumlah hari hujan, dan radiasi matahari belum banyak dilakukan.
3. Penelitian mengenai perencanaan pembangkit jangka panjang umumnya terbatas pada upaya menurunkan emisi GRK. Perencanaan pembangkit jangka panjang yang mempertimbangkan dampak perubahan iklim dan tata guna lahan di daerah kepulauan tropis masih belum banyak dieksplorasi.

1.3 Batasan Penelitian

Penelitian ini dibatasi pada beberapa hal:

- 1) Studi kasus yang dianalisis adalah sistem kelistrikan Sulawesi, dengan membatasi Sistem Sulawesi Bagian Utara (Sulbagut) dan Sulawesi Bagian Selatan (Sulbagsel), tanpa Sistem Bau-Bau.
- 2) Peramalan permintaan listrik/proyeksi beban dan data eksisting pembangkit listrik menggunakan data yang telah tersedia berdasarkan RUPTL PLN 2025-2034 [9].

- 3) Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap peramalan beban yang dicantumkan dalam RUPTL 2025-2034 (pertumbuhan ekonomi, pertumbuhan penduduk, tarif listrik dan program elektrifikasi pemerintah) tidak dibahas dalam penelitian ini.
- 4) Analisis dilakukan pada sisi suplai/pasokan listrik dengan teknologi sesuai dengan data RUPTL 2025-2034.
- 5) Teknologi energi terbarukan yang dianalisis untuk melihat dampak terhadap perubahan iklim dan tata guna lahan dalam penelitian ini adalah PLTA dan PLTS karena keduanya merupakan jenis pembangkit dengan nilai keekonomian paling baik dibandingkan jenis pembangkit lain, sesuai data ESDM.
- 6) Analisis perubahan iklim pada PLTA ditunjukkan oleh variabel temperatur, curah hujan dan jumlah hari hujan, sementara pada PLTS ditunjukkan oleh temperatur dan radiasi matahari.
- 7) PLTA yang dimodelkan adalah tipe *run-of-river* (ROR) tanpa mempertimbangkan adanya waduk, danau, embung atau bangunan pengatur lain yang dapat mengubah pola aliran sungai melalui proses penyimpanan (storage) maupun pelepasan air secara terkontrol (*regulated flow*).

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah:

- 1) Memodelkan hubungan sebab-akibat (*causal loop diagram*) antara dampak perubahan iklim dan tata guna lahan terhadap potensi pembangkit hidro dan surya di Sulawesi. Data perubahan iklim dipresentasikan melalui curah hujan, jumlah hari hujan, dan temperatur lingkungan rata-rata bulanan selama 40 tahun terakhir di setiap provinsi di Sulawesi. Sumber data didapatkan dari *CHIRPS (Climate Hazard Group InfraRed Precipitation With Station Data)*, *ERA5-Land Monthly Aggregated*, *ECMWF Climate Reanalysis*, *Global Land Cover Map*, *ESA (The European Space Agency) WorldCover Map* dan *Land use/Land Cover* yang diproduksi oleh ESRI, Microsoft dan Impact Observatory.
- 2) Menentukan potensi hidro dan surya di Sulawesi dengan mempertimbangkan dua kondisi, yaitu dengan dan tanpa mempertimbangkan dampak perubahan iklim dan tata guna lahan. Definisi tanpa mempertimbangkan dampak perubahan iklim adalah data proyeksi variabel pada tahun 2026-2060 didasarkan pada data historis tahun 1981-2025. Perhitungan ini mencakup estimasi debit, potensi kapasitas hidro dan potensi energi surya berdasarkan kondisi iklim historis serta proyeksinya, sehingga dapat menunjukkan pergeseran potensi energi secara kuantitatif di setiap provinsi. Perhitungan debit andalan dilakukan dengan menyusun FDC (*Flow Duration Curve*) untuk setiap provinsi di Sulawesi guna memproyeksikan potensi pada tahun 2025-2060.
- 3) Menyusun model optimasi perencanaan jangka panjang pengembangan pembangkit listrik Sistem Sulawesi bagian utara dan selatan berdasarkan hasil pemodelan dampak iklim dan tata guna lahan terhadap potensi pembangkit hidro dan surya. Optimasi ini mempertimbangkan nilai keekonomian, yang meliputi biaya investasi, operasi dan pemeliharaan, sehingga diperoleh konfigurasi bauran energi yang optimal.

1.5 Keaslian Penelitian

Pada tahun 2060, Indonesia akan membangun PLTS setidaknya sebesar 29,8% dari total bauran energi nasional [6]. Namun, BMKG mencatat kenaikan temperatur lingkungan dari tahun ke tahun. Jerez dkk. [42] telah memprediksi dampak perubahan iklim terhadap implementasi PLTS di Eropa menggunakan metode EURO-CORDEX. Hasilnya membuktikan bahwa output PLTS akan mengalami penurunan 14% hingga penambahan 2% pada tahun 2100, sehingga dalam perencanaan pengembangan PLTS di masa depan perlu dipertimbangkan dampak perubahan iklim di Eropa. Jong [43] juga melakukan penelitian dengan memproyeksikan perubahan iklim secara spasial dengan skenario perubahan iklim *Representative Concentration Pathway* (RCP) 8,5 dan RCP4,5 di Brazil dan menunjukkan hasil bahwa potensi PLTS akan meningkat di akhir tahun 2080. Keduanya masih mengukur dampak perubahan iklim pada PLTS dengan hanya mempertimbangkan peningkatan temperatur lingkungan.

PLTA sebagai pembangkit terbesar kedua yang memungkinkan untuk dikembangkan dari sisi keekonomian, juga mengalami dampak akibat perubahan iklim. Verma [44] melakukan penelitian di India untuk bendungan Himachal Pradesh yang mengalami penurunan jumlah air pada dam akibat perubahan iklim. Shrestha [45] melakukan penelitian di PLTA Kulekhani di Nepal dan menemukan bahwa curah hujan semakin tidak menentu dan tidak menunjukkan tren spesifik, namun meningkat pada musim kering dan menurun pada musim hujan. Selain itu, pembangkit hidro diprediksi akan menurun sebesar 0,5 – 13% dibandingkan dengan kondisi dasar. Kedua penelitian tersebut mengambil lokasi spesifik pada PLTA dengan satu bendungan di negara masing-masing. Di daerah tropis, Ibrahim [46] menganalisis lima PLTA dengan bendungan di Malaysia, yaitu Bakum, Murum, Pergau, Kenyir dan Ulu Jelai. Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan temperatur mengurangi produksi energi PLTA, sementara curah hujan meningkatkan produksinya. Ketiga penelitian tersebut telah mempertimbangkan perubahan iklim, namun tidak mempertimbangkan kaitannya dengan perencanaan jangka panjang. Perubahan tata guna lahan di DAS juga belum menjadi pertimbangan.

Alizadeh [47] menyatakan bahwa perencanaan pembangkit jangka panjang merupakan masalah tidak linier (*mixed-integer nonlinear programming – MINLP*) berskala besar, yang nilai optimalnya dapat dicapai melalui enumerasi lengkap. Dengan demikian, penentuan solusi optimal akan memerlukan kombinasi pilihan yang sangat besar selama rentang waktu perencanaan. Untuk itu, banyak peneliti menyederhanakan model analitik dan menyelesaikannya dengan model *mixed-integer linear programming (MILP)*. MILP adalah metode optimasi matematis untuk menyelesaikan permasalahan pengambilan keputusan yang melibatkan variabel biner/integer dan fungsi obyektif yang bersifat linier. Penggunaan model MILP pada sektor energi telah banyak digunakan, di antaranya perencanaan pembangkit jangka panjang [48], optimasi *battery energy storage systems* (BESS) pada sistem kelistrikan [49], optimasi microgrid dengan mempertimbangkan emisi dan ketersediaan biofuel pada sektor ketenagalistrikan [50]

Penelitian WEF nexus juga terus berkembang dalam satu dekade terakhir. Zhang [51] menyusun *Water, Energy, Food Security Nexus Optimization model* (WEFO) untuk menganalisis tata kelola air, energi dan pangan, tanpa menganalisis perencanaan

pembangkit. Zhou [52] menggunakan aplikasi *Long-range Energy Alternative Planning* (LEAP) yang telah tersedia untuk menganalisis perubahan iklim dan ketersediaan air pada pembangkit, tanpa memasukkan variabel perubahan tata guna lahan. Suo [53] melakukan pemodelan iklim dan ketersediaan air yang terkait dengan pembangkit listrik khusus untuk kondisi China. Almulla [54] menggunakan pemodelan OSeMOSYS (*The Open Source Energy Modeling System*) untuk menganalisis pembangkit listrik dengan ketersediaan air, tanpa variabel ketersediaan lahan.

Salah satu metode untuk menganalisis permasalahan kompleks secara komprehensif dilakukan dengan menggunakan pendekatan *system dynamics* [55]. Pendekatan *system dynamics* menitikberatkan pada adanya umpan balik untuk menggambarkan dan menjelaskan sebuah dinamika (perubahan dari waktu ke waktu) dari suatu sistem yang kompleks. *System dynamics* menawarkan pemodelan kompleks berdasarkan pengamatan di dunia nyata. Beberapa karakteristik pada metode *system dynamics* adalah (1) menggambarkan hubungan sebab-akibat (*causalities*), (2) memiliki fungsi *feedback loop* pada sistem kompleks yang berubah seiring waktu untuk melihat perilaku (*behavior*) sistem [55], [56], [57], [58], [59], [60], [61]. Perubahan iklim merupakan salah satu fenomena kompleks yang berubah seiring waktu. Beberapa peneliti juga menggunakan pendekatan *system dynamics* untuk menganalisis dampak perubahan iklim dan *WEF nexus*.

Akhwanzada [57] dan Lefaan [62], [63], [64] menggunakan *system dynamics* untuk memprediksi kebutuhan beban (*demand side*), sementara Ullah [60] melakukan prediksi pada sistem pembangkit (*supply side*). Namun, ketiganya tidak menganalisis keterkaitan pembangkit dengan perubahan iklim, ketersediaan air, maupun perubahan tata guna lahan. Pereira [65] menggabungkan analisis *system dynamics* dengan algoritma genetik untuk menganalisis penyediaan pembangkit listrik. Wang [66] melakukan simulasi *WEF nexus* yang dihubungkan dengan sistem masyarakat, ekonomi dan lingkungan untuk menilai kebijakan Provinsi Hunan, China tentang swasembada pangan pada tahun 2021-2035. Ali [67] mengembangkan model energi-air-pangan-lahan dan iklim untuk menganalisis kelangkaan air di Iran.

Berdasarkan tinjauan pustaka yang telah dilakukan, dan mempertimbangkan fokus: (1) dampak perubahan iklim pada PLTS dan PLTA serta (2) perencanaan pembangkit jangka panjang di daerah tropis, penelitian ini memilih *system dynamics* yang dikombinasikan dengan optimasi *linear programming* sebagai metode dalam penyelesaian permasalahan. Tabel 1.3 menunjukkan perbedaan penelitian ini dengan penelitian sebelumnya. Kekhasan penelitian ini adalah lokasinya yang spesifik di daerah tropis. Daerah Asia Tenggara menjadi area yang menarik karena diprediksi mengalami dampak signifikan akibat perubahan iklim [68]. Selain itu, variabel perubahan tata guna lahan dalam analisis perencanaan pengembangan pembangkit juga belum dilakukan oleh peneliti lain.

Tabel 1.3 *State of the art* penelitian yang dilakukan

Penulis (Tahun)	Variabel analisis <i>nexus</i>					Kaitan dengan pembangkit listrik		Area kajian	
	Iklim	Energi	Air	Tata guna lahan	Metode	GEP	Metode optimasi	Daerah tropis	Studi kasus
Li (2016) [69]	Ya	Tidak	Tidak	Tidak		Ya	Stokastik, <i>linier programming</i>	Tidak	Amerika Serikat
Inman (2020) [70]	Tidak	Tidak	Tidak	Tidak		Tidak	<i>System dynamics</i>	Tidak	
Moreira (2021)[71]	Ya	Tidak	Tidak	Tidak		Ya	<i>Multi-level optimization</i>	Tidak	Chile
Kim (2022)[72]	Ya	Tidak	Tidak	Tidak		Ya	Stokastik, <i>linier programming</i>	Tidak	Korea Selatan
Wang (2023) [66]	Ya	Ya	Ya	Tidak	<i>System dynamics</i>	Tidak		Tidak	Hunan, China
Barati (2023) [67]	Ya	Ya	Ya	Ya	<i>System dynamics</i>	Tidak		Tidak	Iran
Baradei (2025) [73]	Ya	Tidak	Tidak	Tidak		Ya	MILP	Tidak	
Choubineh (2025) [74]	Ya	Tidak	Tidak	Tidak		Ya	MILP	Tidak	Iran
Chapagain (2025) [28]	Ya	Ya	Ya	Ya	<i>Integrated impact assessment</i>	Tidak		Ya	Daerah Aliran Sungai Ping, Thailand
Alhassan (2026) [26]	Ya	Ya	Ya	Tidak	<i>Qualitative assessment</i>	Tidak		Tidak	Newfoundland dan Labrador, Canada
Samjhana (2025) [20]	Ya	Ya	Ya	Tidak	<i>Multi-model framework</i>	Tidak		Tidak	Asia Selatan dan Aisa Tenggara

Penulis (Tahun)	Variabel analisis <i>nexus</i>					Kaitan dengan pembangkit listrik		Area kajian	
	Iklim	Energi	Air	Tata guna lahan	Metode	GEP	Metode optimasi	Daerah tropis	Studi kasus
Mondal (2025) [25]	Ya	Ya	Ya	Tidak	<i>Indicator-based approach</i>	Tidak		Tidak	Daerah Aliran Sungai Kangsabati, India
Usulan penelitian ini	Ya	Ya	Ya	Ya	<i>System dynamics</i>	Ya	MILP	Ya	Sulawesi, Indonesia

Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini secara spesifik menjawab tujuan penelitian yang diuraikan pada subbab 1.4 sebagai berikut.

- 1) Dihasilkannya model sebab-akibat dari dampak perubahan iklim dan tata guna lahan terhadap pembangkit hidro dan surya dalam bentuk *causal loop diagram* yang mampu menjelaskan hubungan sebab-akibat secara komprehensif. Model ini dapat diinterpretasikan dalam struktur dinamis untuk digunakan sebagai dasar perencanaan energi, mitigasi risiko penurunan atau kenaikan potensi energi akibat perubahan iklim, serta pengelolaan tata guna lahan. Selain itu, model ini juga menyediakan kerangka analitis yang berguna untuk penelitian lanjutan maupun pengambilan kebijakan adaptasi dan mitigasi di sektor energi.
- 2) Diperoleh estimasi potensi hidro dan surya yang dalam kondisi normal maupun telah terpengaruh oleh perubahan iklim dan tata guna lahan. Informasi ini penting untuk pengembangan perencanaan listrik jangka panjang, karena membantu menentukan seberapa besar kapasitas pembangkit hidro dan surya yang dapat dibangun pada sistem kelistrikan Sulawesi bagian utara dan selatan serta kontribusi kapasitas di masing-masing provinsi. Hasil ini dapat meningkatkan ketepatan bauran energi dan memperkuat kontribusi dalam upaya adaptasi terhadap perubahan iklim.
- 3) Diperoleh konfigurasi pengembangan pembangkit jangka panjang yang optimal di Sulawesi bagian utara dan selatan berdasarkan hasil pemodelan dan optimasi sistem. Dengan mempertimbangkan dampak perubahan iklim dan tata guna lahan, penelitian ini menghasilkan strategi pengembangan sistem tenaga listrik yang lebih adaptif, fleksibel dan kompetitif dari sisi pembiayaan. Optimalisasi berpotensi menurunkan risiko investasi, mengurangi biaya operasional jangka panjang, meningkatkan penetrasi EBT, serta mendukung pencapaian target transisi energi dan NZE 2060 di Indonesia.

1.7 Sistematika Penulisan

Disertasi ini ditulis secara sistematis untuk memudahkan pembaca memahami alur penelitian. Terdapat lima bab dalam disertasi ini yang secara umum terdiri dari pendahuluan, tinjauan pustaka dan landasan teori, metode penelitian, hasil penelitian dan pembahasan serta kesimpulan dan saran. Daftar pustaka dan lampiran juga disertakan untuk melengkapi naskah disertasi.

Bab satu yang merupakan pendahuluan, terdiri dari latar belakang, rumusan masalah, batasan, tujuan, keaslian, dan manfaat penelitian, ditutup dengan sistematika penulisan. Pada bab dua, tinjauan pustaka menjelaskan hubungan perubahan iklim-energi-air-tata guna lahan, dampak perubahan iklim dan tata guna lahan terhadap PLTA dan PLTS, serta perencanaan pengembangan pembangkit listrik sistem dengan pendekatan nexus dan pendekatan *system dynamics* untuk analisis *nexus*. Pada bab dua juga dijelaskan landasan teori tentang perencanaan pengembangan pembangkit, PLTA, PLTS dan *system dynamics*. Bab tiga adalah metode penelitian yang menjelaskan langkah-langkah penelitian ini dilakukan, mulai dari proyeksi data iklim, pemodelan

system dynamics, penyusunan *flow duration curve* (FDC) hingga pemodelan perencanaan pembangkit jangka panjang dengan OSeMOSYS.

Bab empat merupakan inti dari penelitian yang memuat hasil dan pembahasan. Isi dari bab empat dimulai dari proyeksi data iklim, dilanjutkan dengan hasil pemodelan *system dynamics* pada PLTA dan PLTS, penyusunan FDC, perhitungan potensi dan hasil simulasi perencanaan pembangkit jangka panjang. Untuk menjawab tujuan penelitian, dilakukan analisis sensitivitas untuk melihat variabel pada PLTA dan PLTS yang dipengaruhi oleh perubahan iklim dan tata guna lahan. Terakhir, kesimpulan dan saran dituliskan pada Bab Lima sebagai penutup penelitian.