

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

A. *Net Zero Emission (NZE)*

Kondisi NZE merupakan keadaan di mana tercapai keseimbangan antara jumlah emisi gas rumah kaca (GRK) yang dihasilkan oleh aktivitas manusia dan jumlah emisi yang diserap kembali oleh alam (hutan, laut) atau teknologi atau dihilangkan dari atmosfer sehingga tidak ada penambahan emisi yang memperparah pemanasan global, dengan tujuan menjaga suhu bumi tidak naik lebih dari 1,5°C. Pencapaian NZE melibatkan upaya menyeimbangkan emisi yang masih ada dengan proses penyerapan atau penghilangan emisi, yang dikenal sebagai *carbon sinks*, baik yang bersifat alami maupun berbasis teknologi. Transisi menuju energi bersih merupakan salah satu strategi utama dalam mencapai NZE. Secara global, tujuan utama kebijakan iklim adalah mencapai emisi nol bersih guna memenuhi target Perjanjian Paris dalam membatasi peningkatan suhu global.

Menurut Pye et al (Pye *et al.*, 2021), untuk memperoleh target Net Zero Emission, perlu dilakukan analisis modelling energi untuk dapat membantu pengambil keputusan nasional dalam menentukan strategi pencapaian net-zero emisi gas rumah kaca (GRK). Namun dalam mencapai target tersebut terdapat tiga tantangan yaitu Tantangan pertama adalah kebutuhan untuk mewakili pilihan mitigasi baru saat ini tidak terwakili dalam banyak model energi. Ditekankan di sini di bawah representasi opsi sisi permintaan sektor pengguna akhir karena fokus sisi pasokan dari banyak model energi, bersama dengan masalah seputar ketahanan di menerapkan opsi penghilangan karbon dioksida (CDR= *Carbon Dioxide Removal*). Tantangan kedua menyangkut jenis model yang digunakan, apakah model saat ini menyediakan wawasan relevan yang memadai tentang kelayakan sistem, perilaku aktor, dan kebijakan efektivitas. Tantangan ketiga menyangkut bagaimana model diterapkan untuk analisis kebijakan. Prioritas termasuk kebutuhan untuk memperluas pemikiran skenario untuk memasukkan berbagai faktor ketidakpastian, memberikan wawasan tentang penetapan target, penyelarasan dengan tujuan kebijakan yang lebih luas, dan meningkatkan keterlibatan dan transparansi pendekatan.

Menurut Saeid Charani Shandiz (2021), untuk mencapai kondisi net zero emission untuk suatu kondisi emisi gas rumah kaca adalah upaya yang penting dilakukan karena merupakan sinergi dari pemanfaatan bauran energi dengan suatu skala ekonomi dan pilihan teknologi yang lebih luas. Namun demikian untuk mencapai tujuan tersebut ada beberapa tantangan dalam proses perencanaan dan desain infrastruktur energi. Konsep nol emisi yang dominan, ketersediaan alat pendukung, dan pendekatan perencanaan energi dapat mempengaruhi desain dan proses pengambilan keputusan para pemangku kepentingan. Kondisi perencanaan energi dari emisi nol bersih ditinjau secara kritis untuk mengidentifikasi tantangan dan peluang penelitian utama untuk meningkatkan pengambilan keputusan dan mempercepat adopsi teknologi yang lebih luas. Pendekatan perencanaan induk energi, alat, teknologi, dan indikator pengambilan keputusan yang digunakan untuk mencapai target emisi nol bersih dievaluasi dalam studi kasus terpilih di seluruh dunia. Hasil analisis dan penelitian menunjukkan adanya inkonsistensi dalam cakupan, definisi, dan pendekatan dalam perencanaan induk energi komunitas net-zero-emission. Selain itu, metrik dan kriteria ketahanan energi dan sosial jarang disertakan dalam rencana induk energi komunitas emisi nol bersih. Kerangka kerja perencanaan induk energi konseptual diusulkan yang dapat mendukung pengambilan keputusan berbasis kinerja dalam desain dan perencanaan komunitas net-zero-emission. Pendekatan dan alat perencanaan energi yang lebih terintegrasi, serta metrik penilaian yang lebih komprehensif dan multidimensi, diperlukan untuk pengambilan keputusan yang lebih baik dan efektif.

B. Optimalisasi Sistem Energi dan Sistem Pembangkitan Listrik

Pendapat dari Leander Kotzur, menentukan desain dan operasional sistem energi yang optimal secara lingkungan dan ekonomi adalah hal yang rumit dan kompleks. Khususnya untuk mengintegrasikan teknologi energi terbarukan yang bergantung pada cuaca ke dalam optimalisasi sistem energi model menghadirkan tantangan baru untuk kemampuan komputasi yang tidak hanya dapat diselesaikan dengan kemajuan dalam sumber daya komputasi. Akibatnya, pemodel sistem energi harus mengatasi kompleksitas model mereka dengan menerapkan berbagai metode

untuk memanipulasi data dan struktur model yang mendasarinya, dengan tujuan akhir menemukan solusi optimal. Metode pengurangan kompleksitas mana yang cocok untuk pertanyaan penelitian mana? Di sini kami meninjau pendekatan yang berbeda untuk menangani kompleksitas. Kami pertama menganalisis determinan dari kompleksitas dan memperhatikan bahwa banyak pemicu kompleksitas dapat dihindari secara apriori dengan desain model yang disesuaikan. Kedua, kami melakukan tinjauan metode pengurangan kompleksitas sistematis untuk model optimasi sistem energi, yang dapat berkisar dari linearisasi sederhana yang dilakukan oleh pemodel hingga pendekatan multi-level canggih yang menggabungkan metode agregasi dan dekomposisi. Berdasarkan gambaran umum ini, kami mengembangkan panduan untuk sistem energi pemodel yang menghadapi keterbatasan komputasi.

Pendapat dari Franke, sistem energi China sebagian besar didasarkan pada pembangkit listrik tenaga batu bara, yang memegang pangsa 69% pada tahun 2017. Jumlah yang besar pembangkit listrik tenaga batubara menyebabkan polusi udara dan emisi CO₂ yang tinggi. China memiliki potensi energi terbarukan yang tinggi energi, yang dapat membawa transformasi sistem energi di masa depan. Transisi dari sistem energi dari berbasis batubara ke berbasis energi terbarukan merupakan tantangan besar. Sistem energi karbon-netral didasarkan terutama pada energi terbarukan yang berfluktuasi seperti angin dan tenaga surya. Untuk memenuhi permintaan per jam, pilihan fleksibilitas diperlukan untuk menyeimbangkan produksi energi yang mudah menguap. Dalam makalah ini, kami membuat dua skenario untuk menganalisis sistem energi Cina yang netral karbon pada tahun 2060. Skenario pertama berfokus pada listrik untuk dekarbonisasi sistem energi. Skenario kedua menggunakan hidrogen untuk dekarbonisasi. Kami menemukan bahwa kemungkinan penyimpanan seperti baterai dan hidrogen memainkan peran utama dalam kedua skenario. Namun, jumlah baterai terpasang lebih rendah dalam skenario hidrogen meskipun kapasitas terpasang energi terbarukan adalah lebih tinggi. Ini karena peningkatan produksi hidrogen dalam skenario ini, yang meratakan fotovoltaik surya yang tinggi (PV) puncaknya pada siang hari. Hasil kami menyoroti pentingnya opsi fleksibilitas dalam energi terdekarbonisasi sistem

dengan pangsa energi terbarukan yang tinggi. Menurut Qiu (Qiu, 2025), Memprioritaskan penggunaan energi bersih adalah strategi penting untuk mencapai konservasi energi dan mengurangi emisi dalam sistem pembangkitan listrik. Sumber energi terbarukan, termasuk tenaga air, angin, surya, dan nuklir, memberikan manfaat signifikan bagi pelestarian lingkungan dan keberlanjutan. Namun, penerapan prioritas pengiriman energi bersih memerlukan kerangka kebijakan yang kuat dan kemajuan teknologi. Pemerintah dapat memperkenalkan langkah-langkah pendukung, seperti kuota energi terbarukan dan akses prioritas ke jaringan, untuk mendorong pengembangan energi bersih. Selain itu, kemajuan dalam penelitian dan pengembangan teknologi peramalan pembangkit energi serta sistem jaringan pintar sangat penting untuk meningkatkan integrasi dan efisiensi energi bersih. Optimalisasi dapat dilakukan dengan menggunakan berbagai perangkat lunak, pada penelitian ini akan dilakukan optimalisasi biaya terendah dengan menggunakan perangkat lunak LEAP dengan optimizer NEMO.

C. Kondisi Pembangkit Listrik Nasional

Berdasarkan Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) tahun 2021 – 2030 yang dikeluarkan oleh PT PLN Persero tahun 2021, kapasitas pembangkit listrik terpasang saat ini masih didominasi oleh pembangkit listrik berbasis fosil. Pada tahun 2020, Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batubara (PLTUB) masih mendominasi yaitu sebanyak 30,16 GW atau sebesar 48,3% dari seluruh pembangkit terpasang saat ini. Pembangkit berbahan bakar gas, berupa PLTG, PLTGU, dan PLTU Minyak/Gas terpasang sekitar 17,59 GW atau memberi kontribusi sebesar 28,17% terhadap kapasitas pembangkit listrik nasional. Pembangkit berbahan bakar minyak berupa PLTD dan PLTMG saat ini terpasang 6,75 GW atau berperan sebesar 10,81%. Hingga tahun 2020 peranan pembangkit listrik berbasis Energi Baru dan Terbarukan (EBT) mempunyai peranan sebesar 12,72% atau terpasang sebanyak 7,95 GW. Dominasi pembangkit berbasis EBT adalah berupa PLT Air termasuk Mikrohidro sebesar 5,17 GW, diikuti oleh PLTP bumi, PLT EBT lainnya, PLT Biomasa, kemudian disusul oleh PLTS.

**Tabel 2.1. Kapasitas Pembangkit Berdasarkan RUPTL 2011 – 2022
(GW)**

Uraian	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021*	2022*
PLTA/ PLTM	3.92	3.94	4.09	4.16	4.29	4.40	4.86	4.94	4.98	5.17	5.72	5.93
PLTU MT												1.20
PLTA Pumped	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PLTP	1.15	1.26	1.28	1.34	1.35	1.44	2.20	1.92	2.44	2.44	2.58	2.69
PLT Biomasa	-	-	-	0.03	0.04	0.04	0.15	0.17	0.17	0.12	0.12	0.12
PLTSa	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PLTS	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.03	0.06	0.08	0.12	0.83
PLT BioFuel	-	-	-	0.22	0.08	0.08	-	-	-	-	-	-
PLT EBT Lain	0.00	-	0.00	-	0.00	0.00	0.00	0.07	0.13	0.13	0.15	0.45
PLTG	3.12	3.45	3.60	3.73	3.72	4.17	4.54	4.64	4.33	3.95	4.22	4.90
PLTGU	9.85	11.00	11.12	11.09	11.35	11.35	10.02	11.15	11.38	12.05	15.25	15.75
PLTMG	-	-	-	-	-	0.29	0.10	-	1.73	2.37	2.37	2.37
PLTD	5.05	5.54	6.08	5.86	5.46	5.46	6.55	6.28	4.91	4.38	4.41	4.53
PLTGB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
PLTU Batubara	14.82	17.49	18.66	20.54	21.08	23.84	25.69	26.48	29.40	30.16	34.95	36.36
PLTU Minyak/ Gas	1.80	1.80	1.79	1.76	1.76	1.76	1.61	1.63	1.59	1.59	1.59	1.59
Impor	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Subtotal	39.71	44.48	46.61	48.74	49.13	52.84	55.73	57.30	61.13	62.45	71.47	76.70
TOTAL	39.71	44.48	46.61	48.74	49.13	52.84	55.73	57.30	61.13	62.45	71.47	76.70

Ket : * berdasarkan tambahan kapasitas

Sumber : RUPTL (2021 – 2030)

Pada tahun 2022, peranan EBT mulai bergeser karena Indonesia mulai terpicu untuk menggunakan teknologi rendah karbon, namun peranan batubara masih mendominasi, kemudian disusul oleh PLTGU. Peranan EBT sedikit meningkat menjadi 13.05% terhadap total kapasitas terpasang. Berikut kapasitas terpasang Pembangkit Listrik Nasional yang diambil dari RUPTL 2021 – 2030 (PT.PLN (Persero), 2021).

D. Kebijakan EBT dan Kebijakan Energi Nasional di Indonesia

Menurut UU No. 30 Tahun 2007 (Indonesia, 2017) , Energi Baru Terbarukan dijelaskan sebagai berikut:

- Sumber energi baru adalah sumber energi yang dapat dihasilkan oleh

teknologi baru baik yang berasal dari sumber energi terbarukan maupun sumber energi tak terbarukan, antara lain nuklir, hidrogen, gas metana batu bara (*coal bed methane*), pencairan batu bara (*liquified coal*), dan batu bara tergaskan (*gasified coal*).

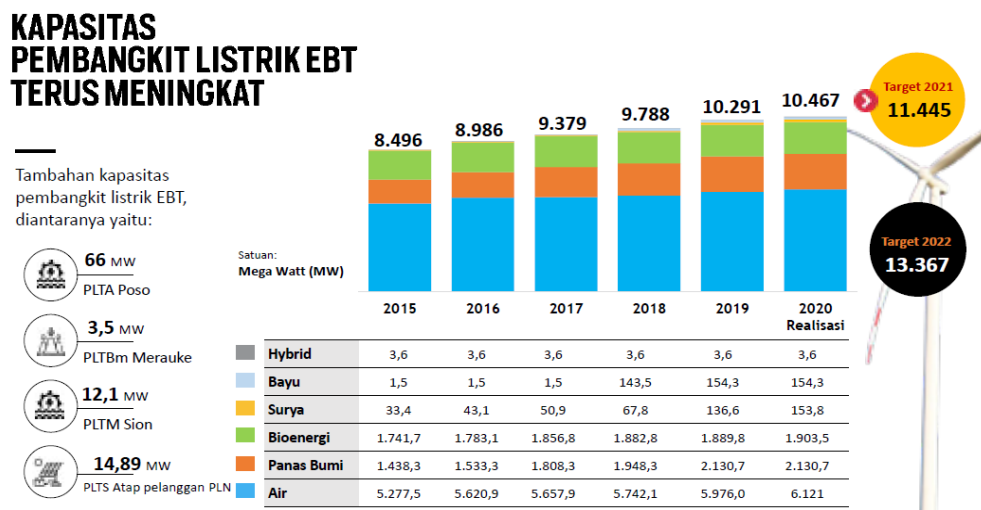
- Energi baru adalah energi yang berasal dari sumber energi baru.
- Sumber energi terbarukan adalah sumber energi yang dihasilkan dari sumber daya energi yang berkelanjutan jika dikelola dengan baik, antara lain panas bumi, angin, bioenergi, sinar matahari, aliran dan terjunan air, serta gerakan dan perbedaan suhu lapisan laut.

Menurut Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (Pemerintah Republik Indonesia (Government of Indonesia), 2014) Pasal 9 menyatakan bahwa pada bauran energi pada tahun 2025 peran Energi Baru dan Energi Terbarukan paling sedikit 23% (dua puluh tiga persen) dan pada tahun 2050 paling sedikit 31% (tiga puluh satu persen) sepanjang keekonomiannya terpenuhi; dan pada Pasal 10 menyatakan Ketersediaan Energi untuk kebutuhan nasional dengan: meningkatkan eksplorasi sumber daya, dan/atau cadangan terbukti Energi, baik dari maupun Energi Baru dan Energi Terbarukan serta meningkatkan produksi Energi dan Sumber Energi dalam negeri dan/atau dari sumber luar negeri. Kemudian regulasi mengenai Kebijakan Energi Nasional diperbaharui dengan Peraturan Pemerintah No. 40 Tahun 2025 (Government of Indonesia, 2025) yang menyatakan bahwa target pangsa EBT dalam bauran energi primer nasional sebesar 19%-23% pada tahun 2030, kemudian mencapai target 70%-72% pada tahun 2060. Meninjau regulasi tersebut, Pemerintah Indonesia sangat mendukung pengembangan energi baru dan terbarukan dalam memenuhi kebutuhan energi nasional, hal ini sudah ditegaskan dalam bentuk Undang-undang dan Peraturan Pemerintah.

E. Perkembangan EBT di Indonesia

Menurut Direktorat Jendral EBTKE Kementerian ESDM, dalam mengembangkan energi hijau ramah lingkungan dalam penyediaan tenaga listrik untuk masyarakat, Ditjen EBTKE turut mengambil peran melalui upaya

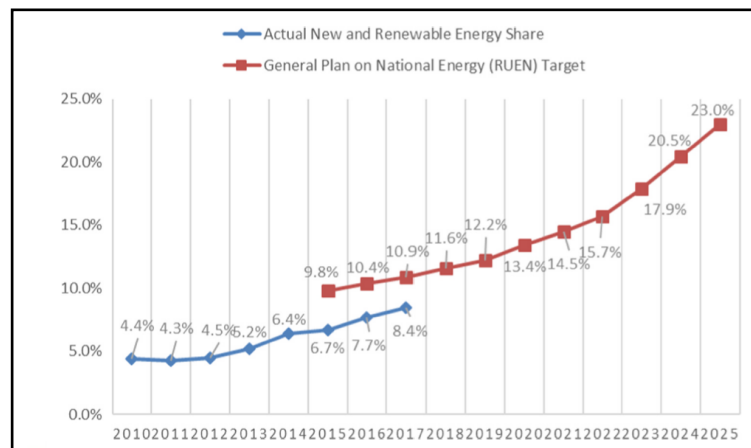
peningkatan kapasitas terpasang pembangkit PLT EBT. Upaya tersebut sejalan dengan target nasional yang tertuang dalam Rencana Umum Energi Nasional yaitu 23% porsi EBT dalam Bauran Energi Nasional di tahun 2025. Tren perkembangan pembangkit nasional, status dari tahun 2018 hingga 2020 mulai difokuskan pada pengembangan pembangkit EBT, seperti PLT Bayu dan PLT Surya. Adapun tambahan kapasitas pembangkit listrik EBT hingga Desember tahun 2020 sebesar 176 MW, diantaranya adalah 16,9 MWp PLT Surya (PLTS ground mounted 1,93 MWp dan PLTS Atap sebesar 14,9 MWp), PLTA Poso kapasitas 66 MW, PLTBm Merauke kapasitas 3,5MW, PLTM Sion kapasitas 12,1 MW, dan 13,7 MW PLT Bioenergi. Penambahan tersebut meningkatkan porsi EBT dalam Bauran Energi Nasional dari 9% di tahun 2019 menjadi 12,1 % di tahun 2020 (Gambar 2.1).



Gambar 2.1. Pengembangan Pembangkit EBT di Indonesia saat ini

Pendapat dari Maulidia, target energi terbarukan yang diumumkan pada tahun 2014 memberikan peluang untuk mereformasi sektor kelistrikan Indonesia yang didominasi oleh bahan bakar fosil. Dalam makalah ini kami membahas kebijakan energi terbarukan Indonesia saat ini dan prospek masa depan untuk mencapai target. Makalah ini berfungsi sebagai tinjauan pustaka tentang perubahan energi di Indonesia lanskap kebijakan, sebagai bagian dari penelitian yang lebih luas yang menyelidiki target energi terbarukan dan peran swasta sektor. Gambar 2.2.

menunjukkan bahwa tidak semua target pengembangan energi nasional dapat tercapai dimana terjadi pergeseran target pangsa EBT antara perencanaan dan realitasnya.



Gambar 2.2. Pangsa Target EBT vs Realisasi (Maulidia *et al.*, 2019)

Terlepas dari kekayaan sumber daya energi terbarukan di Indonesia, banyak penelitian telah mengidentifikasi beberapa kendala pengembangan energi terbarukan, termasuk faktor geografis, kelembagaan dan investasi. Kajian ini akan memperkaya yang sudah ada literatur tentang kebijakan energi terbarukan yang menekankan pentingnya melibatkan sektor swasta. Berdasarkan penilaian kualitatif yang ketat terhadap perubahan kebijakan Indonesia yang mempengaruhi kemajuan energi terbarukan target energi. Pelajaran dari pengalaman Indonesia dapat memberikan wawasan bagi para pembuat kebijakan khususnya di negara berkembang.

F. Nationally Determined Contribution: First NDC

Menurut dokumen *Second National Communication* tahun 2010, emisi gas rumah kaca (GRK) Indonesia diperkirakan sebesar 1,8 GtCO₂e di tahun 2005. Angka ini menunjukkan peningkatan sebesar 0,4 GtCO₂e dibandingkan tahun 2000. Sumber emisi paling besar (63%) berasal dari kegiatan alih guna lahan serta kebakaran hutan dan lahan, sedangkan konsumsi bahan bakar minyak menyumbangkan emisi GRK sebesar 19% dari total emisi. Berdasarkan dokumen

First Biennial Update Report (BUR) yang telah disampaikan kepada UNFCCC pada bulan Januari 2016, emisi GRK nasional adalah sebesar 1.453 GtCO₂e di tahun 2012, yang menunjukkan peningkatan sebesar 0.452 GtCO₂e dari tahun 2000. Sektor utama yang berkontribusi mengeluarkan emisi adalah sektor LUCF termasuk kebakaran gambut (47,8%) dan sektor energi (34,9%). Dari perhitungan NDC ini selanjutnya penurunan emisi di sektor energi dalam mencapai target NZE yang akan dijadikan penelitian dalam proposal ini.

G. Peta Jalan Menuju 2060: *Indonesia Long Term Strategy – Low Carbon Climate Resilience* (LST-LCCR 2050)

Untuk mewujudkan target penurunan emisi maupun *Net Zero Emission* (netralitas karbon), pemerintah merumuskan peta jalan menuju netral karbon di tahun 2060 atau lebih cepat sesuai Strategi Jangka Panjang untuk Rendah Karbon dan Ketahanan Iklim (LTS-LCCR). Strategi ini dirancang dengan mempertimbangkan kebutuhan untuk menyeimbangkan antara pengurangan emisi dan pembangunan ekonomi, dan menempatkan pengurangan emisi, pertumbuhan ekonomi, keadilan atau keadilan dan pembangunan yang tahan terhadap iklim sebagai bagian integral dari tujuan LTS-LCCR. Lingkungan yang kondusif untuk investasi, reformasi struktural untuk mendukung pertumbuhan, dan kebijakan iklim yang dirancang dengan baik sebagai prasyarat keberhasilan LTS-LCCR akan menjadi bagian dari kebijakan dan tindakan lintas sektor yang harus ditangani selama implementasi LTS-LCCR. LTS-LCCR 2050 memberikan arahan kebijakan nasional jangka panjang tentang perubahan iklim, dengan skenario jalur berdasarkan ilmu pengetahuan terbaik yang tersedia. Hal ini memungkinkan penyesuaian lembur untuk mengikuti dinamika nasional dan global.

Mitigasi:

Tiga skenario jalur dilakukan selama pengembangan LTS-LCCR Indonesia untuk memberikan pemahaman secara transparan tentang konsekuensi dari setiap opsi skenario dalam hal pengurangan emisi dan dampak ekonomi, prasyarat baik di dalam negeri maupun internasional untuk keberhasilan implementasi skenario yang

paling ambisius. Tiga skenario jalur yang ditetapkan adalah sebagai berikut: (i) komitmen tanpa syarat diperpanjang dari NDC/skenario kebijakan saat ini (dinamakan sebagai CPOS), (ii) skenario transisi (dinamakan sebagai TRNS), dan (iii) skenario rendah karbon yang kompatibel dengan Perjanjian Paris target (disebut sebagai LCCP).

Berdasarkan CPOS, emisi menunjukkan peningkatan terus menerus setelah tahun 2030, sedangkan TRNS menunjukkan penurunan emisi tetapi tidak akan cukup untuk mencapai tingkat emisi tahun 2050 yang sesuai dengan target Perjanjian Paris. Di bawah LCCP, penurunan emisi yang cepat akan terjadi setelah tahun 2030, mencapai 540 Mton CO₂e pada tahun 2050 atau setara dengan sekitar 1,61 ton CO₂e per kapita.

Sektor Energi

Empat pilar panduan berikut digunakan untuk mengembangkan strategi rendah karbon jangka panjang di sektor energi dengan mempertimbangkan perkembangan masa lalu dan proyeksi permintaan dan pasokan energi di masa mendatang: (i) penerapan langkah-langkah efisiensi energi; (ii) penggunaan listrik tanpa karbon dalam transportasi dan bangunan; (iii) peralihan bahan bakar dari batubara ke gas dan energi terbarukan di industri; dan (iv) peningkatan energi terbarukan di bidang kelistrikan, transportasi dan industri.

Kebutuhan energi akan meningkat seiring dengan perkembangan ekonomi dan pertumbuhan penduduk. Penerapan langkah-langkah efisiensi energi akan menyebabkan intensitas energi semua sektor pengguna energi pada tahun 2050 menjadi jauh lebih rendah dibandingkan dengan tahun dasar. Dari tiga skenario yang digunakan untuk mengembangkan strategi rendah karbon jangka panjang menunjukkan bahwa CPOS tidak akan mengarah pada sistem energi yang efisien. TRNS dan LCCP memungkinkan penerapan langkah-langkah efisiensi energi yang efektif di sisi pengguna akhir. Proyeksi tersebut menunjukkan bahwa akan terjadi perubahan yang signifikan menuju tahun 2050 dimana listrik akan menjadi jenis energi yang dominan di masa depan, sehingga dampak yang signifikan dapat diperoleh melalui aksi mitigasi yang fokus pada pembangkit listrik.

Proyeksi bauran pembangkitan menunjukkan bahwa pembangkitan listrik akan meningkat secara signifikan sebagai akibat dari pembangunan ekonomi, kesejahteraan masyarakat dan pertumbuhan penduduk. Juga akan ada perbedaan yang signifikan dalam bauran pembangkitan energi dari ketiga skenario. Pada input energi, CPOS akan bergantung terutama pada batubara sementara TRNS dan LCCP akan lebih terdiversifikasi. Pada tingkat emisi, CPOS akan menghasilkan peningkatan emisi yang berkelanjutan dan mencapai sekitar 2.116 Mton pada tahun 2050. TRNS dimana tindakan mitigasi dampak signifikan dan tinggi mulai diterapkan, akan menghasilkan tingkat emisi yang lebih rendah namun dengan tren meningkat dan mencapai sekitar 1.439 Mton pada tahun 2050. LCCP akan memberikan tingkat emisi terendah pada tahun 2050, di mana tindakan mitigasi berdampak tinggi seperti penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS) serta penangkapan, pemanfaatan, dan penyimpanan karbon (CCUS) akan diterapkan secara luas. Berdasarkan LCCP, tren penurunan emisi yang signifikan akan terjadi setelah tahun 2030 dari 1.030 Mton CO₂e menjadi sekitar 572 Mton CO₂e pada tahun 2050.

H. Perubahan Iklim dan Target NZE di Indonesia

Presentasi Menteri Perencanaan Pembangunan Nasional/Kepala Bappenas pada acara Indonesia Net Zero Summit 2021 di minggu ketiga April memertegas hal itu, dengan memasukkan dampak COVID-19 ke dalam perhitungan. Pada presentasi tersebut, dibebankan empat skenario NZE, yaitu untuk tahun 2045, 2050, 2060 dan 2070. Lagi-lagi, semakin ambisius Indonesia mencapai kondisi NZE itu, maka pertumbuhan ekonomi semakin tinggi. Pada keempat skenario itu, pertumbuhan GDP Indonesia antara tahun 2021 hingga 2045, secara berurutan, akan mencapai 6,21; 6,06; 5,87; dan 5,82 persen per tahun. Dari grafiknya juga tampak bahwa angka pertumbuhan itu relatif datar untuk skenario 2060 dan 2070, namun naik dengan tegas untuk skenario 2045 dan 2050.

Perubahan iklim dicirikan oleh dua hal penting, yaitu *borderless issue*, dan *long-term time span*. Yang pertama adalah bahwa bencana atau peristiwa yang berdampak perubahan iklim di suatu tempat atau belahan dunia, akan berdampak di

tempat kita berada, atau sebaliknya. Bencana dimaksud berawal sejak revolusi industri di negara-negara maju pada abad 18, yang kemudian dianggap “dosa” negara maju. Ciri perubahan iklim yang kedua adalah *long-term time span issue*. Bahwa proses perubahan iklim terjadi dalam kurun waktu yang panjang, antara 50 sampai 100 tahun. Itulah sebabnya NZE dipatok akan terjadi pada tahun 2045, 2050, 2060, dst. Penentuan tahun NZE bergantung pada waktu kapan kita berhasil mencapai “*peak emission*”. Menurut skenario Bappenas, Indonesia bisa mencapai NZE tahun 2045 atau 2050 asalkan paling lambat tahun 2027 sudah terjadi ‘*peak*’, artinya jumlah emisi CO₂ mencapai jumlah maksimal pada tahun tersebut, dan setelah itu harus turun. Keterlambatan satu tahun saja dalam menurunkan emisi, bisa menyebabkan NZE mundur 5 – 10 tahun. Bila *peak* baru dicapai tahun 2033-2034, maka NZE akan terjadi pada tahun 2060-2070.

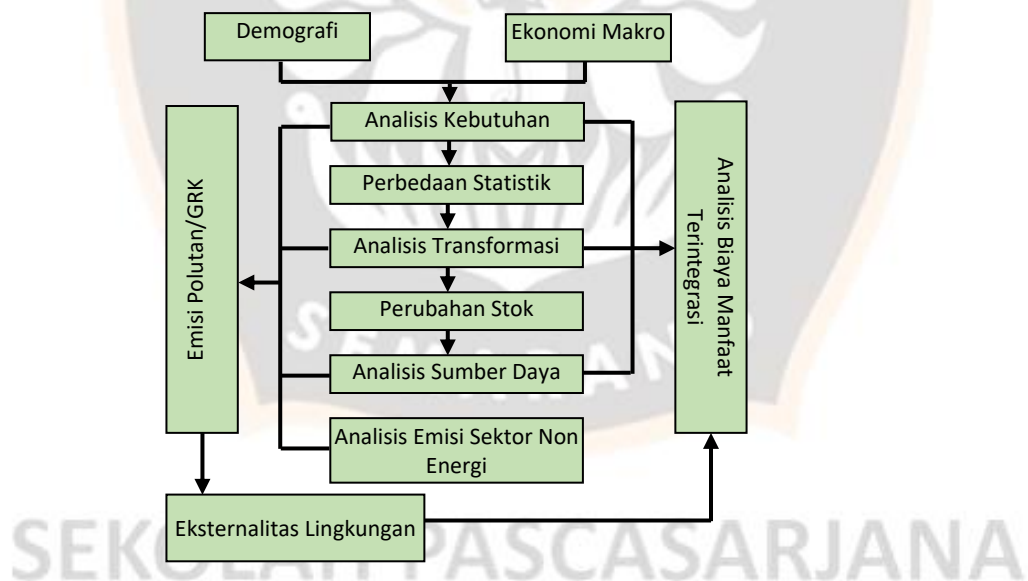
I. LEAP (Low Emission Analysis Platform)

LEAP adalah *software* pemodelan terintegrasi berbasis skenario yang banyak digunakan untuk analisis kebijakan energi dan kajian mitigasi perubahan iklim baik sektor energi maupun non energi, yang dapat digunakan untuk melacak kebutuhan dan produksi energi di semua sektor ekonomi serta ekstraksi sumber daya energi. LEAP mendukung bermacam metodologi pemodelan, dari bottom-up hingga top-down. LEAP menjadi standar *de facto* bagi negara-negara yang melakukan perencanaan sumber daya terintegrasi, kajian mitigasi gas rumah kaca (GRK), dan strategi pembangunan rendah karbon. Deskripsi lain menyatakan Model LEAP adalah model jangka panjang alat pemodelan yang dapat membuat dan kemudian mengevaluasi alternative skenario dengan membandingkan permintaan energi, biaya sosial dan manfaat, dan dampak lingkungan. Modelnya bisa digunakan untuk melacak konsumsi energi, emisi udara lokal dan regional polutan, GRK, dan polutan iklim berumur pendek dan sehingga cocok untuk studi tentang manfaat tambahan iklim dari udara local pengurangan polusi(Chen *et al.*, 2021).

Selain informasi mengenai ekonomi makro, model yang dikembangkan pada kajian ini dengan menggunakan model LEAP memerlukan juga data-data mengenai demografi, khususnya yang menyangkut kebutuhan energi dari sektor-sektor

pengguna energi, yaitu sektor industri, sektor transportasi, sektor rumah tangga, sektor komersial dan sektor lainnya. Untuk setiap kategori kebutuhan, LEAP menggunakan algoritma internal untuk menghitung konsumsi energi dari masing-masing teknologi, masing-masing moda transportasi dan jenis bahan bakar. Hasil LEAP memberikan estimasi konsumsi energi dari pola kebutuhan sektor pengguna energi saat ini dan masa depan berdasarkan pada asumsi bahwa kondisi saat ini akan dipertahankan dan tidak akan ada perbaikan sistem kendali transportasi atau teknologi alternatif yang diimplementasikan.

LEAP dirancang dengan konsep analisis skenario. Skenario adalah alur cerita yang konsisten tentang bagaimana suatu sistem energi dapat berkembang dari waktu ke waktu. Dengan menggunakan LEAP, analis kebijakan dapat membuat beberapa skenario alternatif dan kemudian mengevaluasi skenario alternatif tersebut dengan membandingkan kebutuhan energinya, biaya dan manfaatnya serta dampak lingkungannya.



Gambar 2.3. Komputasi LEAP

Perhitungan emisi dalam LEAP:

Sumber emisi GRK paling utama dari sektor energi adalah pembakaran bahan bakar. Emisi *fugitive* dari kegiatan produksi dan penyaluran bahan bakar secara

keseluruhan jauh lebih kecil dibandingkan emisi dari pembakaran bahan bakar. Jenis GRK utama hasil proses pembakaran bahan bakar adalah karbon dioksida (CO₂), selain itu juga dihasilkan karbon monoksida (CO), metana (CH₄), N₂O, dan senyawa organik volatil non-metana (NMVOCs).

Berdasarkan IPCC 2006, ketelitian penghitungan emisi GRK dikelompokkan dalam 3 tingkat ketelitian (Tier) sebagai berikut:

1. Tier 1: estimasi berdasarkan data aktifitas dan faktor emisi *default IPCC*.
2. Tier 2: estimasi berdasarkan data aktifitas yang lebih akurat dan faktor emisi *default IPCC* atau faktor emisi spesifik suatu negara atau *plant*.
3. Tier 3: estimasi berdasarkan metoda spesifik suatu negara dengan data aktifitas yang lebih akurat (pengukuran langsung) dan faktor emisi spesifik suatu negara atau *plant*.

Gas rumah kaca terdiri dari beberapa jenis dan setiap gas mempunyai potensi pemanasan global (*Global Warming Potential/GWP*) yang diukur secara relatif berdasarkan emisi CO₂ dengan nilai 1. Semakin besar nilai GWP, maka akan semakin bersifat merusak. Pada analisis ini hanya dipertimbangkan gas karbon dioksida (CO₂), metana (CH₄), dinitro oksida (N₂O) dengan menggunakan nilai GWP dari Assessment Report 5 (AR5) yaitu berturut-turut masing-masing sebesar 1, 28, dan 265 (IPCC, 2024).

J. CBA (Cost Benefit Analysis) – Analisis Biaya Manfaat

Analisis biaya-manfaat telah lama menjadi alat inti dari kebijakan publik. Sistematisasi proses menghitung manfaat dan biaya pilihan kebijakan dan proyek sekarang secara luas dianggap sebagai langkah penting dalam kebijakan proses. Ini membantu para pembuat keputusan untuk memiliki gambaran yang jelas tentang bagaimana masyarakat akan berada di bawah berbagai kebijakan pilihan untuk mencapai tujuan tertentu. Khususnya untuk pembangunan lingkungan hidup kebijakan, di mana analisis biaya-manfaat merupakan inti dari desain dan implementasi kebijakan di banyak negara. Biasanya CBA diterapkan sebagai pendekatan top-down, artinya badan pengambil keputusan (seperti kementerian Keuangan) mengeluarkan panduan tentang kebijakan atau proyek mana yang

dinilai, dan bagaimana biaya dan manfaat bagi masyarakat harus diidentifikasi dan kemudian diukur.

Menurut Atkinson, et.al ((Atkinson and Mourato, 2008), analisis biaya-manfaat lingkungan, atau CBA, mengacu pada ekonomi penilaian kebijakan dan proyek yang memiliki tujuan yang disengaja untuk meningkatkan penyediaan jasa lingkungan atau tindakan yang mungkin mempengaruhi (terkadang merugikan) lingkungan sebagai konsekuensi tidak langsung. Menurut Kuosmanen (Kuosmanen and Kortelainen, 2007) Analisis Biaya-Manfaat Lingkungan (ECBA) biasanya menyangkut evaluasi sosial investasi proyek atau kebijakan yang melibatkan dampak lingkungan yang signifikan, misalnya pembangunan jalan raya baru. Dalam studi ini pertimbangan optimasi pembangunan pembangkit listrik berbasis Energi Baru dan Terbarukan (EBT). Tergantung pada waktu analisis relatif terhadap implementasi proyek atau kebijakan, dua jenis studi dapat dipisahkan (Whitehead dan Blomquist, 2006). Sebelumnya analisis biaya-manfaat dilakukan sebelum proyek atau kebijakan apa pun diterapkan untuk menemukan yang optimal alternatif, sedangkan analisis biaya-manfaat ex post dilakukan setelah implementasi proyek atau kebijakan untuk memeriksa manfaat bersih yang direalisasikan. Dalam makalah ini, kami fokus pada mantan yang lebih umum analisis ante, dimana tujuannya adalah untuk menemukan proyek yang optimal untuk dilaksanakan di masa depan

Pehitungan CBA dilakukan dari hasil luaran perangkat lunak LEAP dengan mempertimbangkan beberapa elemen, antara lain biaya permintaan, modal (*capital cost*) dan biaya operasi dan pemeliharaan dinyatakan sebagai biaya total, biaya per aktivitas, atau biaya penghematan energi relatif terhadap beberapa skenario:

- Biaya modal transformasi, termasuk biaya pembangkitan listrik
- Transformasi biaya operasi dan pemeliharaan tetap dan variabel (*fixom* dan *varom*)
- Biaya eksternalitas dari emisi polutan,
- Manfaat eksternal penghematan emisi GRK
- Biaya Lainnya

K. Battery Energy Storage System

Perangkat penyimpanan energi (*energy storage*) dapat dikategorikan sebagai mekanik, elektrokimia, kimia, listrik, atau perangkat termal, tergantung pada teknologi penyimpanan yang digunakan. Teknologi mekanik, termasuk pembangkit listrik tenaga air yang dipompa merupakan teknologi penyimpanan energi tertua. Namun batasan dari teknologi ini adalah kebutuhannya akan sumber daya air yang melimpah dan ketinggian geografis yang berbeda, serta memerlukan pembangunan jaringan transmisi tenaga listrik ke rumah tangga yang mengkonsumsi listrik. Saat ini biaya konstruksi saluran transmisi telah melebihi biaya fasilitas pembangkitan listrik tenaga air (PLTA). Saat ini, peningkatan produksi massal baterai sekunder lithium dengan biaya yang lebih rendah mendorong kebutuhan perangkat penyimpanan energi baterai. Baterai sekunder lithium mengubah listrik energi ke energi kimia, dan sebaliknya, atau menggunakan teknologi elektrokimia. Teknologi semacam itu juga termasuk baterai penyimpanan timbal (Pb) dan baterai natrium-sulfur. Teknologi kimia termasuk teknologi penyimpanan energi seperti *fuel cell*.

Perangkat penyimpanan energi dapat digunakan sebagai catu daya tak terputus (UPS = Uninterrupted Power Supply), dan dukungan sistem transmisi dan distribusi (T&D), atau pembangkitan listrik berskala besar, tergantung pada teknologi yang diterapkan dan pada kapasitas penyimpanan. Di antara perangkat penyimpanan energi elektrokimia, kimia, dan fisik, teknologi yang paling banyak mendapat perhatian baru-baru ini termasuk dalam lingkup UPS dan dukungan sistem T&D. Baterai lithium merupakan baterai yang umum digunakan saat ini.

Teknologi baterai untuk perangkat penyimpanan energi dapat dibedakan berdasarkan kepadatan energi, efisiensi pengisian dan pengosongan (pulang pergi), masa pakai, dan ramah lingkungan perangkat. Densitas energi didefinisikan sebagai jumlah energi yang dapat disimpan dalam satu sistem per satuan volume atau per satuan berat. Baterai sekunder lithium menyimpan 150–250 watt-jam per kilogram (kg) dan dapat menyimpan 1,5–2 kali lebih banyak energi daripada baterai Na–S, dua hingga tiga kali lebih banyak dari baterai aliran redoks, dan sekitar lima kali lebih banyak dari baterai penyimpanan timbal. Efisiensi pengisian dan pengosongan adalah skala kinerja yang dapat digunakan untuk menilai efisiensi

baterai. Baterai sekunder lithium memiliki efisiensi pengisian dan pengosongan tertinggi, pada 95%, sedangkan timbal baterai penyimpanan sekitar 60% -70%, dan baterai aliran redoks, sekitar 70% -75%.

L. Carbon Capture Storage (CCS) dan Carbon Capture Unit Storage (CCUS)

Menurut Budiman (Budiman, Arief, 2024), teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS) merupakan salah satu perangkat yang bertujuan untuk mengurangi jumlah CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer dan membantu mengurangi efek pemanasan global. Teknologi CCS ini dapat diterapkan pada sektor pembangkit listrik terutama PLTU Batubara, juga pada sektor industri padat energi yang teknologinya masih sulit dirubah dengan teknologi berbasis energi terbarukan. Industri padat energi antara lain adalah industri baja, semen, dan petrokimia. Proses CCS dalam mengurangi emisi CO₂ ada tiga tahapan utama, yaitu:

1. Tahap penangkapan (*Capture*) dan pemisahan CO₂ yang dihasilkan oleh proses industri, pengolahan gas alam maupun hasil pembakaran (*combustion*) pembangkit listrik. Metode yang digunakan dalam tahapan ini antara lain adalah penangkapan fisik berupa *absorpsi* menggunakan pelarut kimia, penggunaan adsorben padat, pendinginan yaitu untuk melakukan kondensasi CO₂, penangkapan kimia yaitu dengan menggunakan zat kimia tertentu untuk beraksi dengan CO₂, pemisahan CO₂ dengan menggunakan membran, dan melakukan penangkapan biologis dengan menggunakan bahan organisme atau enzim.
2. Tahap transportasi/pengangkutan CO₂. Untuk dapat ditransportasikan CO₂ kemudian dikompres menjadi cairan dan kondisi fluida superkritis agar mudah diangkut ke tempat penyimpanan. Adapun cara-cara untuk mengangkut CO₂ antara lain adalah: menggunakan jalur pipa, kapal tanker, atau menggunakan truk untuk tempat penyimpanan dalam jangka pendek.
3. Tahap terakhir berupa penyimpanan CO₂ dalam jangka panjang pada lokasi dalam bumi atau disebut *geological storage*, penyimpanan di lautan, dan mineralisasi, antara lain berupa sumur minyak yang telah kosong. Tahap ini

dilakukan dengan cara menginjeksikan CO₂ ke dalam tanah serta dilakukan pemantauan untuk memastikan agar CO₂ tidak bocor ke atmosfer.

Saat ini di Indonesia, implementasi teknologi CCS didukung oleh kebijakan Pemerintah, antara lain Peraturan Kementerian ESDM No. 2 Tahun 2023 tentang Penyelenggaraan Penangkapan dan Penyimpanan Karbon, serta Penangkapan, Pemanfaatan, dan Penyimpanan Karbon pada Kegiatan Usaha Hulu Minyak dan Gas Bumi, serta Peraturan Presiden No. 14 Tahun 2024 tentang Penyelenggaraan Kegiatan Penangkapan dan Penyimpanan Karbon. Saat ini Indonesia mempunyai 15 proyek CCS dan CCUS yang tersebar di berbagai perusahaan minyak dan gas bumi, dengan kapasitas sekuestrasi CO₂ sebesar 4,31 GT. Indonesia memiliki potensi penyimpanan sebesar 12.2 milyar ton CO₂ yang tersebar di 9 propinsi. Tidak semua cekungan sedimen cocok untuk penyimpanan CO₂ karena memerlukan karakteristik tertentu. Suatu cekungan yang dipertimbangkan untuk penyimpanan karbon harus memiliki karakteristik khusus, antara lain konsentrasi cekungan yang memadai, formasi batuan yang permeabel dan jenuh air asin, lapisan batuan dengan porositas rendah sebagai penutup (*cap rock*), serta struktur geologi yang relatif sederhana dan stabil. Menurut Ramadhan, target volume injeksi pada setiap tahap pengembangan ditentukan berdasarkan karakteristik reservoir, kesiapan infrastruktur, ketersediaan sumber CO₂, serta dukungan pendanaan, di samping pertimbangan yang lebih luas seperti biaya energi, kerangka regulasi, dan penerimaan sosial. Secara keseluruhan, faktor-faktor ini membentuk pendekatan bertahap Indonesia dalam pengembangan CCS (Ramadhan *et al.*, 2024).

M. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Teknologi PLTN mencakup *small modular reactor*, *pressurized water reactor*, dan teknologi PLTN lainnya terus berkembang. Pengembangan PLTN harus memenuhi persyaratan keselamatan (*safety*), keamanan (*security*), dan garda aman (*safeguards*). Pemilihan lokasi pembangunan harus dengan pertimbangan lokasi yang aman dari ancaman bencana geologi, daerah tidak padat penduduk, daerah bukan lumbung pangan, dan lain-lain.

Dalam RUPTL 2025 – 2034 dijabarkan bahwa Kementerian ESDM telah

menetapkan pengembangan energi nuklir melalui Keputusan Menteri ESDM Nomor: 85.K/TL.01/MEM.L/2025 tentang Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional (MEMR, 2025). Rencana pengembangan PLTN dalam RUPTL mengikuti dokumen RUKN. Dalam implementasi program pengembangan PLTN sesuai *guideline* yang dikeluarkan *International Atomic Energy Agency* (IAEA) serta mengacu pada ketentuan peraturan perundangan terkait ketenaganukliran terdapat 19 syarat *readiness of the infrastructure*, yaitu sebagai berikut:

- | | |
|---|---|
| 1. <i>Nuclear Safety</i> | 11. <i>Emergency Planning</i> |
| 2. <i>Funding and Financing</i> | 12. <i>Nuclear Security</i> |
| 3. <i>Legal Framework</i> | 13. <i>Nuclear Fuel Cycle</i> |
| 4. <i>Safeguards</i> | 14. <i>Radioactive Waste Management</i> |
| 5. <i>Radiation Protection</i> | 15. <i>Industrial Involvement</i> |
| 6. <i>Regulatory Framework</i> | 16. <i>Procurement</i> |
| 7. <i>Electrical Grid</i> | 17. <i>National Position</i> |
| 8. <i>Human Resources Development</i> | 18. <i>Management</i> |
| 9. <i>Sites and Supporting Facilities</i> | 19. <i>Stakeholder Involvement</i> |
| 10. <i>Environmental Protection</i> | |

Saat ini, Indonesia berada pada fase pertimbangan menuju penetapan pelaksanaan proyek. Berdasarkan *assessment* dari IAEA *Integrated Nuclear Infrastructure Review* (INIR) *Mission* tahun 2009, Indonesia telah melaksanakan persiapan dengan pemenuhan 16 dari 19 persyaratan elemen infrastruktur (poin 1 sampai 16), sehingga diperlukan langkah konkret untuk memenuhi seluruh persyaratan tersebut. Pemanfaatan teknologi PLTN di Indonesia tidak terbatas pada teknologi dan kapasitas *small modular reactor*, namun juga teknologi dan kapasitas PLTN lainnya (*large scale, medium scale, Pressurized water reactors (PWR), Boiling Water Reactors (BWR), floating, land-based, dll*). Pengembangan PLTN harus memenuhi persyaratan keselamatan (*safety*), keamanan (*security*), dan garda aman (*safeguards*), serta mengacu pada standar nasional dan internasional. Pemilihan lokasi pembangunan dilakukan dengan mempertimbangkan pemenuhan kriteria-kriteria perencanaan seperti keseimbangan *supply* dan *demand*, keekonomian, serta kajian komprehensif lebih lanjut.