

Dekarbonisasi Sektor Ketenagalistrikan Sampai 2050 Dalam Kerangka Kebijakan Energi Nasional

Yudiartono^{1,2}, Jaka Windarta¹, Adiarso²

¹ Magister Energi, Sekolah Pascasarjana, Universitas Diponegoro;

² Direktorat Perumusan Kebijakan Riset, Teknologi, dan Inovasi, Badan Riset dan Inovasi Nasional;

Email : yudiartono@students.undip.ac.id (Y), jakawindarta@lecturer.undip.ac.id (J.W),
osraida3@gmail.com (A);

Abstrak : Dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan akan bertumpu pada pembangkit EBT jenis PLTS, PLTA dan PLTA *pumped storage*, PLTP, PLTBm serta PLTN. Pada tahun 2025, produksi listrik dari EBT pada skenario transisi energi (TE) maupun nuklir (NK) diperkirakan sebesar 145,35 TWh, lebih tinggi 28% dibanding skenario BAU. Pembangkit EBT yang berkontribusi adalah PLTA dan PLTA *pumped storage* (62,24 TWh), PLTS (12,26 TWh), PLTP (29,76 TWh) dan EBT lainnya (41,09 TWh). Adapun PLTN akan mulai berkontribusi pada tahun 2035. Pada tahun 2050 diprediksi produksi listrik EBT pada skenario TE dan NK berturut-turut akan mencapai 566,93 TWh dan 722,33 TWh, masing-masing lebih tinggi 77% dan 126% dibanding skenario BAU yang hanya sebesar 319,44 TWh. Khusus untuk PLTN, pada skenario TE, total energi listrik yang akan dihasilkan pada tahun 2050 tersebut adalah sebesar 29,78 TWh. Sedangkan pada skenario NK, kontribusi dari PLTN naik signifikan menjadi 186,15 TWh. Selanjutnya, proyeksi bauran energi primer EBT pada tahun 2025 dan 2050, untuk skenario BAU, pangsanya berturut turut sebesar 18,17% dan 19,48%, jauh lebih rendah dari target KEN. Namun hal yang berbeda terjadi pada skenario TE, dimana kontribusi EBT mencapai 23,09% (2025) dan 31,33% (2050), sesuai dengan target KEN. Pada skenario NK, dimana penerapan PLTN mencapai 25 GW pada tahun 2050, bauran energi primer berbasis EBT naik signifikan menjadi 36,69%, serta emisi GRK turun menjadi 695,28 juta metric ton CO₂eq, lebih rendah berturut turut sebesar 7% dan 17% dibanding dengan skenario BAU dan skenario TE.

Kata Kunci : Dekarbonisasi, EBT, GRK

Abstract : Solar power, hydropower, pumped hydro storage, geothermal power, biomass power, and nuclear power will all be used to decarbonize the electrical sector. The amount of electricity produced from new and renewable energy (NRE) in the transition energy (TE) and nuclear (NK) scenarios in 2025 is estimated at 145.35 TWh, which is 28% more than the BAU scenario. The NRE power plants that contribute to this amount are hydropower and pumped hydro storage (62.24 TWh), solar power (12.26 TWh), geothermal power (29.76 TWh), and other NRE (41.09 TWh). In 2050, the TE and NK scenarios will produce 566.93 TWh and 722.33 TWh of NRE electricity, respectively, which is 77% and 126% more than the 319.44 TWh of the BAU scenario. Under the TE scenario, a total of 29.78 TWh of electricity will be produced by nuclear power, which would start to be operated in 2035. In the NK scenario, nuclear power reactors' contribution rises significantly, reaching 186.15 TWh. The estimated

NRE primary energy mix for the BAU scenario is predicted to be much lower than the National Energy Policy (KEN) target in 2025 and 2050, at 18.17% and 19.48%, respectively. However, in the TE scenario, the NRE contribution reaches the KEN target at 23.09% in 2025 and 31.33% in 2050, respectively. The NRE primary energy mix will increase to 36.69% in the NK scenario, with nuclear energy reaching 25 GW by 2050, and GHG emissions will be 695 million metric tons of CO₂eq, which are 7% and 17% lower, respectively, than in the BAU and TE scenarios.

Keywords : Decarbonize, NRE, GHG

1. Pendahuluan

Untuk mencapai pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) yang ambisius, serta mengurangi ancaman kenaikan suhu global, diperlukan tiga transformasi fundamental yang harus dilakukan secara bersamaan, yaitu elektrifikasi di sektor pengguna akhir, dekarbonisasi pasokan tenaga listrik, dan peningkatan efisiensi energi (Vidinopoulos, Whale, and Fuentes Hutfilter 2020). Kemudian, perjanjian Paris mengharuskan Indonesia untuk menguraikan dan mengkomunikasikan aksi ketahanan iklim pasca-2020 dalam dokumen Kontribusi yang ditetapkan secara Nasional (*Nationally Determined Contribution/NDC*) dan diserahkan kepada Sekretariat Konvensi Kerangka Kerja Perserikatan Bangsa-Bangsa tentang Perubahan Iklim (*United Nations Framework Convention on Climate Change/UNFCCC*) (Bappenas 2022). Pemerintah Indonesia telah menerbitkan UU No. 16 tahun 2016 tentang pengesahan perjanjian Paris tersebut, yang menargetkan penurunan emisi GRK pada tahun 2030 (Presiden RI 2016).

Target NDC dipandang dapat memicu pengembangan investasi hijau di Indonesia, di mana target tanpa syarat secara nasional dapat tercapai melalui penurunan emisi GRK sebanyak 11% pada sektor energi. Dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan merupakan landasan upaya Indonesia untuk mencapai tujuan terkait pengurangan emisi dari sektor energi tersebut. Regulasi terbaru dan rencana implementasi diantaranya meliputi sistem perdagangan emisi (*Emissions Trading System, ETS*). Pengembangan dan penerapan ETS domestik untuk sektor listrik dan industri merupakan salah satu mekanisme kebijakan utama pemerintah untuk membantu memenuhi target NDC dan mendorong pembangunan berkelanjutan rendah karbon (Ministry of Finance 2022).

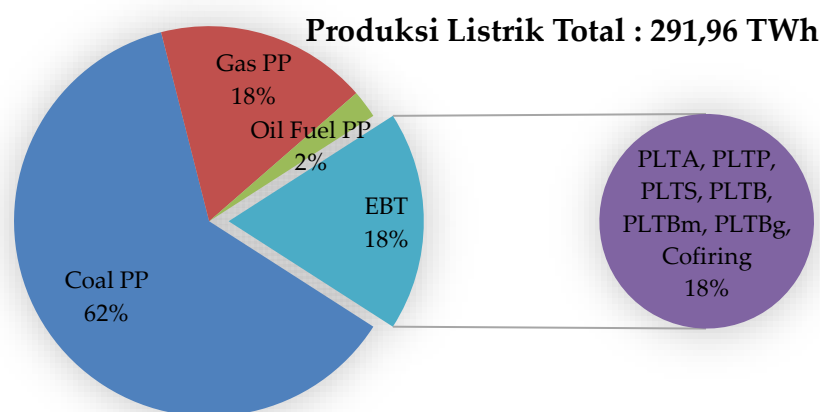
Hingga tahun 2020, Kementerian ESDM mencatat bahwa 61,95% dari produksi listrik yang dihasilkan berasal dari pembangkit batubara (PLTUB). Selain sebagai sumber energi listrik, batubara merupakan komoditas ekspor yang berkontribusi pada penerimaan negara bukan pajak dan memberikan dampak positif pada neraca dagang Indonesia. Fakta ini menjadi tantangan bagi Indonesia untuk menemukan strategi dekarbonisasi berbasis energi, khususnya di sektor ketenagalistrikan, sekaligus menjaga kualitas pertumbuhan ekonomi nasional. Strategi dekarbonisasi yang paling tepat adalah pengalihan dari sumber produksi energi berbasis fosil ke sumber produksi energi lain yang ramah lingkungan, seperti teknologi energi baru dan terbarukan (EBT). Adaptasi teknologi energi berkelanjutan ini akan memakan waktu tetapi berdampak positif pada keseimbangan ekologis dan keselamatan umat manusia (Lin et al. 2022).

Selanjutnya, regulasi di bidang energi telah diterbitkan, yang bertujuan tidak hanya untuk penyediaan energi tetapi juga energi yang rendah emisi, antara lain Peraturan Pemerintah N0. 79 tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) (Dewan Energi Nasional 2014), dan Peraturan

Presiden No. 22 tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) (Presiden RI 2017). Pada KEN tersebut disinggung mengenai tercapainya bauran Energi Primer yang optimal, dimana pada tahun 2025 peran Energi Baru dan Energi Terbarukan paling sedikit 23% dan pada tahun 2050 paling sedikit 31% sepanjang keekonomiannya terpenuhi (Dewan Energi Nasional 2014).

Untuk memenuhi target KEN ini, optimalisasi penerapan EBT harus terus digalakkan. Mengingat bahwa pembangkit EBT, khususnya PLTS dan PLTB, nilai LCOE-nya (Levelized Cost of Electricity) mengalami penurunan secara drastis. Data IRENA 2021 menunjukkan bahwa LCOE PLTS skala besar di 2020 lebih rendah 85% dari LCOE di tahun 2010. Begitu juga untuk PLTB onshore, turun 56% (IRENA 2021). Hal yang sama terjadi di Indonesia, pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) Terapung Cirata berkapasitas 145 MW, menurut PLN, memiliki biaya pokok produksi (BPP) hanya sebesar US\$5,8 sen per kWh (Ni Putu Eka Wiratmini 2020).

Sejalan dengan penurunan LCOE, penurunan CAPEX PLTS skala besar juga terlihat di berbagai negara. Secara global, CAPEX PLTS skala besar turun sebesar 79% pada tahun 2019, dibanding tahun 2010, yaitu dari 4702 USD(2019)/kW menjadi hanya 995 USD(2019)/kW (IRENA 2020). Namun PLT Surya dan PLT Bayu memerlukan kesiapan sistem untuk menjaga kontinuitas pasokan tenaga listrik, mengingat kedua jenis pembangkit EBT tersebut menghasilkan listrik secara intermiten. Untuk itu perlu didukung oleh cadangan energi baterai atau BESS (*Battery Energy Storage System*), digabung (*hybrid*) dengan EBT lain, atau didukung oleh PLT fosil. Selanjutnya, pembangkit EBT dengan ongkos rendah dan faktor kapasitasnya bagus, seperti PLT Air, PLT Minihidro, dan PLT Panas Bumi, umumnya terletak di daerah konservasi yang jauh dari pusat beban, sehingga membutuhkan waktu relatif lama dalam pembangunan, mulai dari perizinan, kendala geografis hingga keadaan kahar (*force majeure*) (Rully R. Ramli 2020). Terkait dengan aspek lingkungan dapat disampaikan bahwa jika proporsi pembangunan pembangkit dengan sumber energi baru terbarukan tercapai sesuai yang ditargetkan, maka intensitas emisi Gas Rumah Kaca (GRK) dari setiap kWh listrik akan berkurang dengan signifikan (PT.PLN (PERSERO) 2020).



Gambar 1. Komposisi Produksi Listrik Nasional Tahun 2020

Pada tahun 2020, produksi listrik nasional, baik on grid maupun off grid, total sebesar 291,96 TWh, dimana 18,17% diantaranya berasal dari pembangkit berbasis EBT (PLTA, PLTP, PLTBm, PLTS, PLTB, PLTBg, Cofiring) (KESDM 2021a). Sedangkan produksi listrik dari PLTU Batubara masih sangat dominan, sebesar 61,95%, diikuti kemudian oleh pembangkit berbahan bakar gas (17,56 %) dan

bbm (2,32%). Khusus pembangkit EBT jenis PLTS dan Bayu, kontribusinya masih sangat kecil, berturut turut hanya sebesar 0,06% dan 0,16% dari total produksi listrik nasional. Kontribusi terbesar adalah dari PLTA dan PLTP, masing-masing sebesar 8,32% dan 5,33%. Sedangkan pangsa produksi listrik nasional yang berasal dari pembangkit biomassa adalah sebesar 3,95% (KESDM 2021a). Namun pembangkit biomassa ini bersifat *off grid* dan tersebar di wilayah wilayah terpencil di seluruh pelosok Indonesia. Hal ini dapat dilihat pada gambar 1 di atas.

Tujuan dari paper ini adalah melakukan analisis dekarbonisasi sistem ketenagalistrikan nasional periode 2020 - 2050, serta pengaruhnya pada pengurangan emisi GRK, dan dalam kerangka KEN nomor 79 tahun 2014. Upaya dekarbonisasi tersebut dilakukan dengan mempertimbangkan teknologi rendah karbon seperti PLTS, PLTA, PLTA *pump storage*, PLTP, PLTBm dan PLTN.

1.1. Skenario

Dalam penelitian ini dianalisis dampak tiga skenario yaitu skenario Business As Usual (BAU), skenario Transisi Energi (TE), serta skenario penerapan pembangkit nuklir secara massif (NK). Skenario BAU merupakan kondisi tanpa intervensi baru dari Pemerintah yang berhubungan dengan kebijakan penerapan kompor induksi, pengembangan jaringan gas perkotaan (jargas) dan kendaraan listrik (Yudiartono, Windarta, and Adiarso 2022). Skenario TE memakai asumsi bahwa penerapan kompor induksi dan pengembangan jargas berdasarkan Peta Jalan Transisi Energi Menuju Karbon Netral tahun 2022 dari Kementerian ESDM (Kementerian ESDM 2021). Sedangkan asumsi jumlah kendaraan listrik mengikuti target kuantitatif pengembangan industri kendaraan bermotor nasional dari Kementerian Perindustrian (Direktur Jenderal Industri Logam, Mesin, Alat Transportasi, Dan Elektronika 2021),(Yudiartono, Windarta, and Adiarso 2022). Pertumbuhan kendaraan listrik setelah tahun 2035 mengikuti tren sebelumnya. Adapun skenario NK diterapkan untuk memenuhi kebutuhan tambahan konsumsi listrik karena penerapan kendaraan listrik dan kompor induksi, sekaligus menurunkan emisi GRK yang terjadi. Pada skenario TE maupun NK sangat mempertimbangkan capaian bauran energi primer berbasis EBT berdasarkan Kebijakan Energi Nasional (KEN) 79 tahun 2014 (Dewan Energi Nasional 2014).

1.2. Asumsi Makro

Penentuan asumsi pertumbuhan ekonomi nasional sangat mempertimbangkan asumsi dasar ekonomi makro jangka menengah tahun 2022-2024, IMF, World Bank, OECD dan ADB (Edi Hilmawan et al. n.d.). Sedangkan asumsi kunci pertumbuhan penduduk berdasarkan proyeksi penduduk Indonesia 2015-2045, hasil SUPAS 2015 (BPS RI 2018). Selain itu, asumsi perhitungan juga mengacu pada kebijakan energi yang telah ditetapkan Pemerintah antara lain KEN 2014 (Dewan Energi Nasional 2014), RUEN 2017 (Presiden RI 2017), RUPTL (2021-2030) (KESDM 2021b), peta jalan transisi energi menuju karbon netral untuk kebutuhan energi sektor rumah tangga dan sektor transportasi dari Kementerian ESDM (Kementerian ESDM 2021), asumsi penambahan kendaraan listrik berdasarkan target kuantitatif pengembangan industri kendaraan bermotor nasional dari Kementerian Perindustrian (Direktur Jenderal Industri Logam, Mesin, Alat Transportasi, Dan Elektronika 2021), serta mandatori BBN (KESDM 2015). Semua skenario mempunyai asumsi pertumbuhan penduduk dan pertumbuhan ekonomi selama periode 2020 - 2050 yang sama. Adapun data terkait penerapan kompor induksi dan pengembangan jargas berdasarkan Peta Jalan Transisi Energi Menuju Karbon Netral tahun 2022 dari Kementerian ESDM (Kementerian ESDM 2021). Terkait

penggunaan biomassa non komersial tidak dipertimbangkan dalam semua skenario. Pada tabel 1 ditunjukkan asumsi makro untuk setiap skenario.

Tabel 1.
 Asumsi Makro Untuk Tiap Skenario (Yudiartono, Windarta, and Adiarso 2022)

Keterangan	Satuan	Tahun				
		2020	2025	2030	2040	2050
Penduduk	Juta Jiwa	270,2	283,14	294,8	313,28	324,58
Pertumbuhan Penduduk	%/Tahun	1,16	0,94	0,81	0,54	0,3
Pertumbuhan PDB	%/Tahun	-2,07	5,17	5,5	5,5	4,5
Penjualan Mobil Listrik	BAU TE	Ribu Unit Ribu Unit	- 400	- 600	- 1500	- 2800
Penjualan Motor Listrik	BAU TE	Ribu Unit Ribu Unit	- 1760	- 2450	- 4375	- 7875
Komporsi Induksi	BAU TE	Juta RT Juta RT	0 8,2	0,3 18,2	0,5 38,2	1,2 48,2
Pembangkit	BAU	RUPTL (2021-2030) serta PLTN skala kecil (100 MW-1GW)				
	TE	KEN (PP 79 2014) serta PLTN skala besar (1 GW-4GW)				
	NK	KEN (PP 79 2014) serta PLTN skala besar (1 GW-25GW)				

2. Metodologi Penelitian

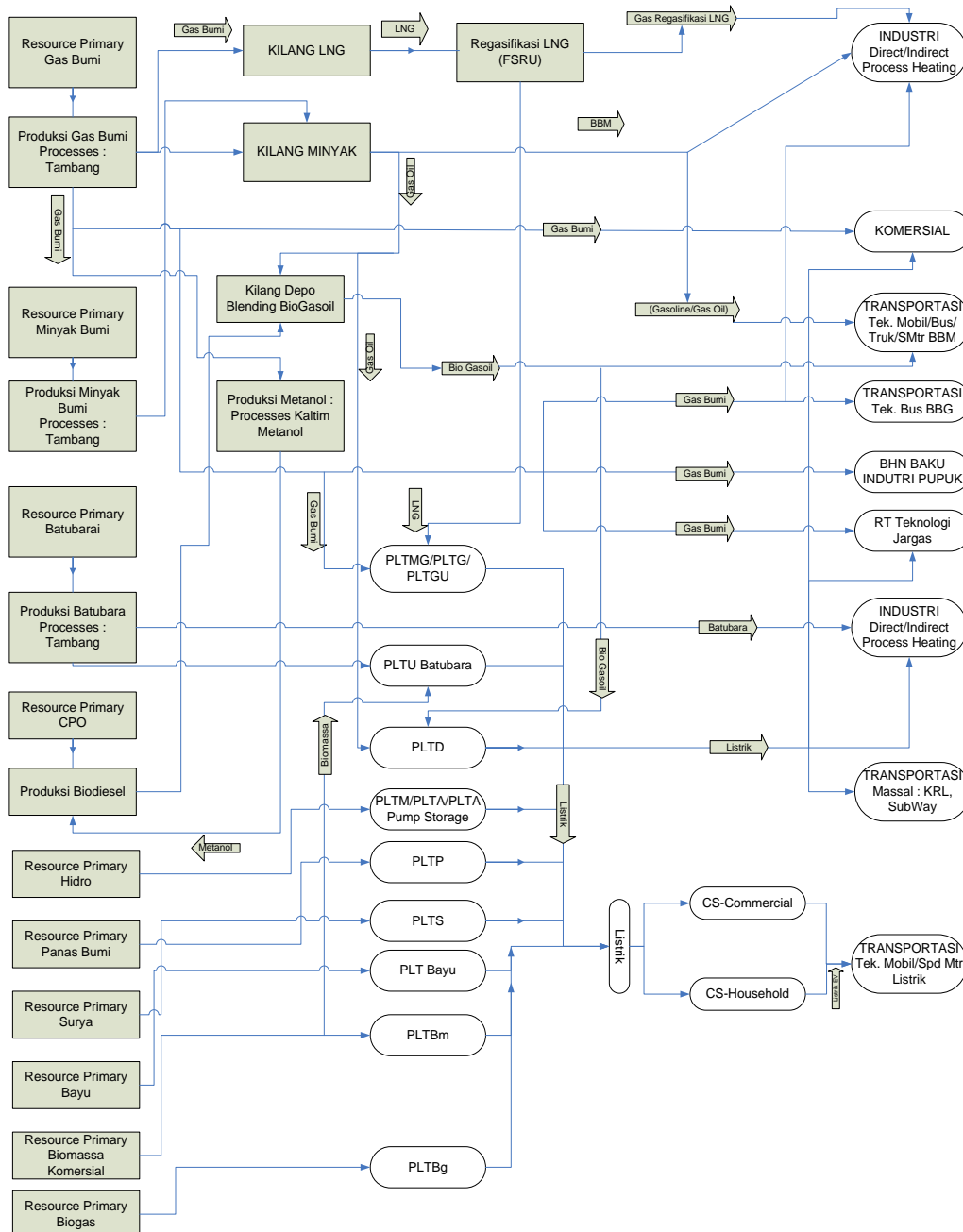
2.1. Model LEAP

Pada penelitian ini sektor energi di Indonesia dimodelkan dengan suatu perangkat lunak aplikasi yang bernama LEAP (*Low Emissions Analysis Platform*) (C. G. Heaps 2021). Dalam software LEAP disediakan 4 (empat) modul utama dan 3 (tiga) modul tambahan. Modul utama adalah modul-modul standar yang umum digunakan dalam pemodelan energi, yaitu: *Key Assumptions*, *Demand*, *Transformation*, dan *Resources*. Modul tambahan adalah pelengkap terhadap modul utama jika diperlukan, yaitu: *Statistical Differences*, *Stock Changes*, dan *Non Energy Sector Effects*. Khusus untuk modul *Transformation*, fungsinya adalah untuk menghitung pemasokan energi. Pasokan energi dapat terdiri atas produksi energi primer (gas bumi, minyak bumi, batubara, dsb.) dan energi sekunder (listrik, bahan bakar minyak, LPG, briket batubara, arang, dsb.). Susunan cabang dalam Modul *Transformation* sudah ditentukan strukturnya, yang masing-masing kegiatan transformasi energi terdiri atas *processes* dan *output*. Susunan modul tersebut sudah baku. LEAP akan mensimulasikan model berdasar susunan tersebut, dari atas ke bawah. Simulasi LEAP bersifat *straight forward*, tidak ada *feed back* antara permintaan dan penyediaan energi. Permintaan energi dianggap selalu dipenuhi oleh pemasokan energi yang berasal dari transformasi energi domestik maupun impor energi (C. Heaps 2020),(Bappenas 2014).

2.2. Reference Energy System

Struktur model LEAP mengikuti sistem dan arus energi yang terdapat dalam *Reference Energy System* (RES) seperti yang terdapat dalam gambar 2 dibawah ini. Terlihat bahwa sumber daya energi primer yang mencakup energi fosil maupun EBT diekstraksi untuk dikirim ke teknologi proses

(seperti kilang minyak) dan teknologi konversi (pembangkit listrik). Kilang minyak menghasilkan energi final berupa BBM, sedangkan pembangkit listrik menghasilkan energi listrik. Kedua jenis energi final ini merupakan input untuk kebutuhan energi per sektor (rumah tangga, komersial, industri, transportasi).



Gambar 2. Reference Energy System (RES) Penyediaan Energi

Selain itu ada juga energi primer yang langsung digunakan di sektor kebutuhan energi, seperti gas bumi dan batubara. Gas bumi merupakan bahan bakar yang digunakan di sektor rumah tangga, transportasi maupun sebagai bahan baku industri pupuk, sedangkan batubara dimanfaatkan sebagai bahan bakar boiler di sektor industri.

Terkait peran infrastruktur *charging station* (CS) untuk mendorong penetrasi kendaraan listrik, diasumsikan ada dua jenis CS, yaitu CS komersial sebagai infrastruktur pengisian umum dan CS rumah tangga untuk pengisian kendaraan listrik di rumah (ditunjukkan pada Gambar 2). Untuk asumsi pangsa kendaraan listrik yang menggunakan CS diatur dalam *Key Assumptions*.

2.3. Analisis Penyediaan Energi

Semua teknologi proses dan konversi pada sisi penyediaan seperti pembangkit listrik dan kilang minyak dimungkinkan untuk ekspansi kapasitas dan process dispatch. Selain itu model penyediaan energi juga dilengkapi dengan ekspor, impor, dan produksi tambang (batubara, gas alam dan minyak bumi) (BPPT 2020). Process dispatch pada pembangkit listrik yang mempunyai keragaman jenis teknologi dan jenis energi primer menerapkan metode optimasi. Teknologi konversi lainnya seperti kilang minyak, kilang LNG, dan kilang LPG hanya menerapkan metode simulasi. Teknik simulasi hanya didasarkan pada peningkatan kapasitas untuk memenuhi kebutuhan dan penerapan pengembangan kapasitas berdasarkan suatu roadmap yang sudah ada dalam kebijakan pemerintah (BPPT 2020).

Kapasitas pembangkit listrik dapat dihitung secara endogenous untuk mempertahankan nilai *planning reserve margin* (PRM) yang telah ditentukan. Perhitungan kapasitas pembangkit diawali dengan menghitung nilai kapasitas yang ada dengan persamaan 1 (Suhono, Sarjiya, and Hadi 2019).

$$C_{BA} = (C_{EX} + CN_{EN}) \times C_{value} \quad (1)$$

Dimana :

C_{BA} : kapasitas awal (MW),

C_{EX} : kapasitas exogenous (MW),

CN_{EN} : kapasitas endogenous yang telah ditambahkan sebelumnya (MW),

C_{value} : persentase nilai kapasitas aktual (MW).

Sedangkan kapasitas yang dibutuhkan untuk memenuhi beban puncak dihitung dengan menggunakan persamaan 2 (Suhono, Sarjiya, and Hadi 2019).

$$C_{peak} = \frac{D}{LF \times 8760 \left(\frac{\text{jam}}{\text{tahun}} \right)} \quad (2)$$

Dimana :

C_{peak} : kapasitas untuk memenuhi beban puncak (MW)

D : permintaan energi listrik (MWh),

LF : faktor beban sistem.

PRM sebelum ada penambahan kapasitas secara endogenous dihitung berdasarkan persamaan 3 (Suhono, Sarjiya, and Hadi 2019).

$$PRM_{BA} = \frac{C_{BA} - C_{peak}}{C_{peak}} \quad (3)$$

Dimana PRM_{BA} adalah PRM sebelum ada penambahan kapasitas. Selanjutnya, kapasitas pembangkit listrik yang diperlukan secara endogenous ditentukan dengan persamaan 4 (Suhono, Sarjiya, and Hadi 2019).

$$C_{ENA} = (PRM - PRM_{BA}) \times C_{peak} \quad (4)$$

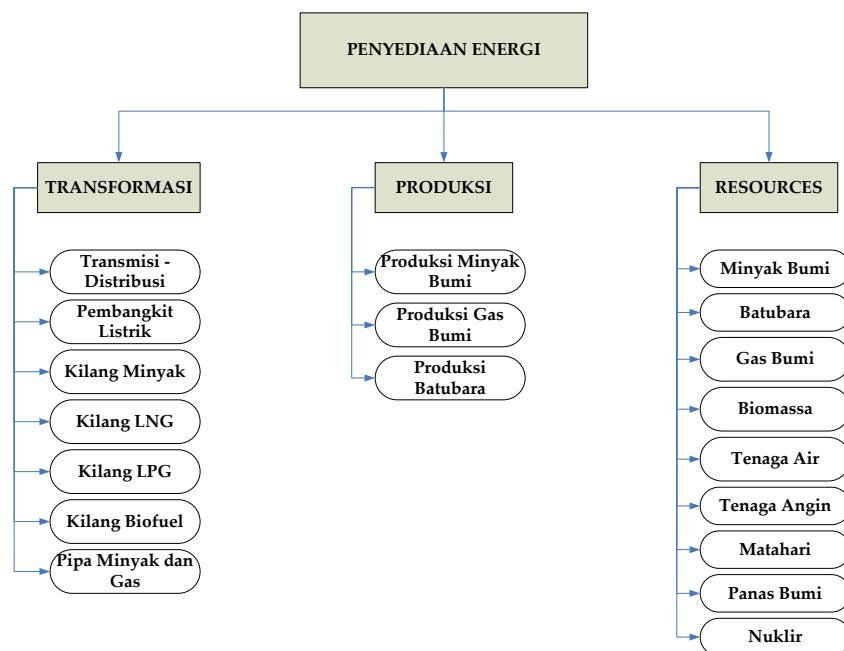
Dimana C_{ENA} adalah kapasitas pembangkit listrik yang harus ditambahkan untuk mempertahankan PRM pada nilai yang sudah ditentukan. Pada akhirnya, LEAP menghitung kapasitas pembangkit listrik yang diperlukan untuk setiap proses pembangkit listrik.

Dalam skenario optimasi, pembangkit listrik di dispatch berdasarkan *running cost*. Dengan metode dispatch ini, modul pembangkit listrik harus mengikutsertakan *load duration curve* (LDC). Selanjutnya, LEAP akan mensimulasikan dispatch setiap jenis proses pembangkit listrik baik untuk memenuhi kebutuhan energi listrik yang ditentukan oleh LDC maupun kebutuhan energi listrik secara keseluruhan. *Running cost* ditentukan dengan persamaan 5 (Suhono, Sarjiya, and Hadi 2019).

$$Running\ Cost_i = VariableOMCost_i + \frac{FuelCost_i}{Efficiency_i} \quad (5)$$

3. Struktur Model Penyediaan Energi

Model penyediaan energi di perangkat lunak LEAP (*Low Emissions Analysis Platform*) dapat dibagi menjadi 3 bagian, transformasi, produksi dan resources (lihat gambar 3). Modul Transformasi adalah untuk meletakkan model pemasokan energi, meliputi: produksi energi dan penyalurannya.



Gambar 3. Pemodelan Penyediaan Energi (Zaman and Yong 2021)

Pemasokan energi meliputi energi primer dan energi sekunder. Pemasokan energi dalam modul transformasi ini akan secara otomatis memenuhi permintaan energi, baik permintaan energi dari

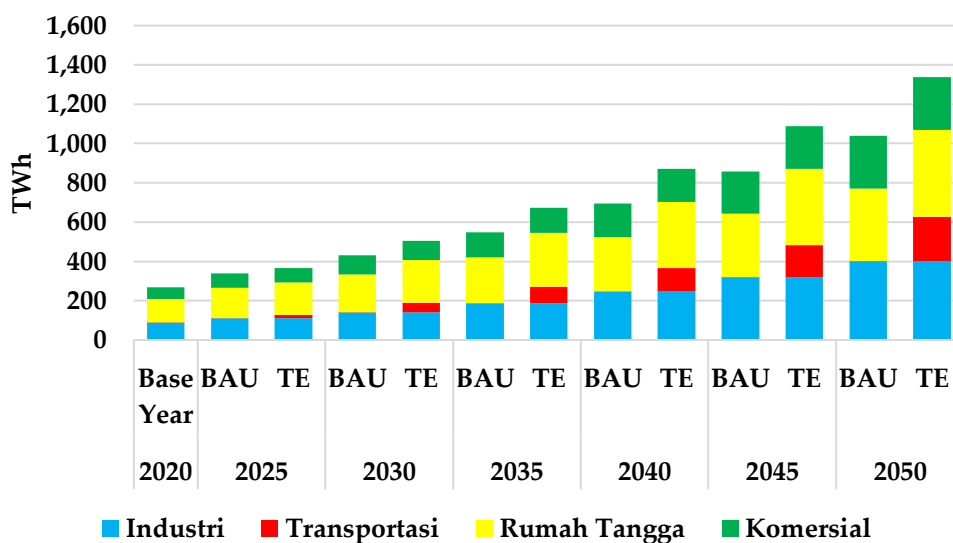
modul demand maupun target ekspor energi. Susunan modul transformasi adalah berurut dari atas ke bawah berdasarkan urutan kedekatannya dengan sisi permintaan energi. Sebagai contoh transmisi dan distribusi listrik harus ditempatkan di atas pembangkitan listrik, pembangkitan listrik harus diletakkan di atas kilang minyak (apabila pembangkit listrik menggunakan BBM), dst. Modul Transformasi terdiri atas dua cabang, yaitu: *Processes* dan *Output Fuels*. Pada pembangkitan listrik, *Processes* yang berisi jenis pembangkit dapat terdiri atas berbagai jenis pembangkit, dengan *Output Fuels* yang sama yaitu listrik. Pada kilang minyak, input kilang hanya minyak mentah (dan gas bumi dalam persentase yang kecil), tetapi outputnya dapat berupa berbagai jenis produk kilang (Winarno 2010).

Resources merupakan *Tree* terakhir dalam LEAP. Cabang-cabang dalam *Tree Resources* ini muncul secara otomatis apabila suatu jenis energi disebutkan dalam *Tree Demand* atau *Tree Transformation*. *Tree Resources* terdiri atas dua cabang, yaitu primer dan Sekunder. Cabang Primer berisi daftar energi primer, yang dibagi menjadi energi tak terbarukan dan terbarukan. Dalam cabang Primer ini terdapat data cadangan dan potensi energi primer. Dalam cabang Sekunder, tidak ada data yang perlu diisikan.

4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Proyeksi Kebutuhan Listrik Nasional

Pada tahun 2020 kebutuhan tenaga listrik nasional adalah sebesar 268 TWh, dimana sektor rumah tangga mendominasi dengan pangsa lebih dari 44%. Sedangkan sektor industri mempunyai pangsa dikisaran 33%, diikuti oleh sektor komersial (22%), dan sektor transportasi (0,1%). Selama periode 2020 s.d. 2050, kebutuhan tenaga listrik total per sektor, untuk skenario BAU dan TE diperkirakan akan terus meningkat secara signifikan hingga berturut turut akan mencapai 1.039,5 TWh dan 1.337,1 TWh pada tahun 2050 atau tumbuh masing masing sebesar 4,6% per tahun dan 5,5% per tahun (lihat gambar 4).



Gambar 4. Proyeksi Kebutuhan Listrik Periode 2020-2050

Tingginya pertumbuhan kebutuhan tenaga listrik, sejalan dengan penambahan jumlah penduduk, pertumbuhan perekonomian yang cukup signifikan, perkembangan industri, kemajuan

teknologi, peningkatan target rasio elektrifikasi hingga mencapai 100% pada tahun 2025, serta meningkatnya standar kenyamanan hidup masyarakat luas.

Sektor transportasi, pada skenario BAU, adalah konsumen listrik terkecil dengan pangsa sekitar 0,1%. Masih kecilnya penggunaan listrik di sektor transportasi ini karena hanya digunakan pada angkutan kereta api, khususnya di wilayah Jabodetabek. Namun, pada skenario TE, kebutuhan listrik melonjak tinggi, dengan kebutuhan listrik mencapai 660,7 TWh pada tahun 2050, atau tumbuh sebesar 24,8%, karena adanya program akselerasi penerapan kendaraan listrik, baik untuk sepeda motor maupun kendaraan roda empat.

Kemudian, terkait kebutuhan listrik per kapita, pada tahun 2020 hanya sebesar 991,9 kWh per kapita, tiga puluh tahun kemudian diprediksi naik menjadi 3.202,6 kWh per kapita untuk skenario BAU dan 4119,6 kWh/kapita pada skenario TE. Kebutuhan listrik per kapita tersebut lebih rendah dari target KEN (PP 79/2014), karena adanya perbedaan dari sisi asumsi makro seperti pertumbuhan ekonomi dan pertumbuhan penduduk, serta perbedaan asumsi teknis ketenagalistrikan, seperti faktor kapasitas pembangkit dan susut jaringan di transmisi dan distribusi listrik.

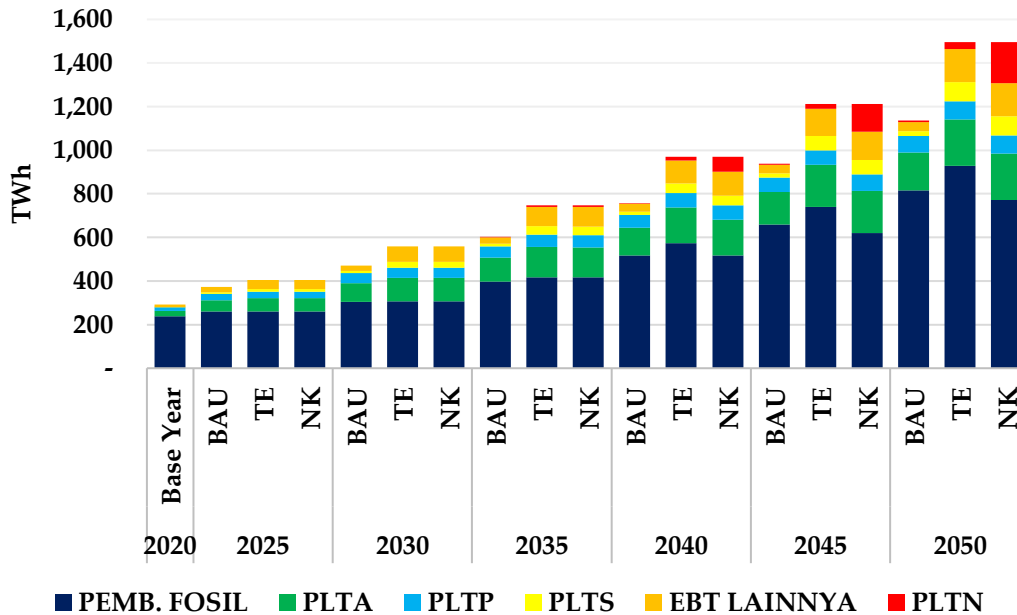
4.2. Proyeksi Produksi Listrik Nasional

Pada tahun 2020 produksi listrik nasional mencapai 291,9 TWh, 82% diantaranya berasal dari pembangkit fosil dan sisanya dari pembangkit listrik berbasis EBT (18%). Pada skenario BAU, selama kurun waktu 30 tahun (2020-2050), produksi listrik nasional diperkirakan mengalami kenaikan dengan laju pertumbuhan rata-rata sebesar 4,6% per tahun, mencapai 1136,1 TWh pada akhir periode studi, dimana 72% berasal dari pembangkit fosil dan 28% dari pembangkit EBT. Pada skenario TE dan NK, produksi listrik tersebut mempunyai laju pertumbuhan yang sama, sebesar 5,6% per tahun, atau mencapai 1.494,76 TWh tahun 2050, namun dengan konfigurasi berbeda. Pada skenario TE, produksi listrik dari pembangkit fosil masih mendominasi dengan pangsa sebesar 62% (927,83 TWh) dan sisanya dari pembangkit EBT, termasuk nuklir, dengan pangsa 38% (566,93 TWh). Adapun pada skenario NK, pangsa produksi listrik dari pembangkit listrik EBT naik tajam, menjadi 48% (722,33 TWh), dengan 12% diantaranya berasal dr nuklir (186,15 TWh).

Pada tahun 2025, untuk skenario TE, saat populasi mobil listrik dan motor listrik diperkirakan berturut-turut sebesar 400 ribu unit dan 1760 ribu unit, serta penerapan kompor induksi bagi 8,2 juta RT, akan menyebabkan total produksi listrik naik sebesar 9% menjadi 405,03 TWh, dibanding skenario BAU yang sebesar 372,74 TWh. Produksi listrik dari EBT pada skenario TE tersebut adalah sebesar 145,35 TWh (35,9%), terdiri dari PLTA dan PLTA pumped storage sebesar 62,24 TWh, PLTS sebesar 12,26 TWh, PLTP sebesar 29,76 TWh dan EBT lainnya sebesar 41,09 TWh. EBT lainnya terdiri dari PLTBiomassa (PLTBm), dan ini paling dominan, PLTBayu, PLTBiogas dan PLTSampah. Khusus PLTBm, sebagian besar pembangkit skala kecil dan berada di wilayah terpencil serta bersifat off grid.

Seperti telah disinggung sebelumnya, pada tahun 2050 diprediksi total produksi listrik skenario TE dan NK akan mencapai 1.494,76 TWh, lebih tinggi 32% dibanding skenario BAU yang hanya sebesar 1.136,06 TWh, karena penetrasi kendaraan bermotor listrik meningkat menjadi 2800 ribu unit mobil listrik dan 7875 ribu unit motor listrik, serta 48,2 juta RT yang memakai kompor induksi. Produksi listrik dari pembangkit berbasis EBT, pada skenario TE, adalah sebesar 566,93 TWh (37,93%), terdiri dari PLTA dan PLTA pumped storage (213,17 TWh), PLTS (87,6 TWh), PLTP (83,22 TWh), EBT lainnya (153,16 TWh) dan sisanya dari PLTN (29,78 TWh). Selanjutnya, selama rentang waktu 30 tahun, laju pertumbuhan rata-rata produksi listrik EBT tersebut mencapai 6,2% per tahun untuk

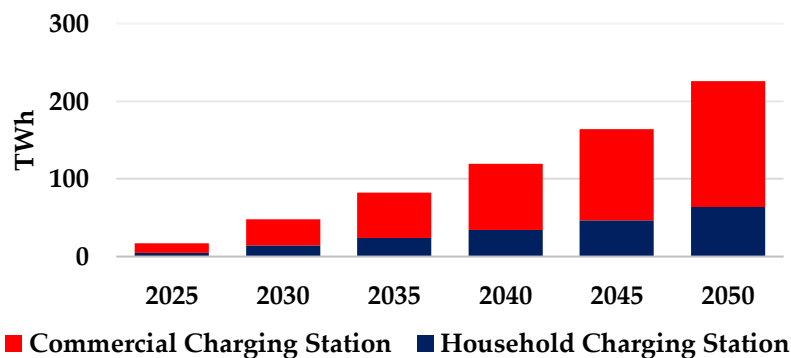
skenario BAU, serta 8,2% per tahun dan 9,1% per tahun berturut turut untuk skenario TE dan NK. Pada skenario NK ini produksi listrik EBT mempunyai laju pertumbuhan tertinggi karena adanya penerapan PLTN secara massif, dimana pada tahun 2050 diperkirakan akan mencapai 25 GW dan dapat memproduksi listrik sebesar 186,15 TWh. Secara lebih jelas, proyeksi produksi listrik pembangkit fosil dan EBT ditunjukkan pada gambar 5 di bawah ini.



EBT lainnya : PLTBm, PLTB, PLTBg, PLTSa

Gambar 5. Proyeksi Produksi Listrik Pembangkit Listrik Fosil dan EBT

Sementara itu, penerapan kendaraan listrik secara massif di sektor transportasi akan meningkatkan kebutuhan tenaga listrik secara signifikan. Untuk memasok energi listrik ke baterai mobil atau sepeda motor, dibutuhkan stasiun pengisian kendaraan listrik umum (*commercial charging station*) serta pengisian daya listrik yang dilakukan di rumah (*household charging station*).



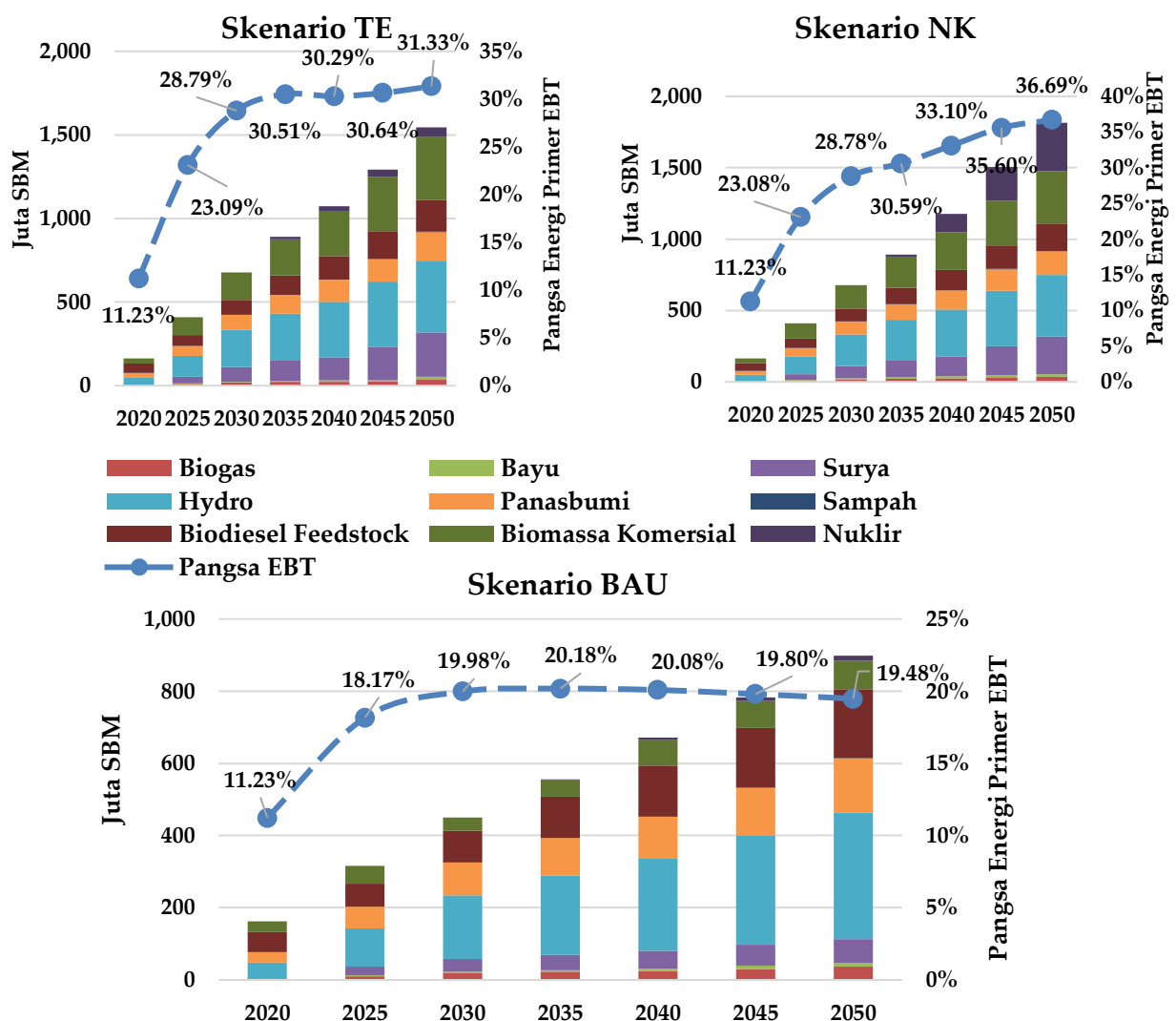
Gambar 6. Kebutuhan Tenaga Listrik Untuk Mendukung Kendaraan Listrik

Pada tahun 2025, tenaga listrik yang disalurkan dari kedua jenis *charging station* ini adalah sebesar 17,06 TWh, naik lebih dari 13 kali pada tahun 2050 menjadi 225,99 TWh, dimana 72% berasal

dari *commercial charging station* dan sisanya sebesar 28% dari *household charging station*. Hal ini ditunjukkan pada gambar 6 di atas.

4.3. Proyeksi Penyediaan EBT dan Rasio Kontribusi EBT

Dalam rangka mengejar kenaikan angka bauran EBT, Pemerintah telah melaksanakan berbagai strategi diantaranya merilis Peraturan Presiden (PERPRES) Nomor 112 Tahun 2022 tentang percepatan pengembangan energi terbarukan untuk penyediaan tenaga listrik (Presiden RI 2022), Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN) (Dewan Energi Nasional 2014), memastikan proyek EBT berjalan sesuai Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL), strategi penciptaan pasar, seperti membumikan PV rooftop hingga pada tataran rumah tangga, memudahkan akses kepada pendanaan yang kompetitif, dukungan kebijakan dan perbaikan tata kelola dalam rangka percepatan proyek EBT, serta menggerakkan seluruh pemangku kepentingan (Kusdiana 2021).



Gambar 7. Penyediaan EBT Dan Rasio Kontribusi EBT

Sampai dengan tahun 2020 Bauran Energi Primer EBT baru mencapai 11,23% (KESDM 2021a), masih memerlukan upaya yang konkrit dan terencana untuk mencapai target Bauran EBT sebesar 23% di tahun 2025 maupun 31% pada 2050. Berbeda dengan tahun-tahun sebelumnya, bauran EBT tahun 2020 telah memperhitungkan tambahan dari 7 Pembangkit Listrik Tenaga Uap Batubara (PLTUB) *co-firing* yang telah beroperasi secara komersial, yakni PLTU Paiton, Ciranjang, Ketapang, Sanggau, Pacitan, Suralaya dan Anggrek. Metode *co-firing* pada PLTUB dilakukan dengan memanfaatkan biomassa hingga 5% sebagai substitusi (campuran) batubara (Kusdiana 2021).

Pada gambar 7 ditunjukkan rasio kontribusi EBT terhadap total penyediaan energi primer. Proyeksi bauran EBT pada tahun 2025 dan 2050, untuk skenario BAU, pangsanya berturut turut sebesar 18,17% dan 19,48%, jauh lebih rendah dari target KEN. Namun hal yang berbeda terjadi pada skenario TE, dimana kontribusi EBT mencapai 23,09% (2025) dan 31,33% (2050), sesuai dengan target KEN. KEN ini meliputi ketersediaan energi untuk kebutuhan nasional, prioritas pengembangan energi, pemanfaatan sumber daya energi nasional, dan cadangan penyangga energi nasional (Dewan Energi Nasional 2014). Selanjutnya dari sisi prakiraan realisasi penggunaan energi primer jenis EBT, untuk skenario TE paling tinggi didominasi oleh hidro dan biomassa, disusul kemudian dengan biodiesel, panas bumi, serta surya. Pemanfaatan biomassa adalah untuk PLTBm dan *cofiring* PLTUB. Adapun pada skenario NK, selain kelima jenis EBT tersebut, terdapat nuklir yang cukup mendominasi prakiraan energi primer EBT, khususnya periode 2040 – 2050. Sedangkan pada skenario BAU, jenis EBT yang mendominasi adalah hidro, panas bumi, biodiesel dan biomassa.

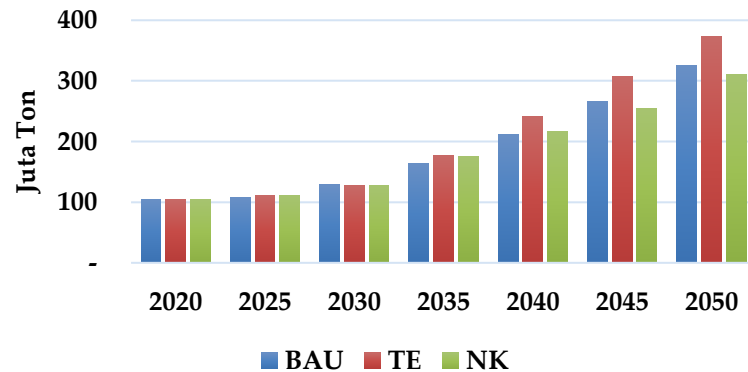
Pada skenario NK, dimana mulai tahun 2035 penggunaan batubara untuk PLTUB disubstitusi oleh energi nuklir, dengan cara menerapkan PLTN secara massif, mencapai 25 GW pada tahun 2050, akan menyebabkan bauran energi primer berbasis EBT naik signifikan mencapai 36,69%. PLTN ini merupakan bagian dari EBT, serta dapat bersinergi dengan sumber energi lain, khususnya energi terbarukan. Selain itu, teknologi PLTN terkini menjawab prasyarat dalam Kebijakan Energi Nasional (KEN), yaitu keselamatan yang ketat dan mengurangi emisi karbon (Antariksawan 2020).

4.4. Konsumsi Bahan Bakar Fosil Jenis Batubara

Dalam dua dekade terakhir, masalah lingkungan yang disebabkan oleh konsumsi energi telah menjadi perhatian banyak orang. Secara khusus, energi fosil batubara dan BBM, telah meningkatkan emisi CO₂ dan polutan lainnya, serta menyebabkan kerusakan besar pada lingkungan dan membawa tantangan besar terhadap pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan (Wang and Jia 2022). Batubara, sejauh ini, merupakan penyebab utama emisi CO₂ dan menyumbang hampir tiga perempat dari peningkatan emisi di sektor energi (IEA 2022). Disisi lain, jenis energi nuklir tidak memancarkan banyak polusi saat beroperasi dan memiliki sangat sedikit polusi selama keberadaan operasionalnya. Pembangkit listrik tenaga nuklir juga hemat biaya dan mendukung pasokan energi secara aman, serta menjaga stabilitas ekonomi dan lingkungan dari perubahan iklim, dan pada akhirnya membuat negara *climate-resilient* (Usman and Radulescu 2022). Karena itu pada skenario NK terdapat penerapan PLTN secara massif, dalam rangka menekan konsumsi batubara untuk pembangkit listrik.

Pada tahun 2050 konsumsi batubara pada skenario TE sebesar 373,13 juta ton, meningkat sekitar 14% dibandingkan dengan skenario BAU. Peningkatan konsumsi batubara terjadi karena adanya program kendaraan listrik di sektor transportasi dan migrasi kompor LPG ke kompor induksi di sektor rumah tangga. Namun pada skenario NK, dimana penerapan PLTN dilakukan secara massif mulai tahun 2035, konsumsi batubara menjadi 309,93 juta ton, turun cukup signifikan, berturut-turut

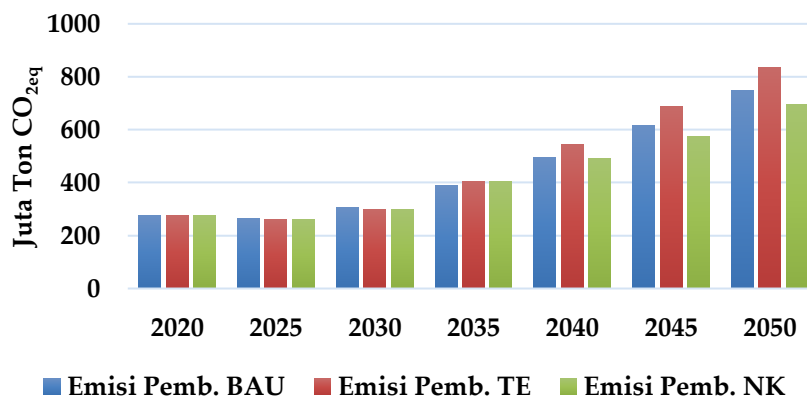
sebesar 5% dan 17% dibandingkan dengan skenario BAU dan skenario TE. Dari sisi besaran kapasitas terpasang, PLTN diproyeksikan akan mencapai 25 GW pada tahun 2050 untuk skenario NK, 4 GW untuk skenario TE dan 1 GW untuk skenario BAU.



Gambar 8. Proyeksi Kebutuhan Batubara Untuk Pembangkit Listrik Pada Tiga Skenario

4.5. Emisi GRK Pembangkit Tenaga Listrik

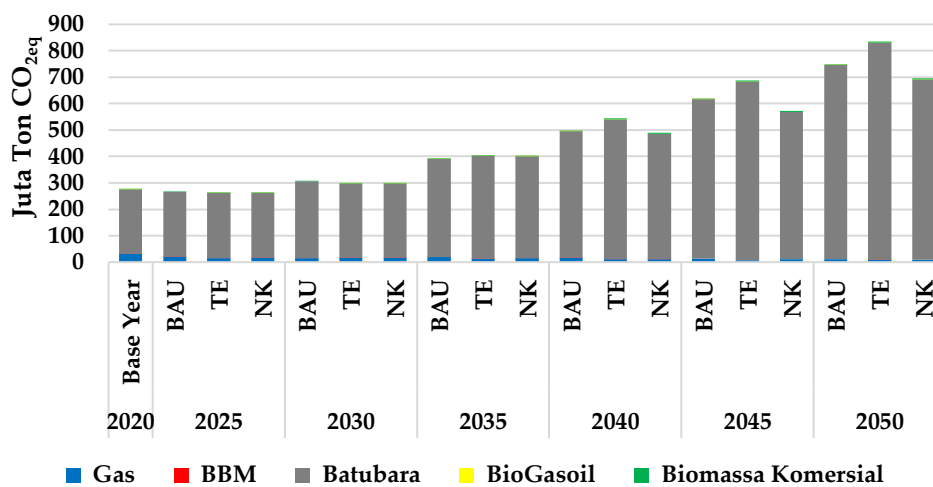
Sumber emisi dari pembakaran bahan bakar dikelompokkan menjadi lima kategori, yaitu industri produsen energi, industri manufaktur dan konstruksi, transportasi, sektor lainnya, dan lain-lain. Masing-masing kategori dibedakan lagi menjadi beberapa subkategori. Kegiatan pembakaran bahan bakar pada kategori industri produsen energi dikelompokkan menjadi tiga subkategori, yaitu pembangkit listrik, kilang minyak, dan produksi bahan bakar padat dan industri energi lainnya. Namun pada paper ini yang dibahas hanya subkategori pembangkit listrik. Selanjutnya, kategori ini merupakan kategori yang paling banyak mengonsumsi bahan bakar karena dibutuhkan masukan (input) bahan bakar dalam jumlah besar untuk memproduksi energi. Data aktivitas yang diperlukan untuk menghitung emisi GRK pada subkategori pembangkit listrik adalah volume konsumsi bahan bakar di pembangkit listrik, baik pembangkit listrik milik Perusahaan Listrik Negara (PLN) maupun Independent Power Producer (IPP) (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral 2020).



Gambar 9. Emisi GRK Pembangkit Tenaga Listrik Untuk Tiap Skenario

Pada gambar 9 ditunjukkan emisi GRK yang timbul dari kegiatan pembakaran bahan bakar kategori industry produsen energi untuk subkategori pembangkit listrik. Pada tahun 2050, untuk

skenario TE, emisi GRK yang terjadi adalah sebesar 835,37 juta metric ton CO_{2eq}, naik sekitar 12% dibanding dengan skenario BAU yang sebesar 747,48 juta metric ton CO_{2eq}. Kenaikan emisi ini terjadi karena adanya tambahan pembangkit batubara, untuk memenuhi kebutuhan daya listrik di sektor transportasi dan rumah tangga, karena adanya penerapan kendaraan listrik dan kompor listrik secara massif. Kemudian, hal yang berbeda terjadi pada skenario NK. Untuk menekan emisi GRK yang timbul, penerapan PLTN dilakukan secara besar-besaran, hingga kapasitas terpasang mencapai 25 GW pada tahun 2050. Hal ini menyebabkan emisi GRK turun berturut turut sebesar 7% dan 17% dibanding dengan skenario BAU dan skenario TE. Berikutnya, pada gambar 10 diperlihatkan emisi GRK di pembangkit tenaga listrik per jenis bahan bakar. Terlihat dengan jelas bahwa emisi GRK dr bahan bakar jenis batubara sangat mendominasi, berkisar 88% sampai dengan 98% dari total emisi GRK pembangkit fosil. PLTN baru mulai dipertimbangkan tahun 2035, karena itu pada tahun 2025, emisi pada skenario NK hampir sama dengan skenario TE. Namun pada tahun 2050, keberadaan PLTN dalam skala besar sangat berpengaruh untuk menekan emisi GRK. Pada skenario NK, dimana PLTN diterapkan hingga 25 GW, emisi GRK dari bahan bakar batubara adalah sebesar 681,94 juta metric ton CO_{2eq}, turun masing-masing sebesar 16,9% dan 7,3% bila dibandingkan dengan skenario TE (821,02 juta metric ton CO_{2eq}) dan skenario BAU (735,36 juta metric ton CO_{2eq}).



Gambar 10. Emisi GRK Pembangkit Tenaga Listrik Per Jenis Bahan Bakar

5. Kesimpulan

Proyeksi bauran EBT pada tahun 2025 dan 2050, untuk skenario BAU, pangsaanya berturut turut sebesar 18,17% dan 19,48%, jauh lebih rendah dari target Kebijakan Energi Nasional (KEN) tahun 2014. Namun hal yang berbeda terjadi pada skenario TE, dimana kontribusi EBT mencapai 23,09% (2025) dan 31,33% (2050), sesuai dengan target KEN. Pada skenario NK, untuk tahun 2050, bauran energi primer berbasis EBT naik signifikan menjadi 36,69%, karena penggunaan batubara untuk PLTUB disubstitusi oleh energi nuklir dalam skala besar. Dengan demikian, pada skenario TE dan NK telah dilakukan proses dekarbonisasi ketenagalistrikan melalui penerapan teknologi rendah karbon seperti PLTS, PLTA, PLTA *pumped storage*, PLTBm, PLTP, dan PLTN.

Pada tahun 2050, untuk skenario TE, bauran energi primer EBT sudah sesuai target KEN. Namun penggunaan batubara masih dominan, yaitu sebesar 373,13 juta ton. Pada skenario NK,

dimana kapasitas terpasang PLTN mencapai 25 GW, konsumsi batubara menjadi 309,93 juta ton, turun cukup tinggi, berturut-turut sebesar 5% dan 17% dibandingkan dengan skenario BAU dan skenario TE. Pada tahun 2050 tersebut, untuk skenario TE, emisi GRK yang terjadi adalah sebesar 835,37 juta metric ton CO_{2eq}, naik sekitar 12% dibanding dengan skenario BAU yang sebesar 747,48 juta metric ton CO_{2eq}. Hal yang berbeda terjadi pada skenario NK. Untuk menekan emisi GRK yang timbul, penerapan PLTN dilakukan secara besar-besaran. Hal ini menyebabkan emisi GRK turun signifikan, masing-masing sebesar 7% dan 17% dibanding dengan skenario BAU dan skenario TE.

Daftar Pustaka

- Antariksawan, Anhar Riza. 2020. "Nuklir Dalam Kebijakan Bauran Energi." *Energy Public Discussion Series, DPR RI*.
- Bappenas. 2014. "Kajian Pengembangan LEAP Dalam Mendukung Perencanaan Energi."
- — —. 2022. "Indonesia Green Growth Program - Diskusi NDC Dalam Upaya Mengurangi Emisi Nasional." <http://greengrowth.bappenas.go.id/diskusi-ndc-dalam-upaya-mengurangi-emisi-nasional/> (December 23, 2022).
- BPPT. 2020. PPIPE dan BPPT *Indonesia Energy Outlook 2020 - Special Edition Dampak Pandemi Covid-19 Terhadap Sektor Energi Di Indonesia*. https://www.researchgate.net/publication/343903321_OUTLOOK_ENERGI_INDONESIA_2020_Dampak_Pandemi_COVID-19_terhadap_Sektor_Energi_di_Indonesia.
- BPS RI. 2018. *Proyeksi Penduduk Indonesia 2015-2045 Hasil SUPAS 2015*.
- Dewan Energi Nasional. 2014. "PP No. 79 Tahun 2014: Kebijakan Energi Nasional." : 1–36.
- Direktur Jenderal Industri Logam, Mesin, Alat Transportasi, Dan Elektronika, Kemenperin. 2021. "Pengembangan Industri Kendaraan Bermotor Listrik Berbasis Baterai (KBLBB)."
- Edi Hilmawan, Ira Fitriana, Agus Sugiyono, and Adiarso, eds. *Outlook Energi Indonesia 2021*. Jakarta: Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi (PPIPE) , BPPT.
- Heaps, C.G. 2021. "LEAP: The Low Emissions Analysis Platform. [Software Version: 2020.1.47]." *Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA*. <https://leap.sei.org> (February 10, 2021).
- Heaps, Charles. 2020. *Training Exercises - Low Emissions Analysis Platform (LEAP)*. Somerville, USA: Stockholm Environment Institute.
- IEA. 2022. *An Energy Sector Roadmap to Net Zero Emissions in Indonesia*. France: Directorate of Sustainability, Technology and Outlooks International Energy Agency. <http://www.iea.org/>.
- IRENA. 2020. International Renewable Energy Agency *Renewable Power Generation Costs in 2019*. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Jan/IRENA_2017_Power_Costs_2018.pdf.
- — —. 2021. *Irena World Energy Transitions Outlook*. <https://irena.org/publications/2021/March/World-Energy-Transitions-Outlook>.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. 2020. "Inventarisasi Emisi GRK Bidang Energi." *Inventarisasi Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Energi Tahun 2020*: 41. <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-inventarisasi-emisi-gas-rumah-kaca-sektor-energi-tahun-2020.pdf>.
- Kementerian ESDM. 2021. "Peta Jalan Transisi Energi Menuju Karbon Netral."
- KESDM. 2015. "Permen ESDM No. 12/2015 Ttg Penyediaan, Pemanfaatan, Dan Tata Niaga BBN (Biofuel) Sbg Bahan Bakar Lain."
- — —. 2021a. *Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia 2020*. eds. Agus C. Adi and Farida Lasnawatin. Jakarta: Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia.
- — —. 2021b. "Kepmen ESDM No. 188.K/HK.02/MEM.L/2021 Ttg Pengesahan RUPTL PT. PLN (Persero) 2021-2030." <https://web.pln.co.id/stakeholder/ruptl>.

- Kusdiana, Dadan. 2021. *Laporan Kinerja Ditjen EBTKE Tahun 2020*. Jakarta.
- Lin, Chia-yang et al. 2022. "Factors Influencing the Sustainable Energy Technologies Adaptation in ASEAN Countries." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 53(PC): 102668. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102668>.
- Ministry of Finance. 2022. "CIF Accelerating Coal Transition (ACT): Indonesia Country Investment Plan (IP)." (October).
- Ni Putu Eka Wiratmini. 2020. "PLN : Biaya Produksi Pembangkit Energi Terbarukan Makin Murah." <https://ekonomi.bisnis.com/read/20200123/44/1193267/pln-biaya-produksi-pembangkit-energi-terbarukan-makin-murah> (September 22, 2021).
- Presiden RI. 2016. "UU RI Nomor 16 Tahun 2016 Ttg Pengesahan Paris Agreement To The United Nations Framework Convention On Climate Change."
- — —. 2017. "Perpres 22 Tahun 2017 Tentang Rencana Umum Energi Nasional."
- — —. 2022. "Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 112 Tahun 2022 Tentang Percepatan Pengembangan Energi Terbarukan Untuk Penyediaan Tenaga Listrik."
- PT.PLN (PERSERO). 2020. *Mengawal Pemulihan Ekonomi, Mencapai Tujuan Keberlanjutan*. Jakarta.
- Rully R. Ramli. 2020. "Ini Hambatan Pengembangan Pembangkit Listrik EBT Di RI." <https://money.kompas.com/read/2020/09/24/141102626/ini-hambatan-pengembangan-pembangkit-listrik-ebt-di-ri> (November 24, 2020).
- Suhono, Suhono, Sarjiya Sarjiya, and Sasongko Pramono Hadi. 2019. "Electricity Demand and Supply Planning Analysis for Sumatera Interconnection System Using Integrated Resources Planning Approach." *Jurnal Ilmiah Teknik Elektro Komputer dan Informatika* 5(1): 16–25.
- Usman, Muhammad, and Magdalena Radulescu. 2022. "Examining the Role of Nuclear and Renewable Energy in Reducing Carbon Footprint: Does the Role of Technological Innovation Really Create Some Difference?" *Science of the Total Environment* 841(May): 156662. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156662>.
- Vidinopoulos, Ashley, Jonathan Whale, and Ursula Fuentes Hutfilter. 2020. "Assessing the Technical Potential of ASEAN Countries to Achieve 100% Renewable Energy Supply." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 42(October): 100878. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100878>.
- Wang, Zhiqiang, and Xiaowei Jia. 2022. "Analysis of Energy Consumption Structure on CO2 Emission and Economic Sustainable Growth." *Energy Reports* 8: 1667–79. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.296>.
- Winarno, Oetomo Tri. 2010. *LEAP Panduan Perencanaan Energi*. Bandung: Pusat Kajian Kebijakan Energi Institut Teknologi Bandung.
- Yudiartono, Yudiartono, Jaka Windarta, and Adiarso Adiarso. 2022. "Analisis Prakiraan Kebutuhan Energi Nasional Jangka Panjang Untuk Mendukung Program Peta Jalan Transisi Energi Menuju Karbon Netral." *Jurnal Energi Baru dan Terbarukan* Vol. 3, No(Oktober): pp 201 – 217.
- Zaman, Anis, and Charlotte Yong. 2021. *Capacity Building on Developing SDG 7 Roadmap Using National Expert SDG Tool for Energy Planning*. Murdoch University, United Nations ESCAP.

X. Hu, L. Zhang: A Predictive Direct Torque Control Scheme for a Three-level VSI-fed Induction Motor Drive, 9th International Conference on Electrical Machines and Drives, Canterbury, UK, 15 Oct. 1999, pp. 334 – 338.