



Sistem Dinamik Bauran Energi Nuklir pada Skenario Penurunan Emisi Sektor Energi Listrik di Kalimantan

System Dynamics of Nuclear Energy Mix in the Electricity Sector Emission Reduction Scenarios in Kalimantan

Sufiana Solihat¹

Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Tangerang, Indonesia

Driejana

Kelompok Keahlian Pengelolaan Udara dan Limbah, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, Indonesia

Artikel Masuk : 8 Agustus 2023

Artikel Diterima : 20 Mei 2024

Tersedia Online : 31 Agustus 2024

Abstrak: Dengan perkembangan industri *smelter* dan rencana pemindahan Ibu Kota Negara, di wilayah Kalimantan diperkirakan akan terjadi peningkatan kebutuhan listrik yang cukup besar. Jika suplai listrik tetap berasal dari pembangkit konvensional, emisi gas rumah kaca (GRK) dan pencemar udara (PU) akibat pemenuhan kebutuhan industri dan domestik di masa yang akan datang akan semakin meningkat dan berpotensi membahayakan kesehatan manusia serta lingkungan. Bauran energi nuklir berpotensi dapat berkontribusi pada pemenuhan kebutuhan listrik yang meningkat tersebut dengan tingkat emisi yang jauh lebih sedikit. Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan beban emisi dari sektor energi listrik pada kondisi dasar (saat ini) dan pada skenario intervensi bauran EBT termasuk nuklir, ke dalam rencana suplai listrik di Kalimantan menggunakan metode sistem dinamik. Simulasi dilakukan pada empat skenario, yang dirancang berdasarkan proyeksi kebutuhan listrik dan proporsi bauran pembangkit (nuklir, fosil, dan energi terbarukan seperti surya dan angin) yang bervariasi. Perhitungan emisi CO₂, SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, dan PM_{2.5} pada skenario dasar dilakukan dengan asumsi penggunaan bahan bakar fosil di sektor pembangkit listrik. Sedangkan skenario disusun berdasarkan prediksi kebutuhan listrik dengan memperhitungkan laju pertumbuhan populasi dan dua kondisi pertumbuhan industri yaitu konservatif (berdasarkan laju pertumbuhan saat ini), dan ekspansif pada tahun 2021-2060. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa PLTN berpotensi menjadi sumber energi yang signifikan dalam memenuhi kebutuhan listrik di Kalimantan dengan dampak positif pada pengurangan emisi dan perbaikan kualitas udara.

Kata Kunci: *Beban emisi; co-benefit; inventarisasi emisi; pencemaran udara; perubahan iklim*

¹ Korespondensi Penulis: Pusat Teknologi Reaktor Nuklir, Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), Tangerang Selatan, Indonesia
Email: ssufiana16@gmail.com

How to Cite

Solihat, S., & Driejana, D., (2024). Sistem dinamik bauran energi nuklir pada skenario penurunan emisi sektor energi listrik di Kalimantan. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, 12(2), 131-149. doi: 10.14710/jwl.12.2.131-149 © 2024 LAREDEM

Abstract: *With the development of the smelter industry and the plan to relocate the Capital City, the Kalimantan region is expected to experience a significant increase in electricity demand. Should the electricity supply to meet the future industrial and domestic needs continue to rely on conventional power plants, greenhouse gas (GHG) emissions and air pollutants (AP) will escalate, posing potential risks to human health and the environment. Nuclear energy, as part of the energy mix, has the potential to contribute to meeting the growing electricity demand with significantly lower emissions. This study aims to model the emission loadings from the electricity sector under the baseline condition (current situation) and intervention scenarios involving clean energy mix, including nuclear energy, into the electricity supply plan of Kalimantan, using a system dynamics method. Simulations were conducted for four scenarios designed based on electricity demand projections and varying proportions of power generation mix (nuclear, fossil, and renewable energy such as solar and wind). Carbon dioxide (CO₂), SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, and PM_{2.5} emissions calculations for the baseline scenario were performed by assuming fossil fuel use in the power generation sector. The designs were formulated based on electricity demand predictions, considering population growth rates and two industrial growth conditions of conservative (based on the current growth rate) and expansive from the years of 2021 to 2060. The findings of this study indicate that nuclear power has the potential to become a significant energy source in meeting the electricity demand in Kalimantan, with positive impacts on emission reduction and air quality improvement.*

Keywords: *Air pollution; climate change; co-benefit; emission inventory; emission load*

Pendahuluan

Wilayah Indonesia di Kalimantan terdiri dari lima provinsi, yaitu Kalimantan Utara, Tengah, Barat, Timur dan Selatan. Total kebutuhan listrik di kelima provinsi tersebut pada tahun 2020 mencapai 11.534 GWh, sedangkan daya mampu yang dihasilkan sebesar 9.536 GWh. Bauran energi listrik di wilayah Kalimantan pada tahun 2020 didominasi oleh Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) sebesar 55,12%, Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) 14,87%, dan Pembangkit Listrik Tenaga Gas (PLTG) 12,75%, sementara 18% energi listrik berasal dari jenis pembangkit lain (PLN, 2021). Bahan bakar yang digunakan adalah bahan bakar fosil, seperti batubara, bahan bakar minyak (BBM), dan bahan bakar gas (BBG) (BPS, 2021). Karena daya yang dihasilkan belum mencukupi, pada tahun 2020 masih dilakukan impor listrik dari sistem Serawak sebesar 180 MW.

Kebutuhan listrik di wilayah Kalimantan diprediksi akan semakin meningkat seiring dengan rencana pengembangan industri *smelter* untuk pengolahan bauksit di Provinsi Kalimantan Barat. Demikian juga dengan rencana pemindahan Ibu Kota Negara (IKN) ke Provinsi Kalimantan Timur yang telah diumumkan presiden sejak tahun 2019. Wilayah Kalimantan diprediksi akan mengalami peningkatan kebutuhan listrik yang lebih besar (BAPPENAS, 2021). Jika suplai listrik tetap mengandalkan pembangkit eksisting, konsumsi bahan bakar fosil akan terus meningkat, yang menyebabkan peningkatan emisi SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, dan PM_{2.5} yang berbahaya bagi kesehatan dan ekonomi (Zhou dkk, 2021). Untuk memenuhi kebutuhan listrik besar, pembangkit berkapasitas tinggi seperti PLTU dan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) diperlukan (Liun & Nurlaila, 2021).

Berdasarkan hasil kesepakatan *Paris Agreement to United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), Indonesia berkomitmen mencapai net-zero emission (NZE) pada tahun 2060, termasuk menghentikan pembangunan PLTU baru dan menutup PLTU batubara secara bertahap mulai tahun 2030. Pemerintah memprioritaskan pengembangan energi baru dan terbarukan (EBT), seperti Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS), Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB), biomassa, dan Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), dengan target bauran energi sebesar 23% pada 2025 dan kemudian bertambah pada tahun-tahun selanjutnya (PLN, 2021). Namun energi nuklir, yang dipertimbangkan

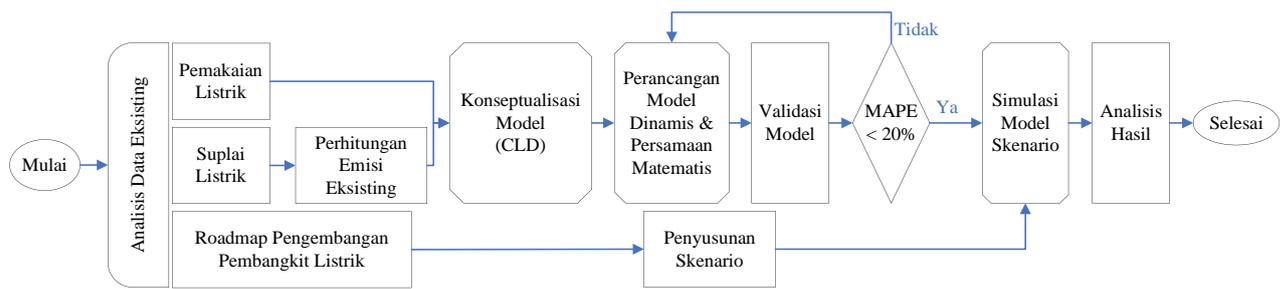
sebagai opsi terakhir dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN), dapat menjadi pilihan penting untuk memasok energi nasional dalam skala besar dan mengurangi emisi GRK (Harjanto, 2008). Sementara itu, target bauran energi listrik dari batubara adalah tidak lebih dari 55% pada tahun 2025. Namun besarnya energi yang dapat dihasilkan EBT masih sangat kecil, dan untuk bersaing dengan pembangkit batubara diperlukan upaya, waktu, dan biaya pengembangan EBT yang tidak sedikit (Dirjen EBTKE ESDM, 2019).

PLTN adalah jenis pembangkit yang memiliki kelebihan dalam menghasilkan listrik dengan kapasitas besar dan stabil, yang telah banyak digunakan di negara maju namun belum digunakan di Indonesia (Herawati & Sudagung, 2020). Berdasarkan kajian yang telah dilakukan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), PLTN pertama di Indonesia diusulkan untuk dibangun di Kalimantan Barat sebagai upaya substitusi energi dan transfer teknologi (Bastori & Sriyana, 2020; Hussein dkk., 2020; Mudjiono dkk., 2020; Priyanto dkk., 2021; Suntoko, 2014; Susiati dkk., 2019). Hal ini juga didukung dengan potensi sumberdaya uranium yang cukup besar yang ada di Kalimantan Barat sebagai bahan bakar PLTN (Bastori & Birmano, 2017). Beberapa daerah di Kalimantan Timur juga layak menjadi calon tapak PLTN dan telah memenuhi kriteria umum dan teknis (Susiati dkk., 2019). Selain itu, jaringan listrik di Kalimantan yang bersifat radial memungkinkan distribusi listrik yang optimal jika PLTN dibangun di berbagai provinsi (Liun & Nurlaila, 2021). Oleh karena itu, masuknya PLTN ke dalam bauran energi listrik di wilayah Kalimantan, patut dijadikan bahan pertimbangan. Sato dkk. (1998) dan Lau dkk. (2019) menyatakan bahwa energi nuklir juga berkontribusi terhadap pengurangan emisi CO₂. Sementara EBT belum mencapai tingkat yang dapat memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pengurangan emisi CO₂ (Menyah & Wolde-Rufael, 2010).

Penelitian ini bertujuan untuk memodelkan rencana suplai listrik di wilayah Kalimantan dengan bauran energi nuklir, serta menganalisis perbandingan emisi dari sektor energi listrik pada kondisi dasar dan intervensi, menggunakan metode sistem dinamik. Metode ini dipilih karena dianggap mampu menyelesaikan permasalahan rumit yang berimplikasi pada kebijakan, serta dapat menganalisis dengan baik proses evolusi dinamis dari sistem yang kompleks (Li dkk., 2022). Pemodelan sistem dinamik juga digunakan dalam memproses kaji ulang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK) dengan melihat keterkaitan antar sektoral dalam penentuan kebijakan (BAPPENAS, 2019). Penelitian terdahulu, seperti Nair dkk. (2021) dan Peng & Xiang (2022), telah menganalisis dampak bauran energi terhadap emisi CO₂. Namun, penelitian ini berbeda karena memperhitungkan emisi parameter pencemar udara lainnya (SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, dan PM_{2.5}) yang belum dijadikan fokus utama pada penelitian sebelumnya. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan kontribusi baru dengan mempertimbangkan dampak pencemaran udara lebih luas, terutama dalam konteks perkembangan sektor pembangkit listrik di wilayah Kalimantan.

Metodologi

Pendekatan sistem dinamik yang diaplikasikan dalam penelitian ini menggunakan bantuan perangkat lunak Vensim PLE versi 9.3.4. Versi ini dirilis pada bulan September 2022 dan merupakan konfigurasi resmi dari Ventana System (Vensim) yang tersedia gratis untuk keperluan penelitian. Tahapan penelitian yang dilakukan meliputi proyeksi kebutuhan listrik di masa depan, perhitungan emisi dari sektor ketenagalistrikan, pembuatan *causal loop diagram* (CLD) untuk menganalisis hubungan antar variabel yang terlibat, perancangan model dinamis dengan persamaan matematis yang sesuai, validasi model menggunakan data empiris, simulasi skenario, dan analisis hasil untuk mengetahui emisi yang dihasilkan sektor ketenagalistrikan pada kondisi dasar dan intervensi. Bagan alir metodologi penelitian ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Metodologi Penelitian

Lokasi studi meliputi lima provinsi, yaitu Kalimantan Barat, Kalimantan Tengah, Kalimantan Selatan, Kalimantan Timur, dan Kalimantan Utara (untuk selanjutnya disebut Kalimantan). Data eksisting yang digunakan adalah data terkait pemakaian listrik, pembangkit listrik, dan bahan bakar sektor pembangkit listrik pada tahun 2020 yang bersumber dari hasil survei instansional dan referensi terkait. Selain itu juga data roadmap pengembangan pembangkit listrik yang dilakukan oleh Kementerian ESDM, PLN, dan Kerjasama BATAN-P3TEK, yang selanjutnya dianalisis serta dijadikan pertimbangan dalam penyusunan skenario.

Validasi model menggunakan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE), dengan interpretasi nilai MAPE mengacu pada Lewis (1982). Persamaan dan interpretasi yang digunakan dalam uji validasi ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rumus Uji Validasi dan Interpretasi Nilai MAPE

Persamaan MAPE	Interpretasi Nilai MAPE
$MAPE = \frac{\sum \left \frac{y_t - \hat{y}_t}{y_t} \right }{n} \times 100 \quad (1)$	< 10% = sangat baik 10% - 20% = baik 20% - 50% = wajar >50% = tidak akurat

dengan:

n = jumlah data

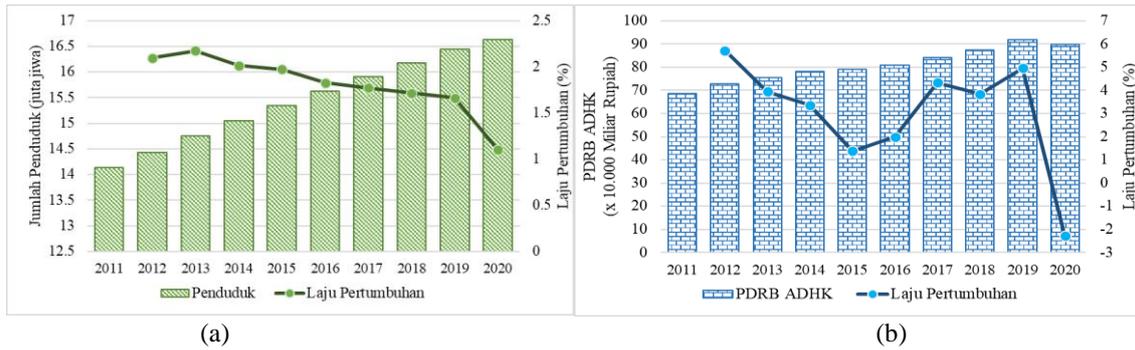
y_t = data asli

\hat{y}_t = data hasil simulasi/model

Sumber: Lewis, 1982

Kondisi Eksisting Sektor Energi Listrik di Kalimantan

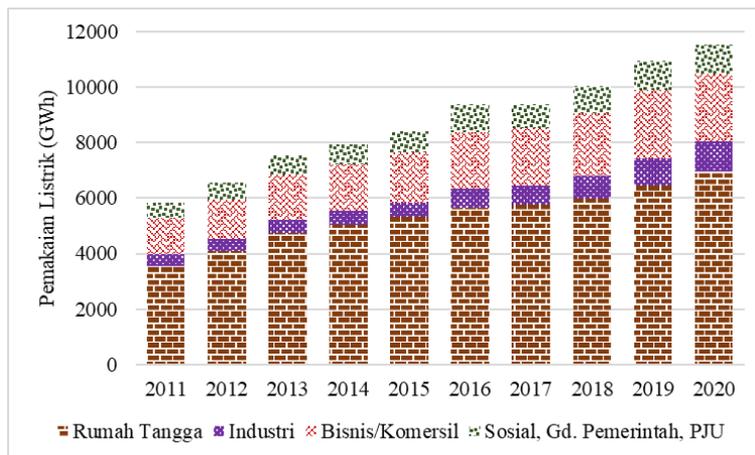
Pertumbuhan penduduk dan ekonomi berdampak besar terhadap jumlah pelanggan dan konsumsi listrik di suatu wilayah (Julianto & Suparno, 2016; Rosadi & Amar, 2019). Berdasarkan data BPS, selama tahun 2011-2020 jumlah penduduk di Kalimantan meningkat dari 14.140.721 jiwa menjadi 16.625.782 jiwa. Namun laju pertumbuhan penduduk mengalami penurunan rata-rata menjadi 1,83% per tahun (Gambar 2a), bahkan pada tahun 2020, laju pertumbuhan penduduk hanya sebesar 1,1%. Untuk memproyeksikan jumlah pelanggan listrik sektor industri, bisnis/komersil, dan sosial digunakan variabel ekonomi berupa produk domestik regional bruto (PDRB). PDRB atas dasar harga konstan (ADHK) cenderung mengalami kenaikan dengan laju pertumbuhan 3,69% (Gambar 2b) yang merupakan nilai rata-rata dari laju pertumbuhan rata-rata PDRB per sektor yakni industri (2,6%), bisnis/komersil sebesar 3,71%, dan sosial sebesar 3,82%.



Sumber: BPS, 2021

Gambar 2. Kondisi Sosioekonomi Kalimantan Tahun 2011-2020 (a) Berdasarkan Jumlah Penduduk dan (b) Berdasarkan Jumlah PDRB ADHK

Total pemakaian listrik Kalimantan pada tahun 2011 sebesar 5.829 GWh, mengalami peningkatan pada tahun 2015 menjadi 8.439,7 GWh dan menjadi 11.534 GWh pada tahun 2020. Sektor pelanggan listrik rumah tangga mendominasi dengan persentase lebih dari 60% (BPS, 2021). Terlihat ada peningkatan konsumsi listrik pada sektor industri seiring dengan terjadinya pertumbuhan industri sebagaimana terlihat pada Gambar 3.



Sumber: BPS, 2021

Gambar 3. Histori Pemakaian Listrik di Kalimantan

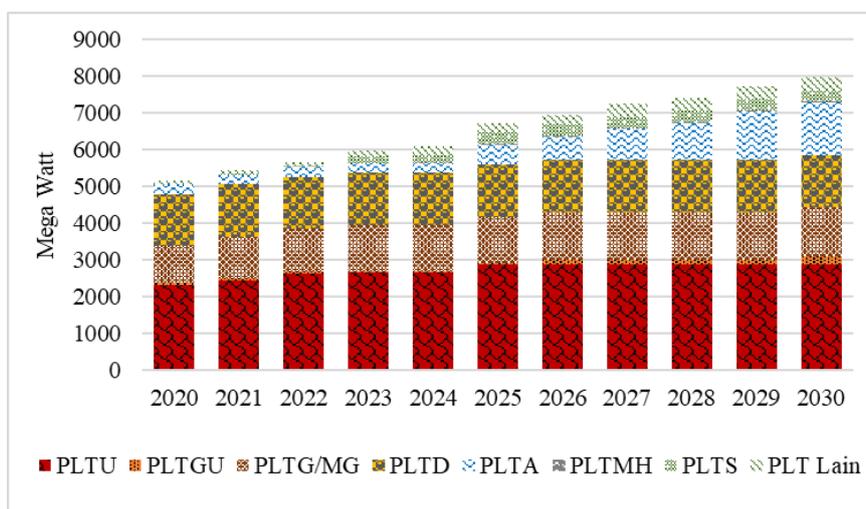
Pasokan listrik di Kalimantan secara berurutan didominasi oleh PLTU, PLTG/Pembangkit Listrik Tenaga Gas & Uap (PLTGU)/Pembangkit Listrik Tenaga Mesin Gas (PLTMG), dan PLTD. Bahan bakar yang digunakan dalam PLTU adalah batubara jenis *low rank coal* (LRC), dengan nilai kalor 0,0148 TJ/ton (Puslitbang Tekmira KESDM, 2016) sedangkan PLTD menggunakan bahan bakar minyak dalam bentuk *high speed diesel* (HSD) dan *marine fuel oil* (MFO), dengan nilai kalor masing-masing 42,66 TJ/Gg dan 41,31 TJ/Gg (Kementerian ESDM, 2018). Bahan bakar yang digunakan dalam PLTG/GU/MG adalah bahan bakar gas, dan sebagian kecil yang dikombinasikan dengan BBM (Mulyono dkk., 2020; Partogi dkk., 2018). Pemakaian bahan bakar fosil pada sektor pembangkit listrik di Kalimantan pada tahun eksisting antara lain batubara 3.474.760,68 ton, HSD 16.806,11 KiloLiter, MFO 33.394,93 KiloLiter, dan gas alam 14.464,87 MMSCF (BPS, 2021). Sementara sisanya berasal dari PLTA/Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH), PLTS, dan pembangkit lainnya seperti biomassa dalam jumlah yang sangat sedikit.

Analisis Roadmap Pengembangan Pembangkit Listrik yang Tersedia

Data *roadmap* yang berkaitan dengan pengembangan pembangkit listrik diantaranya berasal dari beberapa sumber sebagai berikut:

- RUPTL 2021-2030 PT PLN: proyeksi bauran energi listrik di Kalimantan selama tahun 2021-2030 (PLN, 2021);
- Kementerian ESDM: rencana pengembangan pembangkit listrik NZE nasional selama tahun 2021-2060 (Misna, 2022); dan
- Kerjasama P3TEK Kementerian ESDM dan BATAN: rencana pengembangan pembangkit dan bauran energi listrik di Provinsi Kalimantan Barat selama tahun 2021-2050 dalam berbagai skenario (P3TEK & BATAN, 2020).

Data-data *roadmap* tersebut memberikan gambaran mengenai bagaimana rencana pemerintah terkait bauran energi listrik di waktu mendatang. Gambaran ini menjadi bahan pertimbangan dalam membuat proporsi bauran pembangkit pada skenario-skenario yang akan dirancang dalam penelitian ini agar proporsi bauran yang dibuat lebih realistis. Salah satu *roadmap* yang menjadi pertimbangan yaitu proyeksi bauran energi listrik di Kalimantan tahun 2021-2030 yang bersumber dari dokumen RUPTL PLN 2021-2030, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.

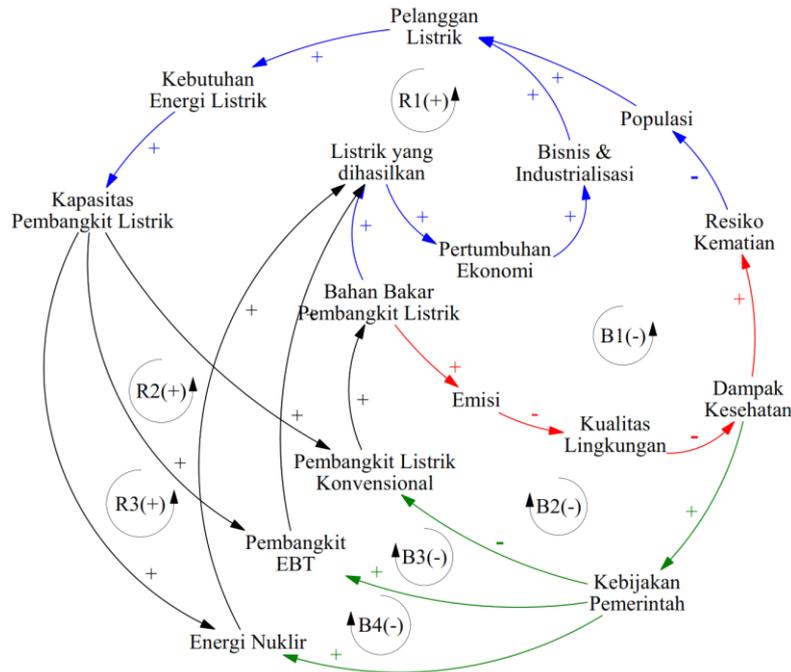


Sumber: PLN, 2021

Gambar 4. Roadmap Pengembangan Pembangkit Listrik Kalimantan 2021-2030 Berdasarkan RUPTL

Pengembangan Model

Model sistem dinamik perencanaan bauran energi listrik tersusun dari tiga sub model, yaitu submodel kebutuhan listrik, submodel suplai listrik, dan submodel emisi sektor pembangkit listrik. Hubungan antara variabel-variabel yang membentuk model dijelaskan oleh CLD yang terdapat pada Gambar 5. Langkah selanjutnya adalah membuat *stock flow diagram* (SFD) untuk setiap submodel (Gambar 6 dan Gambar 7).



Gambar 5. CLD Model Kebutuhan dan Suplai Listrik, Serta Emisi Sektor Pembangkit Listrik

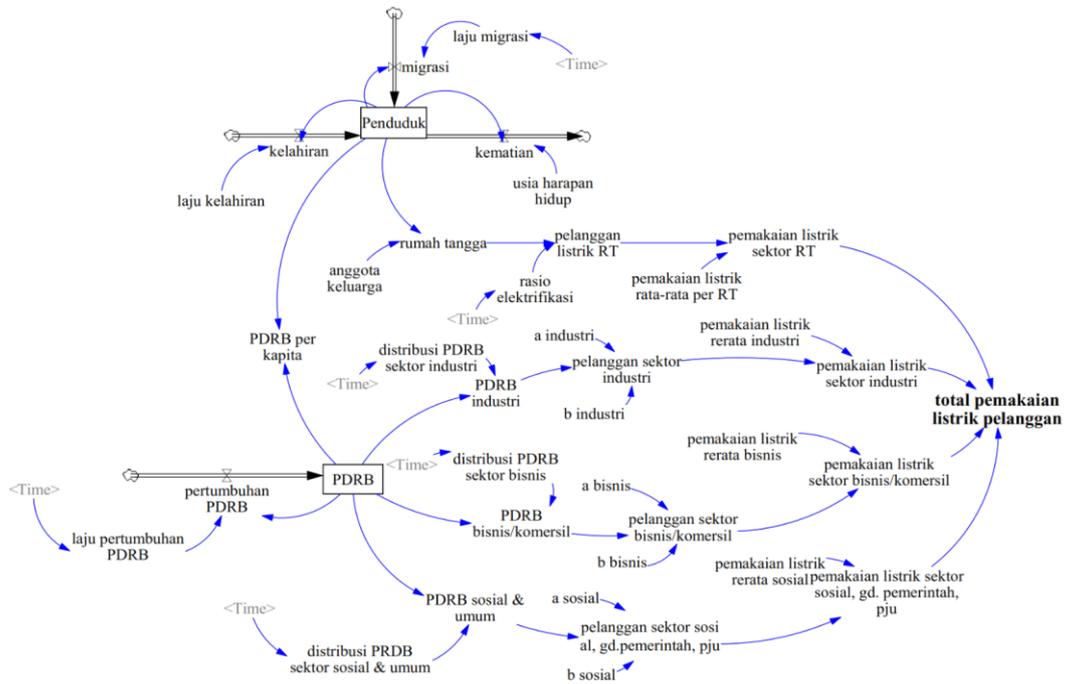
Interaksi antar variabel ditandai dengan simbol anak panah. Tanda positif pada garis panah berarti bahwa perubahan nilai di satu variabel menyebabkan perubahan nilai di variabel yang lain dalam arah yang berbanding lurus. Tanda negatif berarti bahwa perubahan nilai di satu variabel menyebabkan perubahan nilai di variabel yang lain dengan arah yang berlawanan. Apabila diagram terbentuk lingkaran/*loop*, maka diberi tanda *feedback loop* (simpul umpan balik). Terdapat dua jenis *feedback loop* yaitu simbol positif/*reinforcing loop* (R) yang menunjukkan pertumbuhan yang terus menerus di sistem, dan negatif/*balancing loop* (B) yang menunjukkan bahwa terdapat hubungan yang saling bertolak belakang dalam sistem (Artika & Chaerul, 2020).

Model konseptual dalam Gambar 5 menggambarkan hubungan antara variabel-variabel dalam tiga submodel yang saling berkaitan. Kebutuhan listrik dipengaruhi oleh jumlah pelanggan dari sektor domestik, bisnis, industri, sosial, gedung pemerintah, dan fasilitas umum. Semakin besar kebutuhan listrik, semakin besar daya listrik yang dibangkitkan. Di Kalimantan, mayoritas suplai listrik berasal dari pembangkit berbahan bakar fosil (PLTU, PLTD, dan PLTG/GU/MG) yang menyumbang sekitar 83% dari total suplai. Penggunaan energi fosil yang meningkat berdampak pada emisi gas rumah kaca dan pencemar udara, mengancam lingkungan dan kesehatan manusia. Pemerintah berupaya menurunkan emisi dengan kebijakan pembatasan pembangkit fosil dan peningkatan energi terbarukan, termasuk nuklir. Semakin besar kapasitas nuklir dan energi terbarukan, semakin rendah emisi yang dihasilkan.

Submodel Kebutuhan Listrik

Gambar 6 merupakan gambaran submodel kebutuhan listrik yang terdiri dari beberapa sektor pelanggan listrik. Kebutuhan listrik sektor rumah tangga bergantung pada jumlah pelanggannya yang berkaitan erat dengan jumlah penduduk dan rasio elektrifikasi. Sedangkan kebutuhan listrik sektor industri, bisnis, dan sosial berkaitan erat dengan perekonomian. Semakin besar listrik yang dapat dihasilkan dari sektor pembangkit di suatu wilayah, semakin besar pula ekonomi di wilayah tersebut akan mudah bertumbuh (Suriani &

Keusuma, 2015). Jumlah pelanggan industri, bisnis, sosial, gedung pemerintah, dan penerangan jalan ditentukan berdasarkan persamaan regresi dari variabel PDRB. Nilai PDRB setiap sektor dihitung dari PDRB ADHK 2020 dengan distribusi persentase data historis 2011-2020.



Gambar 6. Submodel Kebutuhan Listrik

Persamaan matematis yang digunakan dalam submodel kebutuhan listrik ditampilkan pada Tabel 2.

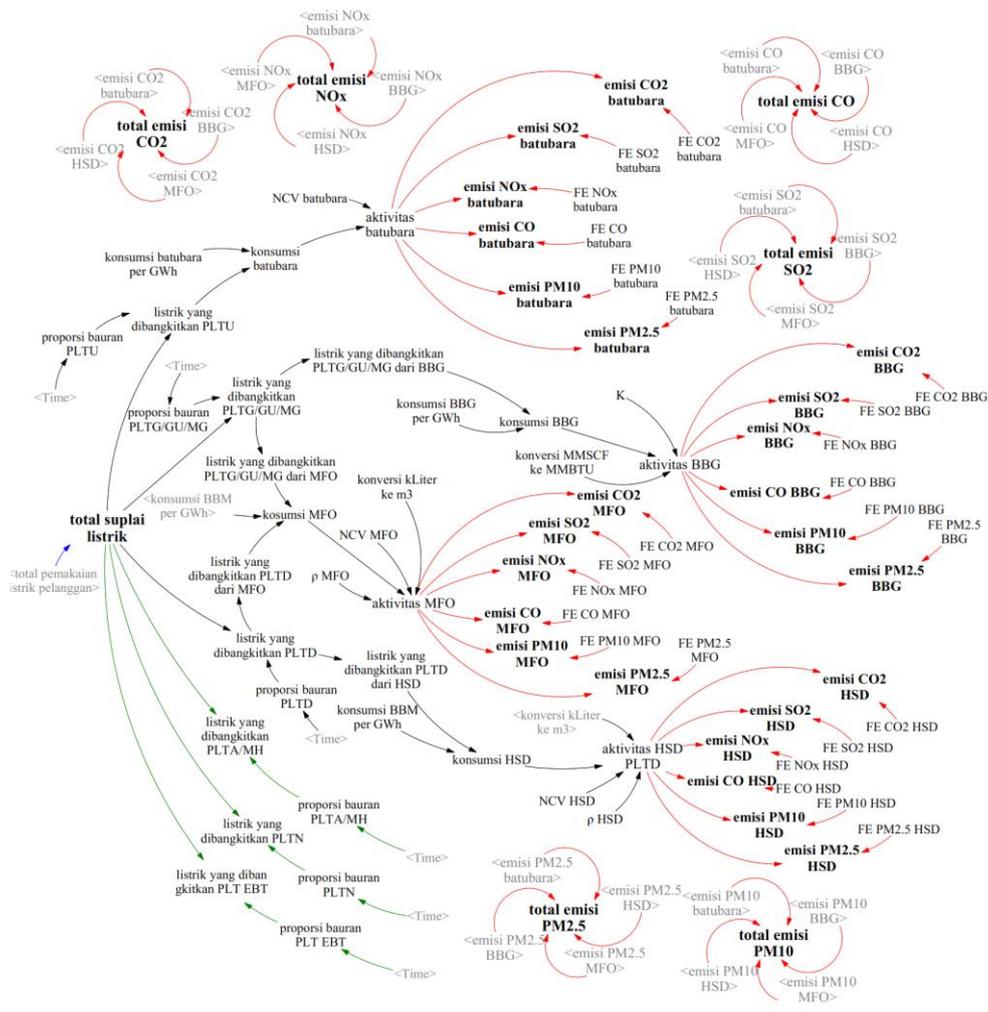
Tabel 2. Persamaan Matematis pada Submodel Kebutuhan Listrik

Persamaan Matematis	Keterangan
$Penduduk(t) = Penduduk(t - dt) + (Kelahiran + Migrasi - Kematian) \times dt$	(2) $Penduduk(t)$ =jumlah penduduk pada tahun t
$Kelahiran = Penduduk(t) \times laju\ kelahiran$	(3) $Penduduk(t - dt)$ = jumlah penduduk pada tahun awal
$Migrasi = Penduduk(t) \times laju\ migrasi$	(4) dt = perubahan
$Kematian = Penduduk(t) \times usia\ harapan\ hidup$	(5)
$Rumah\ Tangga(t) = \frac{PDRB\ per\ kapita}{Jumlah\ anggota\ dalam\ Rumah\ Tangga}$	(6)
$Pelanggan\ Sektor\ RT(t) = Rumah\ Tangga(t) \times Rasio\ Elektrifikasi$	(7)
$Pemakaian\ listrik\ sektor\ RT(t) = Pelanggan\ Sektor\ RT(t) \times Pemakaian\ listrik\ rerata\ per\ RT$	(8)
$PDRB(t) = PDRB(t - dt) + Laju\ Pertumbuhan\ PDRB \times dt$	(9)
$PDRB_i(t) = PDRB(t) \times Persentase\ distribusi\ PDRB_i$	(10)
$Jumlah\ Pelanggan_i(t) = a_i \times PDRB_i(t) + b_i$	(11) i = sektor industri/bisnis/sosial
$Pemakaian\ listrik\ non\ RT_i(t) = Jumlah\ pelanggan_i(t) \times Pemakaian\ listrik\ rerata\ non\ RT_i$	(12) a = variabel konstanta b = koefisien arah regresi
$Total\ Pemakaian\ Listrik\ Pelanggan(t) = Pemakaian\ Listrik\ Sektor\ RT(t) + Pemakaian\ Listrik\ Non\ RT_i(t)$	(13)

Submodel Suplai Listrik dan Emisi Sektor Pembangkit

Bagian ini merupakan gabungan dari submodel suplai listrik dan submodel emisi sektor pembangkit. Simulasi dari kedua submodel ini dimulai dari perhitungan total suplai listrik. Besarnya suplai listrik yang dibutuhkan dihitung dari total pemakaian listrik pelanggan ditambah cadangan/*reserve margin*. *Reserve margin* adalah cadangan daya pembangkit terhadap beban puncak yang dinyatakan dalam persen (%) (PLN, 2021). Besarnya *reserve margin* yang ditetapkan sebesar 35%. Selanjutnya dihitung suplai listrik dari setiap jenis pembangkit listrik berdasarkan proporsi untuk setiap skenario. Kemudian dihitung pula emisi yang dihasilkan dari pembangkit listrik berdasarkan konsumsi bahan bakarnya. Jenis pembangkit listrik yang menghasilkan emisi yaitu PLTU, PLTG/GU/MG, dan PLTD karena jenis pembangkit listrik tersebut menggunakan bahan bakar fosil dalam memproduksi listrik.

Perhitungan emisi CO₂ dilakukan dengan mengacu pada metode IPCC 2006 yang telah diadaptasi dalam buku Pedoman Penghitungan dan Pelaporan Inventarisasi GRK dengan faktor emisi nasional (*Tier-2*) (Kementerian ESDM, 2018). Sementara faktor emisi yang digunakan untuk perhitungan emisi parameter pencemar udara (SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, dan PM_{2.5}) merupakan faktor emisi *Tier-1* yang bersumber dari US EPA (EEA, 2019). Pembangkit lain seperti PLTA/MH, PLTN, dan PLT EBT tidak menggunakan bahan bakar fosil dalam memproduksi listrik sehingga dalam model tidak tersambung ke variabel emisi, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Submodel Suplai Listrik dan Emisi Sektor Pembangkit Listrik

Persamaan matematis yang digunakan dalam submodel suplai listrik dan emisi sektor pembangkit ditampilkan pada Tabel 3.

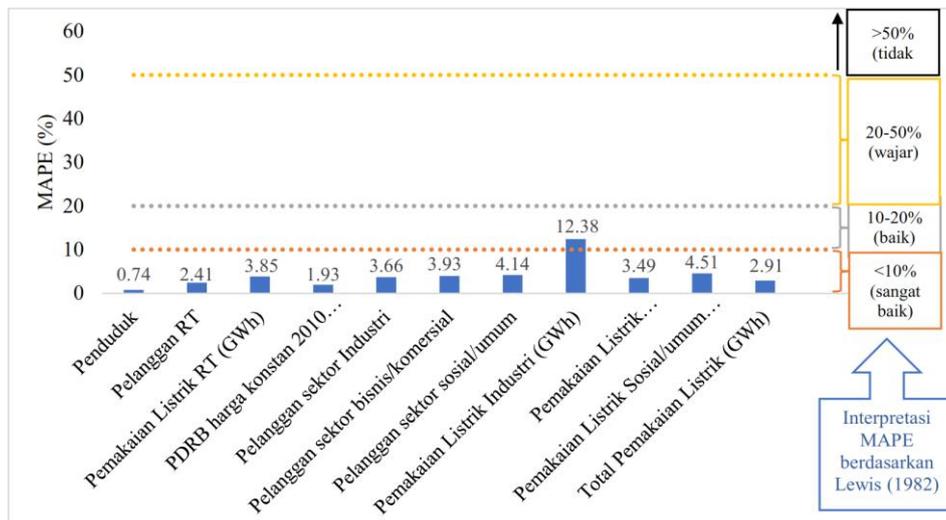
Tabel 3. Persamaan Matematis pada Submodel Suplai Listrik dan Emisi Sektor Pembangkit

Persamaan Matematis	Keterangan
<i>Total Suplai Listrik (t)</i> = <i>Total Pemakaian Listrik Pelanggan(t)</i> (14) + (<i>Total Pemakaian Listrik Pelanggan(t)</i> + 35/100)	
<i>Listrik yang dibangkitkan PLTU(t)</i> = <i>Total Suplai Listrik(t) × Proporsi bauran PLTU(t)</i> (15)	
<i>Konsumsi batubara(t)</i> = <i>Listrik yang dibangkitkan PLTU(t)</i> (16) × <i>Konsumsi batubara per GWh</i>	
<i>Listrik yang dibangkitkan PLTG/GU/MG (t)</i> = <i>Total Suplai Listrik(t)</i> (17) × <i>Proporsi bauran PLTG/GU/MG(t)</i>	
<i>Listrik yang dibangkitkan PLTG/GU/MG dari BBG(t)</i> = <i>Listrik yang dibangkitkan PLTG/GU/MG (t)</i> (18) × 83/100	
<i>Konsumsi BBG(t)</i> = <i>Listrik yang dibangkitkan PLTG/GU/MG dari BBG(t)</i> (19) × <i>Konsumsi BBG per GWh</i>	
<i>Listrik yang dibangkitkan PLTG/GU/MG dari MFO(t)</i> = <i>Listrik yang dibangkitkan PLTG/GU/MG (t)</i> (20) × 17/100	
<i>Listrik yang dibangkitkan PLTD(t)</i> = <i>Total Suplai Listrik (t) × Proporsi bauran PLTD(t)</i> (21)	
<i>Listrik yang dibangkitkan PLTD dari MFO(t)</i> = <i>Listrik yang dibangkitkan PLTD(t) × 45/100</i> (23)	
<i>Konsumsi MFO(t)</i> = (<i>Listrik yang dibangkitkan PLTG/GU/MG dari MFO(t)</i>) (24) + <i>Listrik yang dibangkitkan PLTD dari MFO(t)</i> × <i>Konsumsi BBM per GWh</i>	
<i>Listrik yang dibangkitkan PLTD dari HSD(t)</i> = <i>Listrik yang dibangkitkan PLTD(t) × 55/100</i> (25)	
<i>Konsumsi HSD(t)</i> = <i>Listrik yang dibangkitkan PLTD dari MFO(t)</i> (26) × <i>Konsumsi BBM per GWh</i>	
<i>Listrik yang dibangkitkan PLTA/MH (t)</i> = <i>Total Suplai Listrik(t) × Proporsi bauran PLTA /MH(t)</i> (27)	
<i>Listrik yang dibangkitkan PLTN(t)</i> = <i>Total Suplai Listrik(t) × Proporsi bauran PLTN(t)</i> (28)	
<i>Listrik yang dibangkitkan PLT EBT(t)</i> = <i>Total Suplai Listrik (t)</i> (29) × <i>Proporsi bauran PLT EBT (t)</i>	
<i>Emisi_j = Data Aktivitas × Faktor Emisi_j</i> (30)	
<i>Total Emisi_j = Emisi_j dari batubara + Emisi_j dari BBG</i> (31) + <i>Emisi_j dari MFO + Emisi_j dari HSD</i>	<i>j = parameter</i> pencemar CO ₂ /SO ₂ / NO _x /CO/PM ₁₀ /PM _{2,5}

Validasi Model

Validasi model dilakukan untuk memastikan kebenaran hasil model simulasi yang telah dibuat dibandingkan dengan data aktual, yaitu data histori tahun 2011 hingga 2020. Data simulasi model berasal dari hasil simulasi model *software* Vensim PLE 9.3.4. Validasi

dilakukan secara statistik menggunakan metode MAPE, dengan interpretasi berdasarkan Lewis (1982). Data angka dan asumsi yang diinput ketika validasi model adalah data saat kondisi *business as usual* (BaU). Tidak semua data hasil simulasi dapat divalidasi karena keterbatasan data historis. Hasil validasi model terhadap variabel-variabel penelitian terhadap data aktual Kalimantan ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. MAPE Rata-rata Setiap Variabel di Kalimantan

Penyusunan Skenario

Simulasi model dilakukan dari tahun 2021 hingga 2060. Dalam penelitian ini skenario dibentuk dengan variasi kebutuhan dan suplai listrik dalam kondisi *baseline* dan intervensi. Kondisi *baseline* menggambarkan pertumbuhan pemakaian listrik secara BaU dan penambahan pembangkit fosil yang mendominasi. Sedangkan kondisi intervensi mencerminkan pertumbuhan pemakaian listrik yang dipengaruhi oleh perpindahan IKN ke Kalimantan dan perkembangan industri smelter, serta upaya penurunan emisi melalui peningkatan penggunaan PLTN, PLTA/MH, dan PLT EBT, serta pengurangan pembangkit berbahan bakar fosil. Skenario yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4 dibawah ini.

Tabel 4. Skenario Pemodelan

Skenario	Kebutuhan Listrik	Suplai Listrik	Penjelasan
1	Konservatif (BAU)	Konvensional pembangkit fosil	Proyeksi kebutuhan listrik dengan pertumbuhan penduduk, industri, bisnis, dan sosial yang konservatif (kondisi BaU) dan konstan. Bauran pembangkit listrik masa depan fokus pada pembangkit fosil.
2	Konservatif	Intervensi Energi Bersih	Proyeksi kebutuhan listrik dengan pertumbuhan penduduk, industri, bisnis, dan sosial yang konservatif (kondisi BaU) dan konstan. Bauran pembangkit listrik masa depan fokus pada pengembangan PLTA/MH, PLTN, dan PLT EBT.
3	Ekspansif	Konvensional pembangkit fosil	Proyeksi kebutuhan listrik dengan laju pertumbuhan meningkat dipengaruhi oleh perpindahan IKN dan pengembangan industri <i>smelter</i> . Bauran pembangkit listrik masa depan fokus pada pembangkit fosil.
4	Ekspansif	Intervensi Energi Bersih	Proyeksi kebutuhan listrik dengan laju pertumbuhan meningkat dipengaruhi oleh perpindahan IKN dan pengembangan industri <i>smelter</i> . Bauran pembangkit listrik masa depan fokus pada pengembangan PLTA/MH, PLTN, dan PLT EBT.

Skenario disimulasikan untuk setiap provinsi, karena masing-masing memiliki karakteristik yang unik. Di Provinsi Kalimantan Barat diprediksi terjadi pertumbuhan industri *smelter*, sedangkan di Provinsi Kalimantan Timur pertumbuhan penduduk meningkat karena pemindahan IKN (BAPPENAS, 2021; Liun & Nurlaila, 2021). Kedua provinsi tersebut telah dinyatakan memenuhi kriteria tapak PLTN (P3TEK & BATAN, 2020; Priyanto dkk., 2021; Susiati dkk., 2019). Sementara di Provinsi Kalimantan Tengah, Selatan, dan Utara pertumbuhannya tidak sebesar dua provinsi yang lain, namun sudah ada wacana pembangunan PLTN sehingga bauran listrik dari PLTN muncul pada akhir periode studi. Selanjutnya data hasil simulasi akhir dari setiap provinsi diakumulasi sebagai data Kalimantan. parameter-parameter dan nilai yang digunakan pada setiap skenario untuk proyeksi kebutuhan listrik ditampilkan pada Tabel 5.

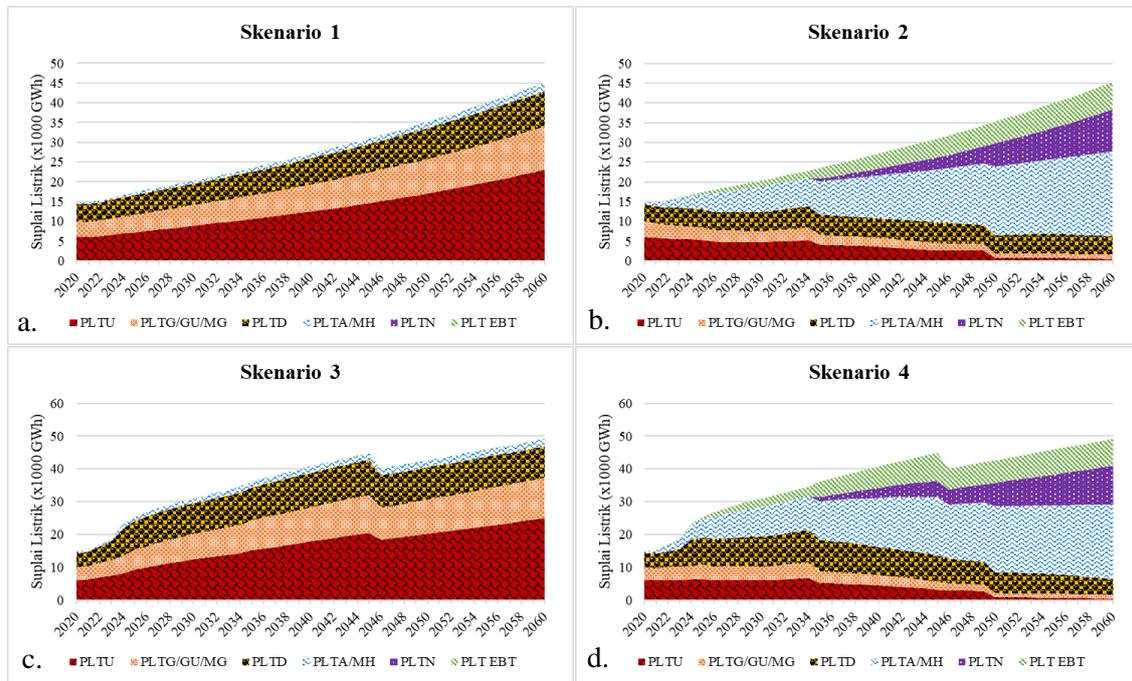
Tabel 5. Parameter dan Asumsi untuk Proyeksi Kebutuhan Listrik

Parameter	Satuan	Kalimantan Barat		Kalimantan Timur		Kalimantan Tengah, Selatan, Utara	
		Skenario 1&2 ^a	Skenario 3&4 ^b	Skenario 1&2 ^a	Skenario 3&4 ^b	Skenario 1&2 ^a	Skenario 3&4 ^b
Kelahiran	%	1,82	1,82	2,1	2,1	2,1	2,1
Migrasi	%	1,72	1,72	1,36	1,36 (2021); 1,61 (2021-2045); 1,36 (2046-2060)	0,79	0,79
Harapan Hidup	tahun	70	70	73,71	73,71	69,83	69,83
Anggota Keluarga	jiwa/RT	4,4	4,4	3,5	3,5	3,9	3,9
Rasio Elektrifikasi	%	92,3 (2020-2024); 100 (2025-2060)		94,36 (2020-2024); 100 (2025-2060)		93 (2020-2024); 100 (2025-2060)	
Pemakaian listrik RT	MWh/RT	1,524	1,524	2,265	2,265	1,537	1,537
Laju Pertumbuhan PDRB	%	4,61	4,61 (2020-2022); 122 (2023); 3,23 (2024-2044); 0,2 (2045-2060)	2 (2020-2021); 2 (2022-2058); 1 (2059-2060)	2 (2020-2021); 4 (2022-2024); 6 (2025-2028); 2 (2029-2040); 1 (2045-2060)	5 (2020); 3,62 (2021-2058); 2 (2059-2060)	5 (2020); 3,62 (2021-2058); 1 (2059-2060)
Rasio Distribusi PDRB Industri	%	31,98	31,98 (2020-2022); 80 (2023-2044); 59 (2045-2060)	77,37	77,37 (2020-2021); 76,23 (2022-2024); 75,23 (2025-2034); 74,73 (2035-2045); 77,37 (2046-2060)	46	46
Pemakaian listrik Industri	MWh/Industri	280	280	590	590	400	400
Rasio Distribusi PDRB Bisnis	%	60,4	60,4 (2020-2022); 18 (2023-2044); 39 (2045-2060)	19,91	19,91 (2020-2021); 18,77 (2022-2024); 17,77 (2025-2034); 17,27 (2035-2045); 19,91 (2046-2060)	46	46
Pemakaian listrik Bisnis	MWh/Bisnis	7,4	7,4	14,9	14,9	6,9	6,9
Rasio Distribusi PDRB Sosial	%	7,62	7,62 (2020-2022); 2 (2023-2060)	2,72	2,72 (2020-2021); 5 (2022-2024); 7 (2025-2034); 8 (2035-2045); 2,72 (2046-2060)	8	8
Pemakaian listrik Sosial	MWh/Sosial	9,3	9,3	13,1	13,1	6,3	6,3

Keterangan: (a) BPS, 2021; (b) asumsi

Hasil dan Pembahasan

Berdasarkan rancangan skenario yang telah ditetapkan, bauran energi listrik akan berasal dari berbagai jenis pembangkit dengan proporsinya masing-masing sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9.



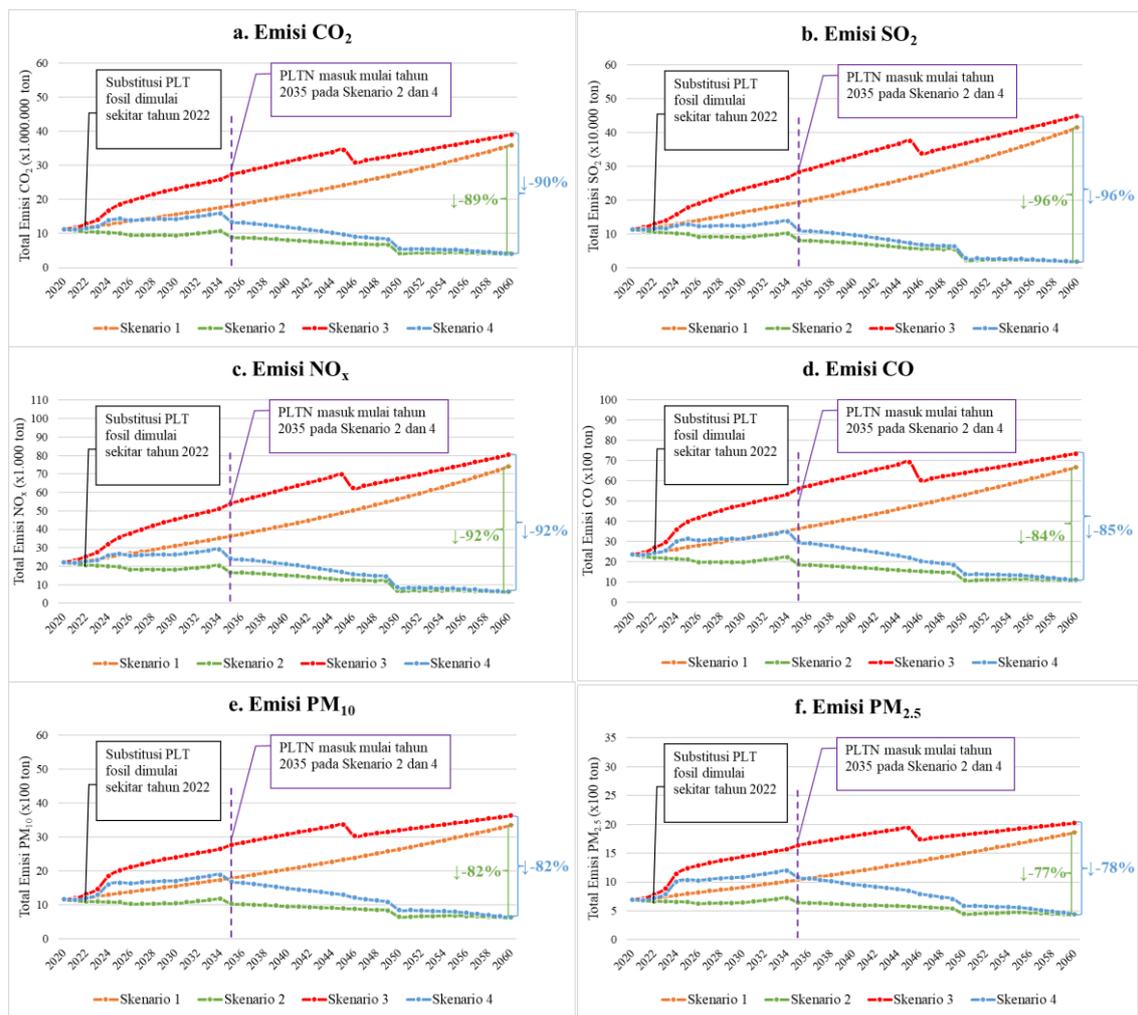
Gambar 9. Bauran Energi Listrik di Kalimantan tahun 2060: a. Skenario 1; b. Skenario 2; c. Skenario 3; dan d. Skenario 4

Pada Gambar 9a dan c, terlihat bahwa jika perencanaan pengembangan pembangkit listrik tidak mempertimbangkan upaya penurunan emisi (kondisi BaU) dan tidak ada pembangunan PLTN, maka bauran energi listrik dari PLTU akan mendominasi suplai listrik di Kalimantan pada tahun 2060, PLTG/GU/MG pada urutan terbanyak kedua, dan PLTD di urutan ketiga. Dengan demikian bauran energi listrik tahun 2060 di Kalimantan, pada Skenario 1 dan 3, bersumber dari pembakaran bahan bakar fosil dengan persentase 95-97% dari total suplai listrik. Namun jika dilakukan perencanaan pengembangan pembangkit listrik ramah lingkungan dan masuknya PLTN, maka di tahun 2060 suplai listrik dari PLTU hanya sekitar 1-2%, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 9b dan d. Lalu sebagian besar energi listrik akan disuplai oleh pembangkit yang ramah lingkungan seperti PLTN, PLTA/MH, dan PLT EBT, dengan bauran berkisar 86-90% dari total suplai listrik. Hal ini tentu akan mempengaruhi jumlah emisi yang dihasilkan. Emisi pada Skenario 2 akan lebih kecil dibanding Skenario 1, begitu pun emisi pada Skenario 4 akan lebih kecil dibanding Skenario 3, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 10.

Hasil pemodelan menunjukkan jika pertumbuhan penduduk dan industri di Kalimantan bersifat konservatif, dan perencanaan suplai listrik tidak mempertimbangkan penurunan emisi serta tanpa penggunaan PLTN dalam bauran energi listrik, maka pada tahun 2060 emisi GRK meningkat sebesar 24,6 juta ton CO₂ dari 2020, dengan penambahan rata-rata 614,6 ribu ton CO₂ (3%) per tahun (Gambar 10.a., garis jingga). Namun, jika perencanaan suplai listrik berfokus pada penurunan emisi dari sektor pembangkit listrik, dan masuknya PLTN mulai tahun 2035, maka pada tahun 2060 emisi GRK akan menurun sebesar 7,37 juta ton CO₂ dari 2020, dengan penurunan rata-rata 184,3 ribu ton CO₂ (2,4%) per tahun. Selisih

emisi GRK antara skenario 1 dan 2 adalah 14,5 juta ton CO₂ per tahun, dengan skenario 2 lebih rendah 89% (31,98 juta ton CO₂) dari skenario 1 (Gambar 10.a., garis hijau).

Dalam kondisi pertumbuhan penduduk dan industri ekspansif, dengan perkembangan kawasan industri smelter, pemindahan IKN baru, dan pesatnya sektor industri, bisnis, dan sosial di Kalimantan, tanpa upaya penurunan emisi maka akan terjadi peningkatan emisi GRK yang besar. Pada tahun 2060, emisi GRK meningkat 27,8 juta ton CO₂ dari 2020, dengan penambahan rata-rata 694 ribu ton CO₂ (3,2%) per tahun (Gambar 10.a., garis merah). Namun, jika perencanaan suplai listrik fokus pada penurunan emisi dan masuknya PLTN di Kalimantan, emisi GRK akan menurun 7,24 juta ton CO₂ pada tahun 2060 dari 2020, dengan rata-rata penurunan 180,9 ribu ton CO₂ (2,3%) per tahun (Gambar 10.a., garis biru). Selisih emisi GRK antara skenario 3 dan 4 adalah 18,3 juta ton CO₂ per tahun, dengan skenario 4 lebih rendah 90% (35 juta ton CO₂) dari skenario 3.



Gambar 10. Hasil pemodelan total emisi dari sektor pembangkit listrik di Kalimantan: a. Emisi CO₂; b. Emisi SO₂; c. Emisi NO_x; d. Emisi CO; e. Emisi PM₁₀; dan f. Emisi PM_{2,5}

Hasil penelitian ini mendukung penelitian-penelitian sebelumnya, antara lain penelitian yang dilakukan oleh Menyah & Wolde-Rufael (2010) dan Yang dkk. (2021) bahwa pengembangan inovasi teknologi pembangkit non-fosil merupakan pilihan terbaik untuk menurunkan emisi CO₂. Terlebih lagi pengembangan energi nuklir tidak hanya berguna

untuk meningkatkan suplai listrik dan ketahanan energi, tetapi juga dapat meningkatkan kapasitas suatu negara dalam menurunkan emisi CO₂. Meski demikian, emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan di Kalimantan masih cukup besar dan tidak memenuhi target NZE sekalipun telah diupayakan bauran dari energi bersih. Hal ini diakibatkan oleh pembangkit berbahan bakar fosil yang masih akan dioperasikan di Kalimantan pada waktu yang akan datang (PLN, 2021). Penggunaan batu bara perlu dihentikan jika ingin mencapai target NZE tahun 2060, selain meminimalkan penggunaan gas dan minyak karena kedua jenis bahan bakar ini juga berasal dari sumber fosil yang dapat menghasilkan emisi CO₂.

Dampak dari masuknya bauran energi nuklir dan pembangkit EBT lain sebagai pengganti pembangkit fosil di Kalimantan ternyata tidak hanya berpengaruh terhadap penurunan jumlah emisi CO₂ sebagai gas rumah kaca dan penurunan resiko pemanasan global. namun sekaligus dapat memberikan *co-benefits* terhadap perbaikan kualitas udara. *Co-benefits* secara umum dapat diartikan sebagai manfaat tidak langsung atau manfaat sekunder yang dihasilkan dari suatu kebijakan, program atau kegiatan yang telah direncanakan (Setiadi & Nadhiroh, 2021).

Introduksi PLTN yang dimulai pada tahun 2035 serta pengembangan pembangkit ramah lingkungan lain membawa dampak positif terhadap penurunan emisi pencemar udara. Pada Gambar 10b sampai f, terlihat adanya perbedaan emisi masing-masing parameter pencemar udara (SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, dan PM_{2.5}) yang signifikan, setelah dilakukannya introduksi PLTN dan pengembangan PLT EBT lain. Selain CO₂, emisi pencemar udara pada Skenario 2 diestimasi lebih kecil dibanding Skenario 1 dan pada Skenario 4 akan lebih kecil dibanding Skenario 3. Nilai peningkatan dan penurunan emisi GRK dan parameter pencemar udara pada setiap skenario ditampilkan secara rinci pada Tabel 6.

Tabel 6. Analisis Emisi Sektor Ketenagalistrikan Berdasarkan Hasil Pemodelan

No.	Skenario	Kebutuhan Listrik	Suplai Listrik	Parameter	Selisih Emisi Tahun 2060 dibanding 2020 (ton)	Rerata Penambahan /Penurunan per Tahun (ton)	Persentase Penambahan /Penurunan per Tahun
1	1	Konservatif (BAU)	Konvensional pembangkit fosil	CO ₂	+ 24,6 juta	+ 614,6 ribu	+ 3 %
2				SO ₂	+ 300 ribu	+ 7,5 ribu	+ 3,3%
3				NO _x	+ 51,8 ribu	+ 1,29 ribu	+ 3%
4				CO	+ 4,28 ribu	+ 107	+ 2,6%
5				PM ₁₀	+ 2,18 ribu	+ 54,5	+ 2,7%
6				PM _{2.5}	+ 1,16 ribu	+ 29	+ 2,5%
7	2	Konservatif	Intervensi energi bersih	CO ₂	- 7,37 juta	- 184,3 ribu	- 2,4%
8				SO ₂	- 96,4 ribu	- 2,4 ribu	- 3,8%
9				NO _x	- 16,2 ribu	- 404	- 2,8%
10				CO	- 1,3 ribu	- 32,8	- 1,84%
11				PM ₁₀	- 552	- 13,8	- 1,5%
12				PM _{2.5}	- 267,5	- 6,7	- 1,1%
13	3	Ekspansif	Konvensional pembangkit fosil	CO ₂	+ 27,8 juta	+ 694 ribu	+ 3,2%
14				SO ₂	+ 335 ribu	+ 8,4 ribu	+ 3,5%
15				NO _x	+ 58,2 ribu	+ 1,4 ribu	+ 3,3%
16				CO	+ 5 ribu	+ 124	+ 3%
17				PM ₁₀	+ 2,47 ribu	+ 61,7	+ 3%
18				PM _{2.5}	+ 1,33 ribu	+ 33,2	+ 2,8%
19	4	Ekspansif	Intervensi energi bersih	CO ₂	- 7,24 juta	- 180,9 ribu	- 2,3%
20				SO ₂	- 95,9 ribu	- 2,4 ribu	- 3,8%
21				NO _x	- 16 ribu	- 399	- 2,8%
22				CO	- 1,28 ribu	- 31,9	- 1,7%
23				PM ₁₀	- 530	- 13,3	- 1,3%
24				PM _{2.5}	- 251,9	- 6,3	- 1%

Jika terjadi kondisi pertumbuhan penduduk dan industri konservatif di Kalimantan, kemudian perencanaan suplai listrik dilakukan tanpa mempertimbangkan penurunan emisi

dan mengabaikan introduksi PLTN, maka pada akhir tahun studi (tahun 2060) akan terjadi peningkatan emisi pencemar udara yang signifikan. Sebagaimana ditampilkan pada Tabel 6, emisi SO₂ dan NO_x yang dihasilkan dari pembangkit listrik jauh lebih besar dibandingkan parameter pencemaran udara lainnya. Hasil ini mendukung penelitian yang dilakukan oleh Shahbazi dkk. (2021) dan Zhou dkk. (2021) yang menyatakan bahwa tingginya emisi NO_x dan SO₂ dari sektor pembangkit listrik ini terjadi karena penggunaan kadar sulfur yang tinggi dalam bahan bakar yang digunakan. Akan tetapi jika perencanaan suplai listrik mulai mengupayakan penurunan emisi dan masuknya PLTN dalam bauran energi listrik, maka pada tahun 2060 akan terjadi penurunan emisi pencemar udara dalam jumlah yang cukup besar, sebagaimana disajikan dalam Tabel 6. Dengan kata lain, pada tahun 2060 akan terjadi selisih jumlah emisi SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, dan PM_{2.5} masing-masing sebesar 96%, 92%, 84%, 82%, dan 77% dibandingkan tanpa adanya upaya penurunan emisi dari sektor pembangkit.

Pada Skenario 3 yaitu adanya pertumbuhan populasi penduduk yang disertai industri ekspansif berupa perkembangan kawasan industri, sektor bisnis dan sosial yang pesat disertai pemindahan IKN, namun tidak disertai dengan upaya penurunan emisi di sektor pembangkit, dapat dipastikan terjadi peningkatan emisi pencemar udara yang amat besar pada tahun 2060. Sebagaimana ditampilkan pada Tabel 6, peningkatan emisi pada Skenario 3 lebih besar dibandingkan dengan Skenario 1 karena suplai listrik yang berasal dari pembangkit fosil juga lebih besar. Namun, jika mengupayakan penurunan emisi dari sektor pembangkit listrik dan masuknya PLTN, maka akan terjadi penurunan emisi pencemar udara dengan nilai sebagaimana terlihat pada Tabel 6. Pada kondisi tersebut dapat dikatakan bahwa pada tahun 2060 akan terjadi selisih emisi SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, dan PM_{2.5} masing-masing sebesar 96%, 92%, 85%, 82%, dan 78% dibandingkan tanpa adanya upaya penurunan emisi dari sektor pembangkit.

Co-benefits menjadi hal yang strategis, karena dengannya manfaat sekunder dari sebuah program atau kegiatan bisa tersajikan dengan informasi yang lebih nyata. Selain itu, sejumlah bukti menunjukkan bahwa pengambil kebijakan tertarik untuk mengambil keputusan terhadap perubahan iklim ketika manfaat tambahan yang lebih luas dari kebijakan tersebut lebih terukur. Begitu pun masyarakat akan mendukung kebijakan pemerintah terkait perubahan iklim ketika manfaat tambahan yang lebih luas dari tindakan tersebut lebih nyata, dan menyentuh kehidupannya sehari-hari (Floater dkk., 2016).

Kesimpulan

Pada skenario tanpa upaya penurunan emisi dan pembangunan PLTN, bauran energi listrik di Kalimantan pada tahun 2060 akan didominasi oleh PLTU, diikuti oleh PLTG/GU/MG, dan PLTD yang akan menyumbang sekitar 95% dari total suplai listrik. Namun dengan mempertimbangkan upaya penurunan emisi dan memasukkan energi nuklir dalam bauran energi listrik, suplai listrik dari PLTU di Kalimantan dapat ditekan hingga mencapai kurang dari 1%. Selanjutnya sebagian besar energi listrik akan berasal dari pembangkit ramah lingkungan seperti PLTN, PLTA/MH, dan PLT EBT, dengan persentase berkisar 86-87% dari total suplai listrik, sehingga menghasilkan penurunan emisi GRK pada tahun 2060 sebesar 7,2 hingga 7,4 juta ton CO₂ dan pencemar udara seperti SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, dan PM_{2.5} antara 251,9 hingga 96,4 ribu ton.

Masuknya bauran energi nuklir dan pembangkit ramah lingkungan memiliki *co-benefits* peningkatan kualitas udara. Pengurangan emisi SO₂, NO_x, CO, PM₁₀, dan PM_{2.5} dapat terjadi ketika suplai listrik didasarkan pada energi bersih dan berkelanjutan. Meskipun demikian, emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan di Kalimantan masih signifikan. Untuk mencapai target NZE pada tahun 2060, perlu dilakukan penghentian penggunaan batu bara serta meminimalkan penggunaan gas dan minyak.

Penelitian ini menunjukkan pentingnya upaya penurunan emisi dan pengembangan sumber energi bersih, termasuk penggunaan energi nuklir, untuk mencapai sistem energi yang berkelanjutan dan mengurangi dampak lingkungan negatif dari sektor ketenagalistrikan.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lembaga Pengelola Dana Pendidikan Kementerian Keuangan Republik Indonesia atas dukungan finansial selama masa studi dengan SK Nomor: KET-3097/LPDP.4/ 2022. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Lukmanulhakim Almamalik, S.T., M.T. yang telah memberi masukan yang sangat berarti terhadap model sistem dinamik dalam penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Artika, I., & Chaerul, M. (2020). Model Sistem Dinamik untuk Evaluasi Skenario Pengelolaan Sampah di Kota Depok. *Jurnal Wilayah dan Lingkungan*, 8(3), 261–279.
- BAPPENAS. (2019). *Laporan Implementasi Perencanaan Pembangunan Rendah Karbon 2019*. Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional.
- BAPPENAS. (2021). *Buku Saku Pemindahan Ibu Kota Negara*. Kementerian PPN.
- Bastori, I., & Birmano, Moch. D. (2017). Analisis Ketersediaan Uranium di Indonesia untuk Kebutuhan PLTN Tipe PWR 1000 MWe. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 19(2), 95–102.
- Bastori, I., & Sriyana. (2020). Analisis Risiko Proyek PLTN Kalbar dengan Pendekatan Model AHP dan PMBOK. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 22(1), 39–44.
- BPS. (2021). *Statistik Listrik 2015-2020*. Badan Pusat Statistik.
- Dirjen EBTKE ESDM. (2019, Desember). *Kebijakan Nasional Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi*. Jakarta. Diambil dari <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=Kebijakan+Nasional+Energi+Baru+Terbarukan+dan+Konservasi+Energi>
- EEA. (2019). Energy Industry. Dalam *EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook—Technical guidance to prepare national emission inventories*. European Environment Agency.
- Floater, G., Heeckt, C., Ulterino, M., Mackie, L., Rode, P., Bhardwaj, A., Carvalho, M., Gill, D., Bailey, T., & Huxley, R. (2016). *Co-Benefits of Urban Climate Action: A Framework for Cities*. London School of Economics and Political Science. C40 Cities. Diambil dari http://eprints.lse.ac.uk/68876/1/Cobenefits_Of_Urban_Climate_Action.pdf
- Harjanto, N. T. (2008). Dampak Lingkungan Pusat Listrik Tenaga Fosil dan Prospek PLTN sebagai Sumber Energi Listrik Nasional. *Majalah Ilmiah PIV*, 1(1), 39–50.
- Herawati, N., & Sudagung, A. D. (2020). Persepsi Masyarakat dan Potensi Public Acceptance Terkait Wacana Pembangunan PLTN di Kabupaten Bengkayang. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 22(2), Article 2. <https://doi.org/10.17146/jpen.2020.22.2.6125>
- Hussein, F. N., Sukadana, I. G., Fauzi, R., Hartono, H. G., Sunarko, Adimedha, T. B., & Anwar, A. M. (2020). Potensi Bahaya Gunung Api Terhadap Calon Tapak PLTN, Studi Kasus: Gunung Api Semadum, Kalimantan Barat. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 22(2), 89–100.
- Julianto, F. T., & Suparno. (2016). Analisis Pengaruh Jumlah Industri Besar dan Upah Minimum Terhadap Pertumbuhan Ekonomi di Kota Surabaya. *Jurnal Ekonomi & Bisnis*, 1(2), 229–256. <https://doi.org/10.1234/jeb17.v1i02.914>
- Kementerian ESDM. (2018). *Pedoman Penghitungan dan Pelaporan Inventarisasi Gas Rumah Kaca Bidang Energi—Sub Bidang Ketenagalistrikan*. Dirjen Ketenagalistrikan ESDM.
- Lau, L.-S., Choong, C.-K., Ng, C.-F., Liew, F.-M., & Ching, S.-L. (2019). Is nuclear energy clean? Revisit of Environmental Kuznets Curve hypothesis in OECD countries. *Economic Modelling*, 77, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.econmod.2018.09.015>

- Lewis, C. D. (1982). *Industrial and Business Forecasting Methods*. Butterworth-Heinemann.
- Li, J., Luo, Y., & Wei, S. (2022). Long-term Electricity Consumption Forecasting Method Based on System Dynamics Under the Carbon-Neutral Target. *Energy*, 244, 1–14.
- Liun, E., & Nurlaila. (2021). Kebutuhan Energi untuk Pengolahan Bauksit di Kalimantan Barat. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 23(1), 29–37.
- Menyah, K., & Wolde-Rufael, Y. (2010). CO2 emissions, nuclear energy, renewable energy and economic growth in the US. *Energy Policy*, 38(6), 2911–2915. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.01.024>
- Misna, A. F. (2022, April 21). *Transisi Energi dan Pemberdayaan Perempuan*. Webinar “Peran Perempuan dalam Mendukung Transisi Energi Menuju Net-zero Emission.”
- Mudjiono, Alimah, S., & Susiati, H. (2020). Identifikasi Perubahan Tataguna Lahan di Sekitar Calon Tapak PLTN Kabupaten Bengkayang, Kalimantan Barat. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 22(2), 101–110.
- Mulyono, Priyatmojo, S., & Zulaikhah, U. (2020). Analisis Pengaruh Penggunaan Bahan Bakar Gas dan HSD (High Speed Diesel) Terhadap Kinerja dan Produksi Gas Buang Pembangkit pada Variasi Beban PLTGU X. *EKSERGI Jurnal Teknik Energi*, 16(3), 136–147.
- Nair, K., Shadman, S., Chin, C. M. M., Sakundarini, N., Yap, E. H., & Koyande, A. (2021). Developing A System Dynamics Model to Study The Impact of Renewable Energy in The Short- and Long-Term Energy Security. *Material Science for Energy Technologies*, 4, 391–397.
- P3TEK & BATAN. (2020). *Studi Kelayakan Pembangunan PLTN di Kalimantan Barat*. Kementerian ESDM.
- Partogi, M. A., Kusuma, I. G. B. W., & Astawa, K. (2018). Analisa Unjuk Kerja Sistem PLTG di PT Indonesia Power Unit Pembangkitan Bali. *Jurnal METTEK*, 4(1), 16–22. <https://doi.org/10.24843/METTEK.2018.v04.i01.p03>
- Peng, G., & Xiang, Y. (2022). CO2 Emission Coupled Power Generation Mix Evolution: A System Dynamics Approach. *Energy Reports*, 8, 597–604.
- PLN. (2021). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030*. PT. PLN (Persero).
- Priyanto, H., Mudjiono, & Yosomulyono, S. (2021). Koreksi Geometrik Pemetaan Tataguna Lahan di Sekitar Calon Tapak PLTN Kalimantan Barat. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 23(1), 61–69.
- Puslitbang Tekmira KESDM. (2016). *Data Faktor Emisi CO2 Batubara dan Data Pendukung Lainnya* [Surat Penyampaian Data Faktor Emisi Batubara Nasional (Country Specific)]. Puslitbang Tekmira ESDM.
- Rosadi, M., & Amar, S. (2019). Faktor-faktor yang Mempengaruhi Konsumsi Listrik di Indonesia. *Jurnal Kajian Ekonomi dan Pembangunan*, 1(2), 273–286. <http://dx.doi.org/10.24036/jkep.v1i2.6170>
- Sato, O., Tatematsu, K., & Hasegawa, T. (1998). Reducing future CO2 emissions—The role of nuclear energy. *Progress in Nuclear Energy*, 32(3), 323–330. [https://doi.org/10.1016/S0149-1970\(97\)00092-9](https://doi.org/10.1016/S0149-1970(97)00092-9)
- Setiadi, R., & Nadhiroh, S. Z. (2021). Co-Benefits dalam Mitigasi dan Adaptasi Perubahan Iklim. Dalam *Ketahanan Iklim Perkotaan* (1 ed., Vol. 3, hlm. 35–53). Yayasan Inisiatif Perubahan Iklim dan Lingkungan Perkotaan.
- Shahbazi, H., Abolmaali, A. M., Alizadeh, H., Salavati, H., Zokaei, H., Zandavi, R., Torbatian, S., Yazgi, D., & Hosseini, V. (2021). Development of High-Resolution Emission Inventory to Study the Relative Contribution of A Local Power Plant to Criteria Air Pollutants and Greenhouse Gases. *Urban Climate*, 38, 1–16.
- Suntoko, H. (2014). Identifikasi Daerah Interes Calon Tapak PLTN Kalimantan Barat Berdasarkan Kriteria Umum. *EKSPLORIUM*, 35(1), Article 1. <https://doi.org/10.17146/eksplorium.2014.35.1.1839>
- Suriani, & Keusuma, C. N. (2015). Pengaruh Pembangunan Infrastruktur Dasar Terhadap Pertumbuhan Ekonomi di Indonesia. *Jurnal Ecosains*, 4(1), 1–18.
- Susiati, H., Sukadana, I. G., Susilo, Y. S. B., & Yuliasuti. (2019). Land Suitability Analysis of NPP's Potential Site in East Kalimantan Coastal Using GIS. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 21(1), 53–61.
- Yang, H., Li, X., Ma, L., & Li, Z. (2021). Using System Dynamics to Analyse Key Factors Influencing China's Energy-Related CO2 Emissions and Emissions Reduction Scenarios. *Journal of Cleaner Production*, 320, 1–16.

Zhou, M., Jiang, W., Gao, W., Gao, X., Ma, M., & Ma, X. (2021). Anthropogenic Emission Inventory of Multiple Air Pollutants and Their Spatiotemporal Variations in 2017 for the Shandong Province, China. *Environmental Pollution*, 288, 1–10.