



Potensi Penurunan Emisi CO₂ Sektor Ketenagalistrikan di Provinsi Kalimantan Barat Melalui Bauran Energi Bersih

Potential Reduction of CO₂ Emissions in the Electricity Sector in West Kalimantan Province Through Clean Energy Mix

SUFIANA SOLIHAT¹, RADEN DRIEJANA², ABIMANYU BONDAN WICAKSONO SETIAJI¹

¹Pusat Riset Teknologi Reaktor Nuklir, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang Selatan, 15314, Indonesia

²Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung, Bandung, 40132, Indonesia
sufi001@brin.go.id

ARTICLE INFO

Article history:

Received 10 July 2023

Accepted 8 August 2024

Published 31 January 2025

Keywords:

Electricity Demand Projection

Emission Inventory

System Dynamics

ABSTRACT

Increasing greenhouse gas emissions and climate change have become urgent global challenges. Greenhouse gases, such as carbon dioxide (CO₂), are primarily produced by the electricity sector, especially from burning fossil fuels. West Kalimantan Province faces specific challenges in developing its electricity sector due to the ban on bauxite exports and the increasing energy demand resulting from the expansion of smelter industries. This study aims to assess the potential reduction of CO₂ emissions in West Kalimantan's electricity sector by implementing a clean energy mix, including hydropower, solar energy, and nuclear energy. A system dynamics approach is employed to model complex changes and policy impacts. The projection results indicate that developing clean energy can decrease CO₂ emissions, but achieving a net-zero emission target by 2060 still requires further measures to address fossil fuel power plants.

INFORMASI ARTIKEL

Histori artikel:

Diterima 10 Juli 2023

Disetujui 8 Agustus 2024

Diterbitkan 31 Januari 2025

Kata kunci:

Proyeksi Kebutuhan Listrik

Inventarisasi Emisi

Dinamika Sistem

ABSTRAK

Peningkatan emisi gas rumah kaca dan perubahan iklim menjadi tantangan global yang mendesak. Gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO₂) salah satunya dihasilkan oleh sektor ketenagalistrikan, terutama dari pembakaran bahan bakar fosil. Provinsi Kalimantan Barat menghadapi tantangan khusus dalam pengembangan sektor ketenagalistrikan akibat larangan ekspor bauksit dan kebutuhan energi yang meningkat karena pengembangan industri *smelter*. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji potensi penurunan emisi CO₂ di sektor ketenagalistrikan Kalimantan Barat melalui penerapan bauran energi bersih, termasuk energi air, surya dan nuklir. Pendekatan sistem dinamik digunakan untuk memodelkan perubahan yang kompleks dan dampak kebijakan. Hasil proyeksi menunjukkan bahwa pengembangan energi bersih dapat mengurangi emisi CO₂, tetapi target *net-zero emission* di tahun 2060 masih memerlukan penanganan lebih lanjut terhadap pembangkit berbahan bakar fosil.

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perubahan iklim dan upaya untuk mengurangi emisi gas rumah kaca telah menjadi isu global yang mendesak. Salah satu gas rumah kaca yang paling umum dan berdampak signifikan adalah karbon dioksida (CO₂). CO₂ adalah gas yang terdiri dari satu atom karbon dan dua atom oksigen. Gas ini dihasilkan oleh berbagai aktivitas manusia, terutama pembakaran bahan bakar fosil seperti batubara, minyak, dan gas alam. Ketika emisi CO₂ dan gas rumah kaca lainnya meningkat di atmosfer, suhu rata-rata bumi akan meningkat dan dapat meningkatkan perubahan iklim yang signifikan.

Salah satu sektor yang memiliki kontribusi signifikan terhadap emisi CO₂ adalah sektor ketenagalistrikan (X. Peng dkk., 2021).

Kondisi ketenagalistrikan di Provinsi Kalimantan Barat memiliki tantangan khusus. Provinsi ini kaya akan bauksit yang selama ini diekspor. Namun dengan diberlakukannya Undang-undang Nomor 3 Tahun 2020, larangan ekspor bahan mentah diberlakukan, termasuk bauksit. Hal ini mendorong perlunya pengembangan fasilitas pengolahan berupa *smelter* di Kalimantan Barat untuk mengolah bauksit. Pembangunan industri *smelter* akan memberikan dampak positif bagi pertumbuhan ekonomi daerah dan peningkatan kesejahteraan masyarakat, namun di saat yang sama akan

menimbulkan kenaikan permintaan energi yang signifikan di Kalimantan Barat. Pengembangan industri *smelter* membutuhkan daya listrik yang sangat besar, menyebabkan peningkatan signifikan dalam kebutuhan listrik di wilayah tersebut. Pengolahan dari alumina menjadi satu juta ton aluminium per tahun membutuhkan ketersediaan pembangkit listrik sebesar 2000 MW (Liun & Nurlaila, 2021). Namun di sisi lain, pada tahun 2020 Kalimantan Barat masih mengalami defisit suplai listrik dan masih melakukan impor listrik dari Sistem Serawak (Malaysia). Hal ini menandakan bahwa kebutuhan listrik belum terpenuhi sepenuhnya. Selain itu, bauran pembangkit listrik di wilayah ini masih didominasi oleh pembangkit fosil yang dapat menghasilkan emisi CO₂ yang signifikan (BPS, 2021). Jika pengembangan pembangkit dilakukan dengan bauran yang sama seperti saat ini, maka emisi CO₂ akan terus meningkat seiring dengan peningkatan kebutuhan listrik.

Kebutuhan listrik yang semakin besar tentunya harus diimbangi dengan suplai listrik yang besar pula. Untuk mengurangi emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan, upaya peningkatan penggunaan energi bersih menjadi sangat penting. Di samping itu, pemerintah Indonesia menargetkan penurunan emisi gas rumah kaca hingga mencapai *net-zero emission* (NZE) pada tahun 2060 (PLN, 2021). Oleh karena itu, pengembangan sektor ketenagalistrikan di Kalimantan Barat perlu difokuskan pada energi bersih, diantaranya energi air, energi surya dan angin sebagai energi baru terbarukan, serta energi nuklir yang mampu menghasilkan daya besar tanpa menghasilkan emisi gas rumah kaca selama proses pembangkitan (Lau dkk., 2019). Hal ini diperkuat dengan hasil kajian yang telah dilakukan oleh Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang menyatakan bahwa 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).

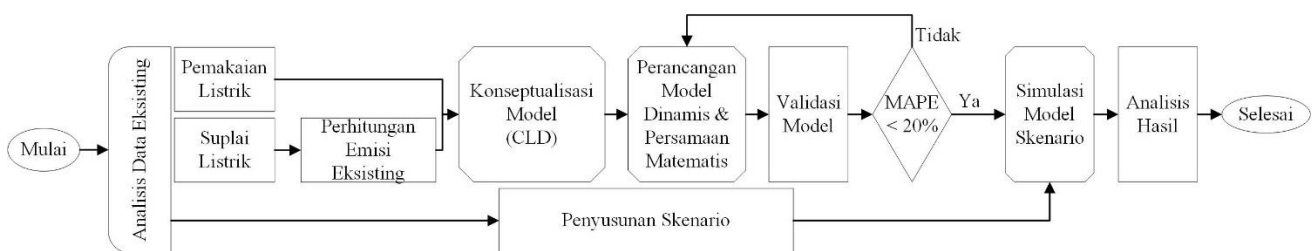
1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk mengetahui potensi penurunan emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan di Kalimantan Barat melalui penerapan bauran energi bersih.

2. METODE

Metode yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah pendekatan sistem dinamik. Pilihan menggunakan metode sistem dinamik didasarkan pada kemampuannya untuk menyelesaikan masalah yang kompleks dengan implikasi kebijakan, serta kemampuannya untuk menganalisis dengan baik evolusi dinamis dari sistem yang kompleks (Li dkk., 2022; G. Peng & Xiang, 2022). Pendekatan pemodelan sistem dinamik juga telah digunakan dalam proses evaluasi ulang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK) dan untuk memahami keterkaitan antar sektor dalam pengambilan kebijakan (BAPPENAS, 2019).

Pendekatan sistem dinamik yang diaplikasikan dalam penelitian ini menggunakan bantuan perangkat lunak Vensim PLE 9.3.4. Versi ini dirilis pada bulan September 2022 dengan beberapa pembaruan dibanding versi sebelumnya dan tersedia secara gratis untuk keperluan penelitian. Pendekatan ini melibatkan beberapa langkah, meliputi proyeksi kebutuhan listrik di masa depan, perhitungan emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan, pembuatan *causal loop diagram* untuk menganalisis hubungan antara variabel yang terlibat, perancangan model dinamis dengan persamaan matematis yang sesuai, validasi model menggunakan data empiris, simulasi skenario, dan analisis hasil untuk menentukan berapa potensi penurunan emisi CO₂ yang dapat dicapai dari sektor ketenagalistrikan di Kalimantan Barat. Bagan alir metodologi penelitian ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Bagan Alir Metodologi Penelitian

Data eksisting yang digunakan adalah data terkait pemakaian listrik oleh setiap sektor pelanggan, jenis pembangkit beserta jumlah listrik yang dihasilkan, serta data bahan bakar yang digunakan oleh pembangkit listrik yang ada di Provinsi Kalimantan Barat dengan tahun dasar 2022. Data histori jumlah penduduk dan data keekonomian di Provinsi Kalimantan Barat selama tahun 2011 sampai 2022 juga digunakan untuk mengetahui laju pertumbuhan yang nantinya akan berguna dalam memproyeksikan jumlah pelanggan berbagai sektor di masa yang akan datang.

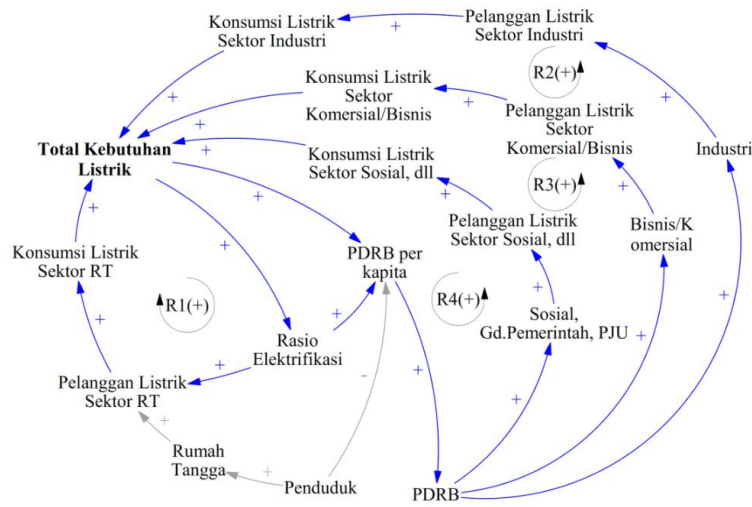
2.1 Pemodelan Sistem Dinamik Kebutuhan Listrik

Hubungan sebab-akibat terkait kebutuhan listrik digambarkan dalam *causal loop diagram* (CLD) pada Gambar 2.

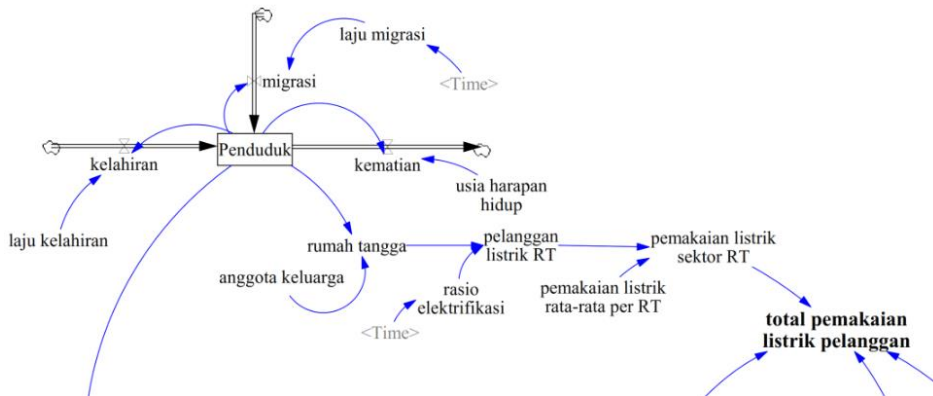
Pelanggan rumah tangga dan industri, serta pelanggan sektor lainnya berpengaruh positif dan signifikan terhadap konsumsi listrik di suatu wilayah (Rosadi & Amar, 2019). Pelanggan listrik berasal dari beberapa sektor, yaitu pelanggan sektor rumah tangga, sektor industri, sektor bisnis/komersial, serta sektor sosial, gedung pemerintah dan penerangan jalan umum (PJU). *Loop* R1(+) menggambarkan hubungan saling menguatkan antar variabel pemakaian listrik sektor rumah tangga, yang dipengaruhi oleh jumlah penduduk dan rasio elektrifikasi di suatu wilayah. Sementara faktor penting yang mempengaruhi pemakaian listrik pada sektor industri, bisnis, dan sosial yaitu kondisi perekonomian di suatu wilayah yang dinyatakan dalam Produk Domestik Regional Bruto (PDRB). *Loop* R2(+), R3(+), dan R4(+) masing-

masing menggambarkan hubungan yang saling menguatkan antar variabel pemakaian listrik sektor industri, bisnis, dan sosial.

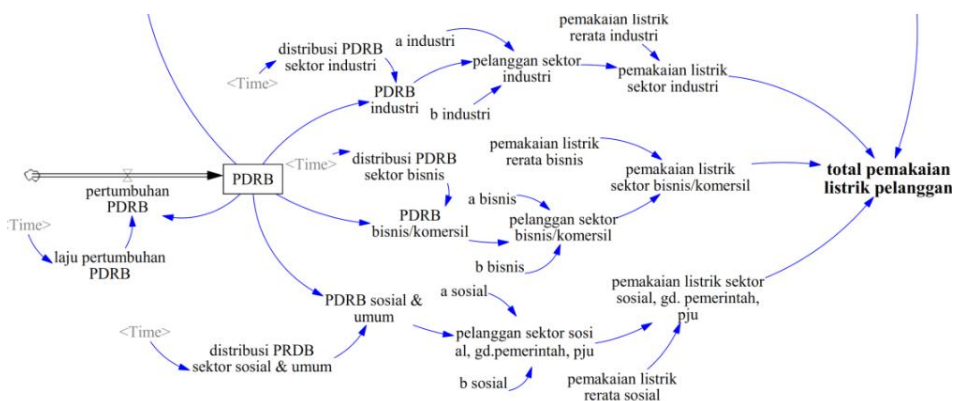
Sub-sistem pelanggan rumah tangga ditunjukkan pada Gambar 3, sedangkan Sub-sistem pelanggan sektor industri, bisnis, dan sosial ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 2. CLD sistem kebutuhan listrik



Gambar 3. Model dinamik sub-sistem pelanggan rumah tangga



Gambar 4. Model dinamik sub-sistem pelanggan sektor industri, bisnis, dan sosial

Persamaan yang digunakan antara lain:

$$Penduduk(t) = Penduduk(t - dt) + (Kelahiran + Migrasi - Kematian) \times dt \dots\dots\dots (1)$$

$$Rumah\ Tangga(t) = \frac{Penduduk(t)}{Jumlah\ anggota\ dalam\ Rumah\ Tangga} \dots\dots\dots (2)$$

$$Pelanggan\ Sektor\ RT(t) = Rumah\ Tangga(t) \times Rasio\ Elektrifikasi \dots\dots\dots (3)$$

$$Pemakaian\ listrik\ sektor\ RT(t) = Pelanggan\ Sektor\ RT(t) \times Pemakaian\ listrik\ rerata\ per\ RT \dots\dots\dots (4)$$

Data awal pada tahun 2022, jumlah penduduk di Provinsi Kalimantan Barat sebanyak 5.541.376 jiwa dengan rata-rata jumlah anggota keluarga 4 orang/rumah tangga. Rasio elektrifikasi di Kalimantan Barat pada tahun 2022 sebesar 93,91% dengan pemakaian listrik rata-rata 0,001518 GWh/rumah tangga (PLN, 2022). Dalam penelitian ini diasumsikan rasio elektrifikasi akan menjadi 100% mulai tahun 2025.

Proyeksi jumlah pelanggan listrik sektor bisnis, industri, dan sosial diperoleh secara statistik dari persamaan regresi yang dipengaruhi oleh variabel PDRB, yang nilainya diperoleh dari hasil perkalian PDRB berdasarkan nilai konstan (2010) dengan persentase distribusi PDRB setiap sektor rata-rata histori tahun 2011-2020. Persamaan matematis yang digunakan yaitu:

$$PDRB(t) = PDRB(t - dt) + Laju\ Pertumbuhan\ PDRB \times dt \dots\dots\dots (5)$$

$$PDRB_i(t) = PDRB(t) \times Persentase\ distribusi\ PDRB_i \dots\dots\dots (6)$$

$$Jumlah\ Pelanggan_i(t) = a_i \times PDRB_i(t) + b_i \dots\dots\dots (7)$$

$$Pemakaian\ listrik\ non\ RT_i(t) = Jumlah\ pelanggan_i(t) \times Pemakaian\ listrik\ rerata\ non\ RT_i \dots\dots (8)$$

Keterangan:

i = sektor industri/bisnis/sosial.

Sehingga,

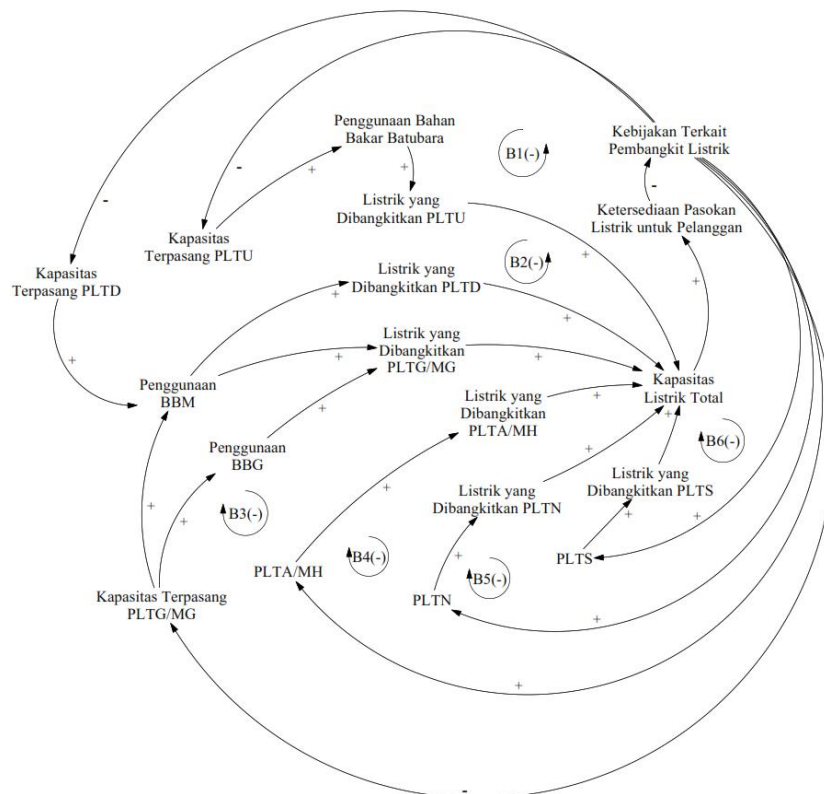
$$Total\ Pemakaian\ Listrik\ Pelanggan(t) = Pemakaian\ Listrik\ Sektor\ RT(t) + Pemakaian\ Listrik\ Non\ RT_i(t) \dots\dots (9)$$

Adapun data awal PDRB Kalimantan Barat tahun 2022 sebesar Rp 148.369 miliar, dengan persentase distribusi PDRB sektor industri, bisnis, dan sosial masing-masing sebesar 31,98%, 60,40%, dan 7,62%. Sementara pemakaian listrik rerata setiap sektor non rumah tangga di Kalimantan Barat yaitu 0,32 GWh/industri, 0,0077 GWh/bisnis, dan 0,0081 GWh/sosial (BPS, 2023; PLN, 2022).

eksisting di Kalimantan Barat diantaranya bersumber dari pembangkit berbahan bakar fosil seperti PLTU, PLTD, dan PLTG/MG, serta pembangkit non fosil seperti PLTA/MH dan PLTS. Bahan bakar yang digunakan oleh PLTU di Kalimantan Barat adalah batu bara berkalori rendah/Low Rank Coal (LRC). Sementara yang digunakan pada PLTD adalah bahan bakar minyak (BBM) berupa minyak solar/High Speed Diesel (HSD) dan minyak bakar/Marine Fuel Oil (MFO). Sedangkan PLTG/MG ada yang menggunakan BBM dan ada pula yang menggunakan bahan bakar gas (BBG) berupa gas bumi dan gas alam cair/Liquefied Natural Gas (LNG) sebagai bahan bakarnya (Solihat, 2023).

2.2 Pemodelan Sistem Dinamik Suplai Listrik dan Emisi Sektor Ketenagalistrikan

Hubungan sebab akibat terkait penyediaan listrik digambarkan dalam CLD pada Gambar 5. Suplai listrik

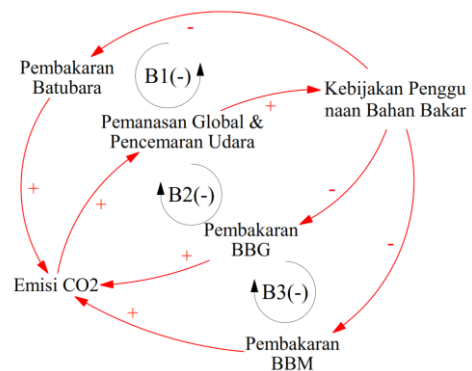


Gambar 5. CLD sistem suplai listrik

Dalam perencanaan ke depan, PLTN akan masuk ke dalam bauran ketenagalistrikan di Kalimantan Barat. Sementara hubungan yang saling berimbang antar variabel dalam sistem emisi sektor ketenagalistrikan digambarkan dalam CLD pada Gambar 6. Pada CLD tersebut, Loop B1, B2, dan B3 menunjukkan hubungan positif antara penggunaan bahan bakar di sektor ketenagalistrikan, semakin banyak bahan bakar yang digunakan, semakin banyak pula emisi CO₂ yang dihasilkan.

Simulasi model sistem dinamik untuk sistem suplai listrik dan emisi dimulai dari perhitungan total suplai listrik. Besarnya suplai listrik yang dibutuhkan diperoleh dari total pemakaian listrik pelanggan ditambah cadangan/*reserve margin*. *Reserve margin* adalah cadangan daya pembangkit terhadap beban puncak yang dinyatakan dalam persen (%). Dalam penelitian ini *reserve margin* yang digunakan sebesar 35% (PLN, 2021; Solihat, 2023). Setelah nilai total suplai listrik diperoleh, dapat dihitung suplai listrik yang dibangkitkan

oleh pembangkit listrik, serta emisi yang dihasilkan setiap jenis pembangkit fosil.



Gambar 6. CLD sistem emisi ketenagalistrikan

Persamaan matematis yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Total\ Suplai\ Listrik(t) = Total\ Pemakaian\ Listrik\ Pelanggan(t) + \left(Total\ Pemakaian\ Listrik\ Pelanggan(t) + \frac{35}{100} \right) \quad (10)$$

$$Listrik\ yang\ dibangkitkan\ pembangkit_j(t) = Total\ Suplai\ Listrik(t) \times Proporsi\ bauran\ pembangkit_j(t) \dots\dots\dots \quad (11)$$

$$Konsumsi\ bahan\ bakar\ pembangkit_j(t) = Listrik\ yang\ dibangkitkan\ pembangkit_j(t) \times Konsumsi\ bahan\ bakar\ per\ GWh \quad (12)$$

Keterangan:

j = jenis pembangkit (PLTU/PLTD/PLTG/MG/PLTA/MH/PLTN/PLTS)

Perhitungan emisi CO₂ dilakukan dengan mengacu pada metode IPCC 2006 yang telah diadaptasi dalam buku Pedoman Penghitungan dan Pelaporan Inventarisasi GRK. Faktor emisi CO₂ bahan bakar fosil menggunakan faktor emisi nasional (*Tier-2*) (Kementerian ESDM, 2018). Persamaan matematis yang digunakan untuk menghitung emisi CO₂ yaitu:

$$Emisi_{CO_2} = Data\ Aktivitas \times Faktor\ Emisi_{CO_2} \quad (13)$$

2.3 Validasi Model

Validasi sebagai pengujian ketepatan proyeksi dilakukan secara statistik dengan *Mean Absolute Percentage Error* (MAPE). MAPE mengindikasikan seberapa besar kesalahan dalam meramal yang dibandingkan dengan nilai nyata pada deret. MAPE dihitung dengan persamaan berikut:

$$MAPE = \frac{\sum \left| \frac{(data\ asli - data\ hasil\ model)}{data\ asli} \right|}{jumlah\ data} \times 100 \quad (14)$$

dengan interpretasi nilai MAPE sebagai berikut: <10% (sangat baik), 10%-20% (baik), 20%-50% (wajar), dan >50% (tidak akurat) (Lewis, 1982).

Data asli yang dimaksud adalah data histori variabel-variabel yang dimodelkan selama 10 tahun terakhir, diantaranya jumlah penduduk, jumlah pelanggan listrik beserta pemakaian listriknya, dan PDRB. Sementara data hasil model merupakan data hasil pemodelan variabel-variabel tersebut selama periode yang sama.

2.4 Penyusunan Skenario

Roadmap bauran energi yang telah tersedia diantaranya bersumber dari RUPTL PLN 2021-2030 mengenai proyeksi

bauran energi listrik di setiap provinsi, serta P3TEK Kementerian ESDM dan BATAN mengenai rencana pengembangan pembangkit dan bauran energi listrik di Provinsi Kalimantan Barat 2021-2050. Proyeksi-proyeksi tersebut memberikan gambaran bagaimana rencana pemerintah dalam mensuplai listrik di waktu mendatang, yang selanjutnya menjadi bahan pertimbangan dalam menyusun skenario. Ditetapkan 2 skenario dalam penelitian ini. Pada Skenario 1, terjadi pertumbuhan kebutuhan listrik yang ekspansif karena perkembangan industri *smelter* di Kalimantan Barat, dengan suplai listrik tetap berasal dari proporsi bauran jenis pembangkit seperti yang ada saat ini, yakni didominasi pembangkit fosil, tanpa impor listrik dari Serawak. Sementara pada Skenario 2 yang membedakan adalah suplai listrik yang berasal dari PLTU berkurang secara bertahap, kemudian digantikan dengan bauran energi bersih seperti air, surya dan nuklir. Penurunan proporsi PLTU ini merupakan asumsi yang berdasarkan pada RUPTL PLN (tahun dasar hingga 2030) dan studi BATAN-P3TEK ESDM, serta draf RUKN 2023-2060 (untuk tahun 2031-2060). Di dalam draf RUKN, penyediaan tenaga listrik untuk kepentingan umum dengan menggunakan PLTD harus dikurangi secara bertahap dan dibatasi beroperasi paling lama sampai tahun 2030. Selanjutnya PLTD harus diganti dengan pembangkit berbasis energi baru dan energi terbarukan (EBET), sehingga dalam hal ini mungkin menjadi biodiesel tetapi tetap dinyatakan sebagai PLTD (Ditjen Ketenagalistrikan, 2023). Namun karena mempertimbangkan faktor emisi PLTD konvensional maupun biodiesel yang tidak jauh berbeda, sehingga dalam tabel proporsi PLTD masih ada hingga tahun 2060 (BAPPENAS, 2014). Pada Skenario 2 ini, PLTN akan masuk ke dalam bauran mulai tahun 2035. Data input proporsi bauran pembangkit untuk kedua skenario tersebut ditampilkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data input proporsi bauran pembangkit listrik untuk Skenario 1 dan 2 (%)

Jenis Pembangkit	2022*	2030		2040		2050		2060	
		S 1	S2	S1	S2	S1	S2	S1	S2
PLTU	54,2	55	45	56	35	57	24	58	0
PLTG/MG	0,07	0,07	0,07	0,1	0,1	0,15	0,15	0,2	0,2
PLTD	15,95	15	15	14	14	13	13	12,5	12,5
PLTA/MH	29,77	30	35	30	36	30	37	29	40
PLTN	0	0	0	0	10	0	20	0	40
PLTS	0,0003	0,01	5	0,2	5	0,3	6	0,4	7

Keterangan: *Proporsi berdasarkan data Statistik Listrik 2017-2021

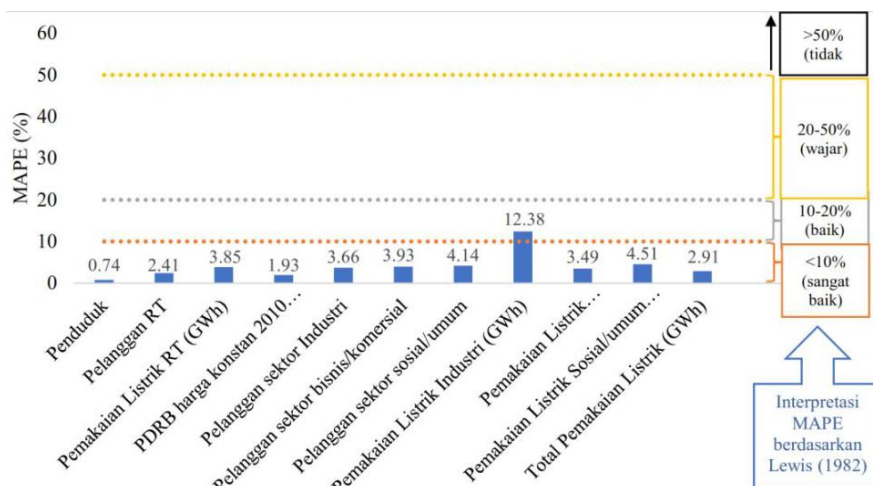
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Terdapat tiga sistem utama dalam penelitian ini sebagaimana digambarkan dalam CLD-nya masing-masing pada Gambar 2, 5, dan 6, serta sub-sistem pelanggan sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3 dan 4. Dalam sistem pelanggan, jumlah pelanggan listrik pada sektor rumah tangga di suatu wilayah dipengaruhi oleh jumlah penduduk dan rasio elektrifikasi di wilayah tersebut. Adapun yang mempengaruhi tingkat rasio elektrifikasi di suatu wilayah adalah konsumsi listrik di wilayah itu sendiri. Sementara untuk pelanggan non rumah tangga, salah satu faktor penting yang dapat meningkatkan jumlah industri, bisnis/komersil, serta fasilitas sosial di suatu wilayah adalah kondisi perekonomian di wilayah tersebut, yang dinyatakan dalam PDRB. Jumlah industri memiliki pengaruh besar terhadap pertumbuhan ekonomi, yakni dapat memberikan pengaruh yang positif terhadap peningkatan PDRB, serta adanya peningkatan yang positif dari segi kondisi sosial dan ekonomi masyarakat. Begitupun sebaliknya, sehingga semakin besar nilai PDRB di suatu daerah, maka akan menunjang peningkatan pada sektor industri, bisnis, begitu pun fasilitas sosial di daerah tersebut. (Julianto & Suparno, 2016; Nuraeni, 2018). Pada sistem suplai listrik, semakin besar daya listrik yang dihasilkan pembangkit konvensional maka semakin banyak juga jumlah bahan bakar yang digunakan, misalnya batu bara, minyak, dan gas. Pembangkit non konvensional yang ramah lingkungan memiliki korelasi positif dengan kebijakan. Semakin ketat kebijakan mengenai pembangkit listrik, yaitu semakin rendahnya suplai listrik yang berasal dari PLTU, PLTD, PLTG/MG/GU, maka semakin besar suplai listrik yang perlu dihasilkan oleh PLTA/MH dan PLT EBT, serta semakin besar pula potensi pemanfaatan PLTN untuk menyuplai listrik kepada para pelanggan. Pada

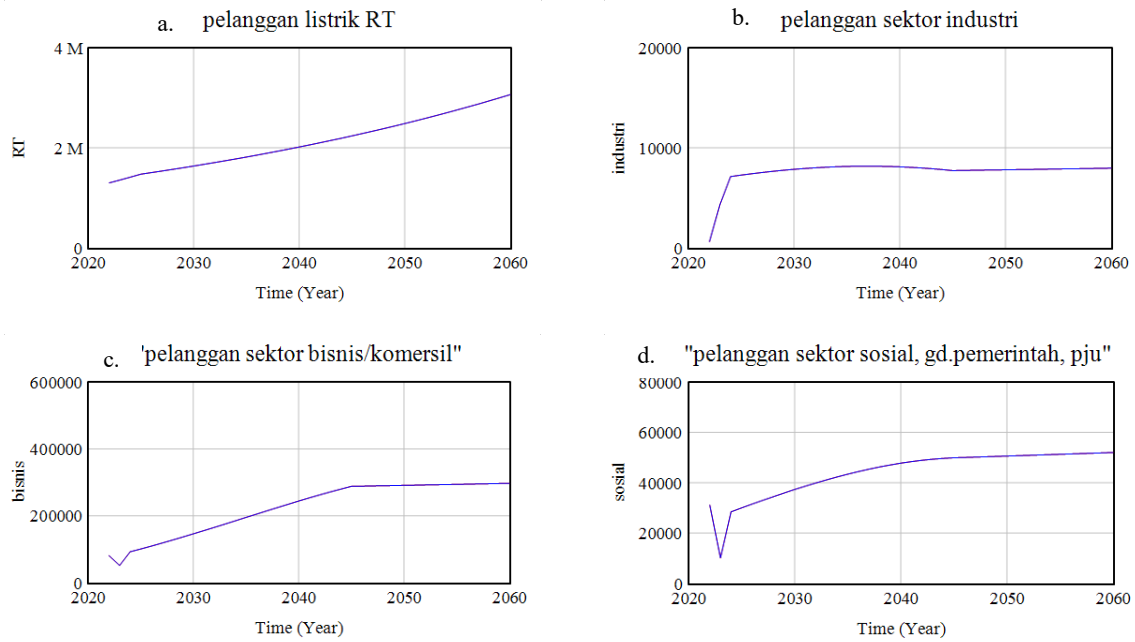
sistem emisi sektor pembangkit sudah pasti bahwa semakin banyak bahan bakar fosil yang digunakan, akan semakin banyak emisi yang dihasilkan dan menyebabkan penurunan kualitas lingkungan dengan terjadinya pemanasan global dan pencemaran udara.

Hasil validasi model terhadap variabel-variabel penelitian dibandingkan dengan data aktual Provinsi Kalimantan Barat ditampilkan pada Gambar 7. Hasil simulasi model dari 10 variabel memiliki rata-rata tingkat kesalahan yang kecil dengan nilai MAPE < 10%. Hanya variabel pemakaian listrik sektor industri yang memiliki nilai MAPE pada rentang 10-20%. Berdasarkan Lewis (1982), hal ini berarti model proyeksi yang dibuat termasuk kategori baik dan layak digunakan.

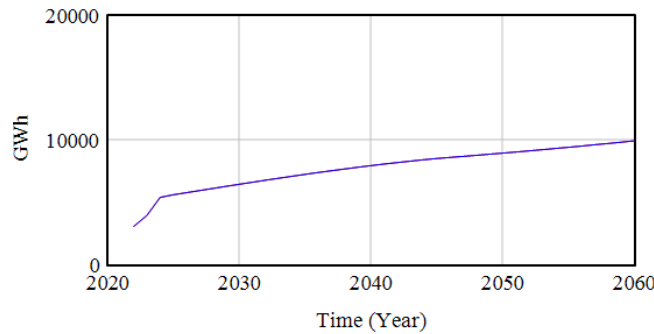
Jumlah pelanggan listrik sektor rumah tangga dipengaruhi oleh rasio elektrifikasi serta rerata jumlah anggota keluarga dalam suatu rumah tangga. Hasil proyeksi jumlah pelanggan rumah tangga di Provinsi Kalimantan Barat ditampilkan pada Gambar 8.a. jumlah pelanggan listrik sektor rumah tangga mengalami peningkatan sebanyak 1,76 juta pelanggan sejak tahun 2022 hingga 2060, dengan rata-rata peningkatan per tahun sebanyak 46.413 pelanggan. Sedangkan hasil proyeksi jumlah pelanggan sektor industri, bisnis, dan sosial ditampilkan pada Gambar 8. b, c, dan d. Kurva jumlah pelanggan sektor non rumah tangga meningkat secara signifikan sekitar tahun 2024 akibat mulai beroperasinya industri *smelter* yang dapat berimbas pada pertumbuhan PDRB Provinsi Kalimantan Barat. Jumlah pelanggan listrik sektor industri meningkat sebanyak 7.345 pelanggan sejak tahun 2022 hingga 2060, dengan rerata pertumbuhan 193 pelanggan/tahun. Sedangkan jumlah pelanggan sektor bisnis dan sosial mengalami peningkatan antara tahun 2022-2060, dengan jumlah masing-masing 216.090 pelanggan bisnis dan 20.899 pelanggan sosial.



Gambar 7. Hasil validasi MAPE untuk variabel-variabel pemodelan



Gambar 8. Hasil proyeksi jumlah pelanggan listrik di Kalimantan Barat

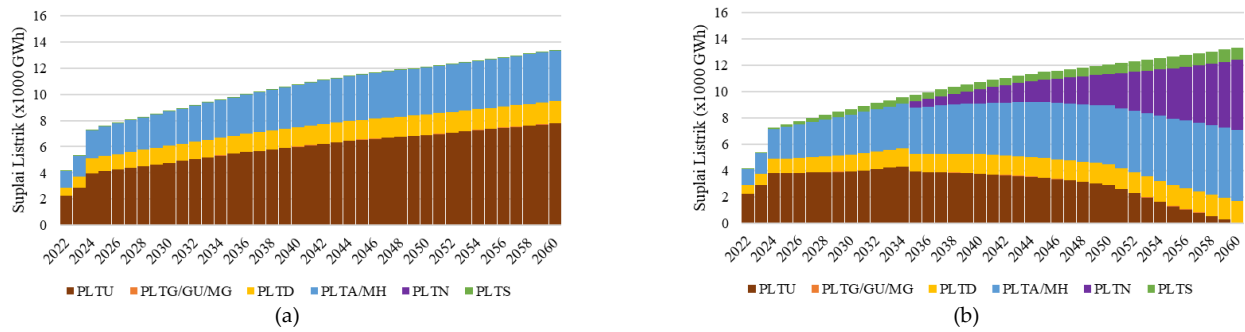


Gambar 9. Proyeksi total pemakaian listrik di Kalimantan Barat

Proyeksi total pemakaian listrik dari keempat sektor pelanggan Kalimantan Barat hingga tahun 2060 ditampilkan pada Gambar 9. Berdasarkan hasil simulasi, total pemakaian listrik pelanggan di Kalimantan Barat mengalami peningkatan sebesar 6.860,8 GWh antara tahun 2022-2060 dengan rata-rata peningkatan per tahun 181 GWh. Adapun total pemakaian listrik dari seluruh sektor pelanggan pada tahun 2060 diperkirakan mencapai 9.913,2 GWh. Dengan demikian, jumlah pasokan listrik yang harus tersedia pada tahun 2060 sebesar 13.382,8 GWh. Sebagai perbandingan, proyeksi kebutuhan listrik tahun 2022-2030 hasil pemodelan ini dibandingkan dengan hasil proyeksi RUPTL PLN pada tahun yang sama. Rata-rata peningkatan kebutuhan listrik Kalimantan Barat antara tahun 2022-2030 versi RUPTL sebesar 6,35%, sedangkan rata-rata peningkatan hasil model ini sebesar 10%. Perbedaan ini karena diasumsikan adanya pengembangan kawasan industri *smelter* yang besar pada tahun 2023 dan 2024 tersebut sehingga terjadinya lonjakan kebutuhan listrik pada tahun tersebut. Kemudian proyeksi dilanjutkan hingga tahun 2060, dengan rata-rata persentase peningkatan kebutuhan listrik antara tahun 2022-2060 sebesar 3,35%. Hasil proyeksi hingga tahun 2060 ini tidak dapat dibandingkan dengan RUPTL PLN

maupun rancangan RUKN. Hal ini karena dalam RUPTL PLN proyeksi hanya sampai tahun 2030, sementara dalam RUKN proyeksi kebutuhan listrik dilakukan untuk skala nasional sehingga tidak dapat dibandingkan dengan kondisi Kalimantan Barat.

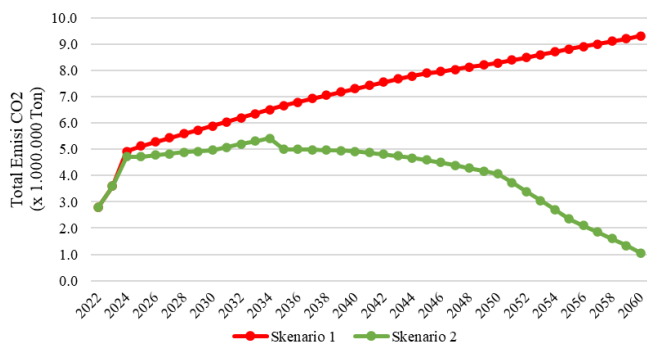
Berdasarkan rancangan skenario yang ditetapkan, terlihat proporsi bauran listrik dari berbagai jenis pembangkit di Kalimantan Barat setiap tahunnya sebagaimana ditampilkan pada Gambar 10. Pada Skenario 1 terlihat suplai listrik dari PLTU meningkat dari tahun ke tahun hingga akhir tahun 2060 menempati proporsi bauran terbanyak. Bauran listrik dari PLTA/MH menempati urutan kedua setelah PLTU. Kemudian suplai listrik dari PLTD secara konstan hingga akhir tahun 2060 menempati urutan ketiga dalam bauran ketenagalistrikan di Kalimantan Barat. Selanjutnya diikuti dengan bauran listrik dari PLTG/MG, dan PLTS dalam proporsi yang lebih kecil. Belum ada bauran PLTN pada Skenario 1. Pada Skenario ini bauran pembangkit berbahan bakar fosil mendominasi, sehingga konsumsi bahan bakar fosil seperti batubara, BBM, dan BBG juga semakin besar. Hal ini tentu akan berdampak terhadap peningkatan jumlah emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan.



Gambar 10. Perbandingan bauran pembangkit listrik di Kalimantan Barat pada Skenario (a) 1 dan (b) 2

Pada Skenario 2, bauran listrik dari PLTU terlihat mendominasi hingga kisaran tahun 2034, kemudian jumlahnya terus menurun karena adanya kebijakan penghentian batu bara sehingga tidak ada penambahan PLTU. Hingga pada tahun 2060 bauran PLTU menjadi 0%. Bauran listrik dari PLTD di Kalimantan Barat terlihat konstan sejak awal hingga akhir periode proyeksi. Untuk memenuhi kebutuhan listrik di Kalimantan Barat, pengembangan PLTA/MH dilakukan sebagaimana telah direncanakan dalam RUPTL PLN (PLN, 2021). Suplai listrik dari PLTN pada Skenario ini akan masuk ke dalam bauran ketenagalistrikan mulai tahun 2035 dan terus meningkat seiring waktu. Meskipun pada skenario ini tidak ada bauran listrik dari PLTU pada tahun 2060 dan pengembangan ketenagalistrikan difokuskan pada pembangkit yang ramah lingkungan, namun penggunaan bahan bakar fosil seperti minyak dan gas pada sektor ketenagalistrikan masih ada.

Hasil proyeksi total emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan di Kalimantan Barat ditampilkan pada Gambar 11. Pada Skenario 1 terjadi peningkatan emisi CO₂ yang signifikan hingga mencapai 9,3 juta ton CO₂ pada tahun 2060. Rata-rata pertambahan emisi CO₂ per tahun dari sektor ketenagalistrikan di Kalimantan Barat sebesar 171,6 ribu ton (3,43%). Peningkatan emisi yang luar biasa ini sejalan dengan semakin meningkatnya kebutuhan listrik yang harus terpenuhi, sehingga dengan mengandalkan suplai listrik dari pembangkit fosil (PLTU, PLTD, dan PLTG/MG) secara otomatis emisi CO₂ semakin tidak terkendali.



Gambar 11. Hasil pemodelan total emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan di Kalimantan Barat pada Skenario 1 dan 2

Hal yang lebih baik terkait besaran emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan diperkirakan akan terjadi jika pemenuhan kebutuhan listrik Kalimantan Barat di masa depan lebih mengutamakan bauran pembangkit energi bersih, seperti air, nuklir dan surya. Sebagaimana terlihat dalam kurva hasil

pemodelan Skenario 2, emisi CO₂ sektor ketenagalistrikan terlihat meningkat cukup pesat hingga sekitar tahun 2024 bertepatan dengan pengembangan industri *smelter*. Kemudian kurva sedikit tumbuh hingga tahun 2034, lalu menurun perlahan mulai tahun 2035, bertepatan dengan rencana masuknya bauran energi nuklir. Jika diperhatikan dengan seksama, selama tahun 2035 hingga 2060 rata-rata penurunan emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan di Kalimantan Barat sebesar 167,3 ribu ton (5,89%) per tahun. Secara keseluruhan pada akhir tahun 2060 diperkirakan emisi CO₂ sektor ketenagalistrikan sebesar 1,06 juta ton CO₂, dengan rata-rata penurunan emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan selama tahun 2022-2060 sebesar 45,4 ribu ton (2,08%) per tahun. Emisi CO₂ dari sektor ketenagalistrikan di Kalimantan Barat ini masih tergolong besar dan ternyata tidak memenuhi target NZE, sekalipun baruan dari pembangkit energi bersih telah di kembangkan. Hal ini dikarenakan bauran PLTD masih lebih besar dari 10% dari bauran listrik total di Kalimantan Barat selama beberapa waktu mendatang. Sekalipun misalnya bahan bakar PLTD diganti menjadi biodiesel, namun ternyata faktor emisinya masih cukup besar yakni 70,8 ton CO₂/TJ, sementara faktor emisi bahan bakar PLTD konvensional yang digunakan dalam penelitian ini sebesar 74,1 ton CO₂/TJ, sehingga secara perhitungan emisi CO₂ masih cukup besar. (BAPPENAS, 2014). Proyeksi emisi dari sektor ketenagalistrikan juga dilakukan oleh PLN dan Kementerian ESDM yang diterbitkan dalam RUPTL PLN 2021-2030 dan Draf RUKN 2023-2060, dengan skenario dan hasil yang berbeda. Baik dalam RUPTL maupun RUKN, proyeksi emisi ditampilkan untuk Regional Kalimantan secara keseluruhan. Dalam dokumen tersebut, bauran energi pembangkitan Regional Kalimantan diproyeksikan akan didominasi oleh energi baru terbarukan dan nuklir pada akhir tahun 2060. Sementara itu seluruh pembangkit fosil memasuki masa *retrofitting*, sehingga pada tahun 2059 emisi pada pembangkitan tenaga listrik mendekati nol (Ditjen Ketenagalistrikan, 2023; PLN, 2021).

4. KESIMPULAN

Penelitian ini mengkaji potensi penurunan emisi CO₂ di sektor ketenagalistrikan Provinsi Kalimantan Barat melalui penerapan bauran energi bersih, termasuk energi air, surya, dan nuklir, menggunakan pendekatan sistem dinamik. Hasil kajian menunjukkan bahwa pengembangan energi bersih memiliki potensi besar untuk mengurangi emisi CO₂ secara signifikan. Energi air menjadi pilihan prioritas utama karena ketersediaannya yang melimpah dan dampak lingkungan yang minimal. Energi surya juga memiliki potensi signifikan,

terutama di daerah dengan sinar matahari melimpah, sementara energi nuklir dapat menjadi solusi jangka panjang dengan efisiensi tinggi. Untuk mencapai target *net-zero emission* pada tahun 2060, diperlukan tindakan kebijakan yang mendukung pengembangan infrastruktur energi bersih dan pemberian insentif fiskal untuk mendorong investasi di sektor ini. Selain itu, dukungan terhadap penelitian dan pengembangan teknologi energi bersih sangat penting untuk meningkatkan efisiensi dan menurunkan biaya produksi. Peningkatan edukasi dan kesadaran masyarakat mengenai pentingnya transisi ke energi bersih juga dapat mendukung penerimaan dan partisipasi publik dalam program ini. Namun, untuk mencapai target tersebut, penanganan lebih lanjut terhadap pembangkit listrik berbahan bakar fosil masih diperlukan melalui strategi pengurangan bertahap dan penerapan teknologi bersih seperti penangkapan dan penyimpanan karbon. Dengan menerapkan rekomendasi ini, Provinsi Kalimantan Barat dapat mengurangi emisi CO₂ secara signifikan, memenuhi kebutuhan energi yang meningkat akibat pengembangan industri smelter, dan bergerak menuju pencapaian target *net-zero emission* di tahun 2060. Kajian ini memberikan panduan konkret bagi pembuat kebijakan dalam menentukan prioritas pengembangan energi dan tindakan yang perlu diambil untuk memastikan keberhasilan transisi energi bersih.

PERSANTUNAN

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Bapak Lukmanulhakim Almamalik, S.T., M.T. yang telah memberikan masukan yang sangat berarti terhadap model sistem dinamik dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- BAPPENAS. (2014). *Pedoman Teknis Perhitungan Baseline Emisi Gas Rumah Kaca Sektor Berbasis Energi*. Kementerian PPN.
- BAPPENAS. (2019). *Laporan Implementasi Perencanaan Pembangunan Rendah Karbon 2019*. Kementerian Perencanaan Pembangunan Nasional.
- 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.
- BPS. (2023). *Statistik Indonesia 2023*. Badan Pusat Statistik.
- Ditjen Ketenagalistrikan. (2023). *Draft Rencana Umum Ketenagalistrikan Nasional 2023-2060*. Dirjen Ketenagalistrikan ESDM.
- 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.
- 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.
- Nuraeni, Y. (2018). Dampak Perkembangan Industri Pertambangan Nikel Terhadap Kondisi Sosial, Ekonomi dan Budaya Masyarakat. *Prosiding Seminar Nasional & Internasional*. Seminar Nasional Edusaintek FMIPA UNIMUS 2018, Semarang.
- Peng, G., & Xiang, Y. (2022). CO₂ Emission Coupled Power Generation Mix Evolution: A System Dynamics Approach. *Energy Reports*, 8, 597–604.
- Peng, X., Tao, X., Zhang, H., Chen, J., & Feng, K. (2021). CO₂ emissions from the electricity sector during China's economic transition: From the production to the consumption perspective. *Sustainable Production and Consumption*, 27, 1010–1020. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2021.02.024>
- PLN. (2021). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT PLN (Persero) 2021-2030*. PT. PLN (Persero).
- PLN. (2022). *Statistik PLN 2022*. 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.
- 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>
- Solihat, S. (2023). *Aplikasi Sistem Dinamik pada Skenario Penurunan Emisi dari Sektor Energi Listrik dengan Analisis Bauran Energi Nuklir di Lima Provinsi di Kalimantan* [Tesis Program Magister]. Institut Teknologi Bandung.
- 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>

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.