

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional
DOI: 10.22146/jnteti.v13i3.9012

Analisis Dampak Skenario *Net Zero Emission* terhadap Penyediaan Energi Nasional dengan LEAP

Widhiatmaka¹, Joko Santosa¹, Nona Niode¹, Nurry Widya Hesty¹, Afri Dwijatmiko¹, Prima Trie Wijaya¹, Agus Nurrohim¹, Arif Darmawan¹, Erwin Siregar¹

¹ Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Tangerang Selatan, Banten 15314, Indonesia

[Diserahkan: 2 Agustus 2023, Direvisi: 16 Februari 2024, Diterima: 5 Juli 2024]
Penulis Korespondensi: Widhiatmaka (email: widh004@brin.go.id)

INTISARI — Capaian penyediaan energi nasional berbasis energi baru dan terbarukan (EBT) pada 2025 yang tertuang dalam Kebijakan Energi Nasional (KEN) sampai saat ini masih jauh di bawah target. Hal ini terjadi karena energi fosil masih mendominasi pada semua sektor. Demi mewujudkan target menuju *net zero emission* (NZE) pada 2060, perlu adanya transisi dari energi fosil ke EBT secara sistematis dan konsisten. Pemanfaatan energi fosil, baik berasal dari dalam negeri maupun impor, diharapkan menurun dan substitusi EBT akan meningkat. Penelitian ini bertujuan memberikan analisis prakiraan data penyediaan energi nasional serta pemanfaatannya, yang meliputi semua sektor, yaitu rumah tangga, industri, pembangkit listrik, transportasi, dan komersial, sampai 2060 menggunakan simulasi pemodelan energi dengan skenario *business as usual* (BAU) dan NZE. Pemodelan tersebut dilakukan dengan bantuan perangkat lunak Low Emission Analysis Platform (LEAP). LEAP merupakan model energi berbasis skenario yang terintegrasi dan digunakan untuk mengetahui kebutuhan dan produksi energi pada semua sektor ekonomi serta ekstraksi sumber daya energi. Hasil simulasi dengan skenario NZE menunjukkan penurunan secara drastis pemanfaatan energi fosil pada semua sektor dibanding skenario BAU, sedangkan pemanfaatan EBT naik, khususnya di sektor pembangkit. Berdasarkan simulasi tersebut, diperkirakan pada tahun 2060 kebutuhan pasokan batubara dalam negeri turun 81%, kebutuhan gas bumi turun sebesar 74%, kebutuhan bahan bakar minyak (BBM) turun 87%, kebutuhan *liquefied petroleum gas* (LPG) turun 84%, sedangkan kebutuhan minyak bumi tidak terpengaruh. Keseluruhan penyediaan EBT dengan skenario NZE selama kurun waktu 2019-2060 diperkirakan akan mengalami kenaikan rata-rata 9% per tahun atau setara kelipatan 2,3 kali dari skenario BAU.

KATA KUNCI — Penyediaan Energi, *Net Zero Emission*, Low Emission Analysis Platform, Energi Baru dan Terbarukan.

I. PENDAHULUAN

Seiring dengan meningkatnya pembangunan di berbagai sektor, pertumbuhan ekonomi dan penduduk serta kebutuhan energi juga terus-menerus meningkat, sehingga penyediaan energi merupakan faktor yang sangat penting dalam mendorong pembangunan suatu negara. Dalam memenuhi kebutuhan energi nasional, digunakan energi produksi dalam negeri dan energi yang diimpor dari luar negeri, meliputi energi fosil dan energi baru dan terbarukan (EBT).

Konferensi G20 yang diselenggarakan di Bali pada November 2022 telah menetapkan target pencapaian netralitas karbon sejalan dengan Perjanjian Paris pada 2015. Indonesia sebagai tuan rumah G20 mendorong negara maju dan berkembang agar mempercepat transisi energi menuju *net zero emission* (NZE) pada 2060, yaitu peralihan pemakaian energi fosil ke sumber energi yang tidak menghasilkan emisi karbon dengan meningkatkan porsi EBT dalam penyediaan energi pada semua sektor. Indonesia perlu segera melakukan transisi energi ke EBT mengingat cadangan energi fosil terus berkurang setiap tahunnya. Upaya transisi energi untuk mencapai NZE membutuhkan proses bertahap dengan durasi waktu yang panjang [1]. Transisi energi sangat dipengaruhi oleh kondisi perekonomian Indonesia, karena memerlukan biaya yang cukup tinggi dan kestabilan perekonomian untuk mencapainya [2]. Sampai 2021, bauran penyediaan energi nasional masih didominasi oleh energi fosil, yaitu sebesar 87,8%, yang terdiri atas batubara 37,6%, minyak bumi 33,4%, dan gas 16,8%, sedangkan sisanya EBT 12,2%. Target KEN terkait bauran EBT, sebesar 23% dari total energi primer pada 2025, diperkirakan belum dapat tercapai. Mengingat

Indonesia memiliki potensi EBT sangat besar, yaitu mencapai 3.686 GW, maka diperlukan strategi pemanfaatan secara masif untuk mencapai target NZE pada 2060.

Perkembangan energi global telah berpindah dari penggunaan energi fosil menuju peningkatan efisiensi energi dan pengembangan sumber EBT dengan fokus utama pada pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK). Sejumlah penelitian sebelumnya telah melakukan proyeksi energi jangka panjang serta mengembangkan skenario energi untuk mengusulkan transisi EBT. Penelitian berskala global yang dilakukan pada periode 2012-2050 dengan melibatkan 139 negara menunjukkan bahwa di masa depan semua sektor yang mengonsumsi energi akan menggunakan EBT [3].

Simulasi pemodelan energi Low Emission Analysis Platform (LEAP) secara luas digunakan untuk memprediksi data penyediaan energi nasional serta pemanfaatannya. LEAP menjadi alat yang umum digunakan untuk mendukung kebijakan pemerintah dalam hal pemodelan sistem energi, termasuk kemampuannya dalam mengintegrasikan proyeksi energi dengan dampak lingkungan [4]. Banyak studi telah dilakukan untuk menganalisis proyeksi energi di berbagai negara menggunakan LEAP. Salah satunya adalah studi di Thailand yang menunjukkan bahwa untuk mencapai target pengurangan emisi GRK sebesar 20% pada 2030, Thailand perlu mencapai setidaknya 50% dari target dalam rencana energi terbarukan dan 75% dari target dalam rencana efisiensi energi, atau sebaliknya [5]. Selain itu, jika diperpanjang hingga 2050, skenario *nationally determined contributions* (NDC) menunjukkan potensi pengurangan sebesar 30,4% dibandingkan dengan skenario *business as usual* (BAU).

Studi di Pakistan berupa simulasi terhadap sistem kelistrikan Pakistan dari 2016 hingga 2040 dengan menggunakan lima skenario, yaitu BAU, *coal scenario* (CS), *gas scenario* (GS), *nuclear scenario* (NS), dan *renewable scenario* (RS). Hasilnya menunjukkan bahwa skenario RS memiliki tingkat produksi yang lebih rendah daripada BAU, tetapi biaya produksinya sekitar lima kali lebih rendah daripada BAU, CS, dan GS [6].

Studi di Malaysia menunjukkan bahwa tanpa adanya kebijakan baru, konsumsi energi dalam sektor transportasi darat diperkirakan akan meningkat sekitar 3,7 kali lipat dari 2012 hingga 2040. Namun, dengan menerapkan kebijakan bahan bakar alternatif, seperti penggunaan bahan bakar alam pada *natural gas vehicle*, konsumsi energi dapat dikurangi sebesar 25% pada 2040 dibandingkan dengan skenario BAU [7].

Sebuah penelitian di Kolombia mengidentifikasi 44 kebijakan dan tindakan mitigasi yang dapat mengurangi emisi GRK sebesar 28% [8]. Studi di Brazil menganalisis strategi untuk meningkatkan akses penduduk terhadap energi listrik hingga 2050, dengan mengurangi konsumsi biomassa di sektor perumahan hingga 50% atau lebih melalui kombinasi perluasan jaringan listrik dan panel surya terdesentralisasi [9]. Di China, studi kajian dampak lingkungan dan sosio-ekonomi dari pengembangan energi terbarukan di Zhangjiakou menunjukkan bahwa emisi GRK akan mencapai puncaknya pada 2030 dengan konsumsi energi 13,23% lebih rendah dibandingkan dengan skenario BAU [10].

Korea Selatan mengembangkan skenario transisi menuju NZE dengan meningkatkan persentase energi terbarukan dan mengurangi permintaan energi. Hasilnya menunjukkan peningkatan keamanan energi, peningkatan lapangan kerja di sektor pembangkitan listrik, dan pengurangan emisi GRK [11]. Sementara itu, penelitian di Turki mempertimbangkan tiga skenario dalam transisi menuju energi terbarukan, yaitu skenario BAU, *energy conservation* (EC) dan *renewable energy* (REN) [12]. Skenario EC mempertimbangkan penggunaan perangkat yang efisien secara energi dan penerapan pajak karbon (*carbon tax*), sedangkan skenario REN mempertimbangkan peningkatan sebanyak mungkin porsi sumber energi terbarukan dalam pembangkitan listrik. Hasil penelitian menunjukkan bahwa skenario REN merupakan pilihan kebijakan energi yang optimal bagi Turki dari segi biaya dan dampak lingkungan [12].

Di Indonesia, beberapa pengembangan model proyeksi menggunakan LEAP telah dilakukan. Skenario ekspansi kapasitas pembangkit listrik Jawa-Bali dari 2016 hingga 2050 dengan memperhatikan target bauran EBT menggunakan LEAP untuk memprediksi energi, biaya, dan emisi CO₂ [13]. Hasil penelitian menunjukkan bahwa panel surya (fotovoltaik) dan energi angin lebih kompetitif dibandingkan dengan jenis energi terbarukan lainnya. Selain itu, hasil mengindikasikan bahwa kebijakan energi harus mengutamakan penggunaan energi terbarukan serta meningkatkan kapasitas jaringan listrik untuk mengakomodasi perubahan energi terbarukan yang bervariasi. LEAP digunakan untuk memprediksi tingkat perencanaan kebutuhan energi listrik di Jawa Barat [14] dan jalur biaya optimal pengembangan sektor kelistrikan di Pulau Sumatra [15] menggunakan desain skenario yang mengadopsi Rencana Umum Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN (Persero) dan target pengurangan emisi GRK.

Dalam penelitian ini, simulasi menggunakan LEAP dengan skenario BAU dan NZE dibangun untuk memperkirakan data

TABEL I
PROYEKSI PENDUDUK, RUMAH TANGGA, DAN URBANISASI

Keterangan	Satuan	2020*)	2030	2040	2050	2060
Populasi	Juta jiwa	270	294	313	324	331
Pertumbuhan populasi	%	1,16	0,81	0,54	0,30	0,20
Kepala keluarga	Juta KK	69	76	81	84	86
Bagian perkotaan	%	56,4	63,4	69,9	75	77

*) Hasil sensus penduduk BPS 2020

penyediaan energi nasional serta pemanfaatannya, meliputi semua sektor, baik rumah tangga, industri, pembangkit listrik, transportasi, dan komersial sampai target NZE pada 2060. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan kebijakan dan mengidentifikasi sinergi dan kompromi yang terkait dengan potensi kebijakan energi dalam mendorong transisi ke energi terbarukan.

II. DATA DAN METODOLOGI

A. DATA

Pemodelan penyediaan energi nasional ini menggunakan data sekunder dari sumber-sumber terpercaya agar model energi yang disusun menghasilkan optimasi yang realistis dan akurat. Sumber-sumber data yang dipakai antara lain data demografi dan ekonomi dari Badan Pusat Statistik (BPS), data konsumsi energi dari Handbook of Energy and Economic Statistics of Indonesia (HEESI 2021), dan data potensi sumber daya alam dari Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) [16]. Dalam buku tersebut disebutkan bahwa Indonesia memiliki cadangan batubara sebesar 17,9 miliar ton, minyak bumi 4 miliar barel, dan gas bumi 61 miliar kaki kubik standar (*trillion standard cubic feet*, TSCF). Penyediaan batubara, minyak bumi, dan gas bumi nasional cukup besar, yaitu 614 juta ton, 240 juta barel, dan 2.434 miliar kaki kubik standar (*billion standard cubic feet*, BSCF). Selain itu, Indonesia memiliki potensi EBT sebesar 3.686 GW dan penyediaan 12,24 GW. Data historis sampai tahun 2021 digunakan sebagai acuan penelitian ini untuk memproyeksikan penyediaan energi sampai dengan tahun 2060.

Proyeksi pertumbuhan penduduk Indonesia dan indikator lainnya ditunjukkan pada Tabel I. Data tersebut mengacu pada hasil kajian BPS dengan pertumbuhan nasional rata-rata 5,7% per tahun [17]. Proyeksi pertumbuhan ekonomi menurut produk domestik bruto (PDB) nasional berdasarkan data BPS pada 2020 menunjukkan bahwa akibat pandemi COVID-19, pertumbuhan ekonomi menjadi -2,07% dan pada 2021 kondisi ekonomi mulai pulih dengan pertumbuhan ekonomi mencapai 3,70% [18].

Data sumber energi HEESI tahun 2021 dan proyeksi penduduk pada Tabel I digunakan untuk mengisi komponen-komponen *Key Assumptions* pada LEAP. Data-data tersebut dimasukkan pada bagian *Expression* pada skenario BAU dan NZE dengan menggunakan fungsi *Interp* untuk menentukan nilai pada tahun tertentu menggunakan interpolasi linier.

B. METODE

Perhitungan neraca dan pemanfaatan penyediaan energi nasional sampai 2060, baik energi fosil maupun EBT, dilakukan dengan bantuan perangkat lunak LEAP. LEAP merupakan model energi berbasis skenario yang terintegrasi yang dapat digunakan untuk melakukan analisis kebutuhan dan

penyediaan energi serta kaitannya dengan emisi GRK [19]. LEAP mendukung bermacam-macam metodologi pemodelan, dari *bottom-up*, *top-down*, dan kombinasi keduanya [20]. LEAP memiliki *tools* dan jendela kerja pada tampilan *dashboard*-nya yang ramah pengguna. Spesifikasi komputer untuk dapat menjalankan LEAP tidak disebutkan secara spesifik.

Analisis kebutuhan energi yang digunakan adalah metode *end-use*. Total kebutuhan energi (*energy demand*, ED) merupakan hasil perkalian antara *activity level* dan intensitas energi, sesuai persamaan berikut.

$$ED_{b,y} = AL_{b,y} \times IE_{b,y} \quad (1)$$

dengan ED adalah total kebutuhan energi, AL adalah *activity level*, IE adalah intensitas energi (penggunaan energi per aktivitas), b adalah sektor, dan y adalah tahun [21].

Berdasarkan HEESI, konsumsi energi dibagi menjadi lima sektor, yaitu sektor industri, transportasi, rumah tangga, komersial, dan sektor lainnya. Proyeksi konsumsi energi dari masing-masing sektor memiliki persamaan yang berbeda karena setiap sektor memiliki definisi intensitas energi yang berbeda [20].

$$E_{ik} = A_{ik} \times IE \quad (2)$$

$$E_r = A_r \times \frac{U}{Eff} \quad (3)$$

$$E_t = N \times \frac{D}{C} \quad (4)$$

dengan E_{ik} adalah kebutuhan energi sektor industri atau komersial, E_r adalah kebutuhan energi sektor rumah tangga, E_t adalah kebutuhan energi sektor transportasi, A_{ik} yaitu *activity level* sektor industri atau komersial, dan A_r ialah *activity level* sektor rumah tangga. IE adalah intensitas energi final sektor industri atau komersial, U adalah intensitas useful energy sektor rumah tangga, Eff adalah efisiensi peralatan, N merupakan jumlah kendaraan, D adalah jarak yang ditempuh kendaraan, dan C menyatakan *specific energy consumption* (SFC).

Proyeksi jumlah kendaraan dihitung berdasarkan persediaan tahun sebelumnya, penjualan tahun berjalan, dan umur (*operational lifetime*) kendaraan mobil, bus, truk, dan sepeda motor. Umur kendaraan dikaitkan dengan *survival rate* dan dinyatakan dengan fungsi *S-curve*. Penetrasi (adopsi) teknologi kendaraan hemat energi kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (KBLBB) dan *fuel cell electric vehicle* (FCEV) mengikuti suatu fungsi *S-curve*. Penjualan kendaraan dimodelkan dengan suatu fungsi logistik [22].

$$S_t = S_{t-1} \times (1 + r_t) \quad (5)$$

$$r_t = K_a \times e^{(-K_b(t-1) + c_{t-1}K_c)} \quad (6)$$

dengan S adalah jumlah penjualan kendaraan, r menyatakan pertumbuhan penjualan kendaraan, t adalah tahun ke-t, C merupakan pertumbuhan PDB per kapita, K_a adalah faktor pengatur untuk pertumbuhan awal, K_b ialah faktor kecepatan untuk mencapai pertumbuhan akhir, dan K_c adalah faktor pengatur untuk pertumbuhan akhir.

Ada dua skenario yang digunakan dalam penelitian ini, yaitu skenario BAU dan NZE. Skenario BAU merupakan kondisi tanpa intervensi baru dari pemerintah yang berhubungan dengan kebijakan energi sektoral. Kebijakan energi dan program terkait yang diterapkan adalah kebijakan yang berlaku pada tahun dasar, yaitu 2021. Pengembangan

teknologi pada semua sektor ekonomi, seperti industri, transportasi, rumah tangga, komersial dan pembangkit, tidak diatur dalam kebijakan baru, tetapi mengikuti mekanisme pasar (*market driven*) atau tren historis (*historical trend*).

Sementara itu, skenario NZE menerapkan kebijakan baru dan asumsi yang ditujukan untuk mencapai NZE pada 2060, seperti penghapusan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) batubara, pengurangan pembangunan pembangkit listrik tenaga diesel (PLTD) di daerah tertinggal, terdepan, dan terluar (3T), percepatan pembangunan pembangkit EBT, dan penerapan teknologi hemat energi lebih intensif. Penghapusan PLTU bukan berarti penghapusan infrastruktur kelistrikannya, melainkan transisi sistem *co-firing* biomassa dan batubara sebelum penghapusan PLTU tersebut [23]. Komposisi biomassa pada *co-firing* dengan batubara berkisar 5-15% tergantung ketersediaan biomassa dan fleksibilitas teknologi pembangkitnya [24].

Kedua skenario menggunakan asumsi-asumsi dasar seperti pertumbuhan penduduk dan ekonomi yang sama, sehingga sangat relevan untuk dibandingkan. Asumsi lain yang digunakan adalah: 1) Indonesia keluar dari *middle income trap* (PDB US\$12.695/kapita) terwujud sebelum 2045 sesuai target pemerintah [25], tepatnya 2041; 2) proyeksi pangsa PDB sektoral dihitung berdasarkan data historis elastisitas sektor terhadap PDB nasional. Pangsa PDB sangat penting dalam membuat proyeksi permintaan energi sektoral mengingat masing-masing sektor mempunyai karakter pola konsumsi dan intensitas energi yang berbeda-beda.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

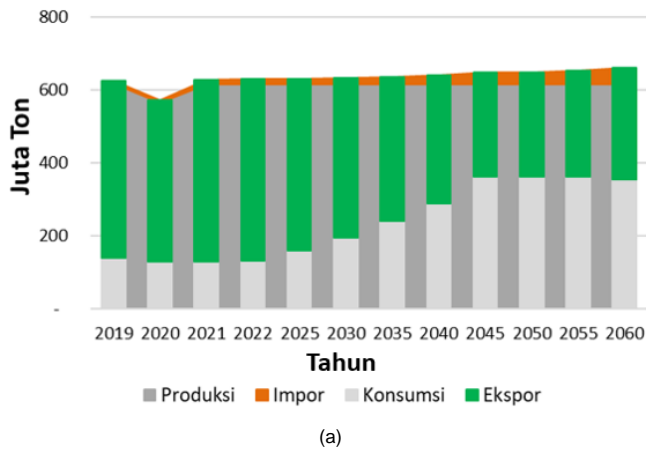
A. HASIL PENYEDIAAN ENERGI

Dalam menganalisis perkiraan penyediaan energi nasional, yang dibahas adalah neraca batubara, minyak mentah, bahan bakar minyak (BBM), gas bumi, dan EBT, serta pemanfaatannya menggunakan perangkat lunak LEAP dengan dua skenario, yaitu skenario BAU dan NZE.

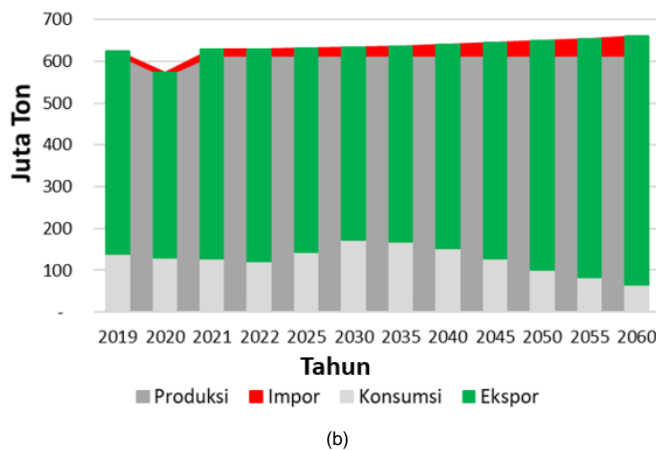
1) NERACA BATUBARA

Neraca batubara dalam skenario BAU dan NZE ditampilkan pada Gambar 1. Tampak bahwa skenario BAU dan NZE tidak berpengaruh pada produksi dan impor batubara, tetapi berdampak pada peningkatan dan penurunan kebutuhan batubara dalam negeri serta ekspor batubara. Selama periode 2019-2060, produksi batubara diperkirakan akan mengalami penurunan sebesar 0,01% per tahun, dari 616 juta ton pada 2019 menjadi 614 juta ton pada 2060. Penurunan ini tergolong sangat kecil. Penurunan produksi batubara terbesar terjadi akibat permintaan batubara selama pandemi COVID-19, yang menyebabkan produksi turun menjadi 564 juta ton pada 2020. Setelah tahun 2020, produksi batubara diproyeksikan naik kembali menjadi 614 juta ton dan diperkirakan akan tetap konstan hingga 2060.

Skenario BAU menunjukkan bahwa kebutuhan batubara dalam negeri diperkirakan akan meningkat rata-rata 2,3% per tahun, naik dari 138 juta ton pada 2019 menjadi 354 juta ton pada 2060, yaitu sekitar 58% dari pasokan produksi pada tahun 2060. Ini berarti kebutuhan dalam negeri tidak akan melebihi produksi batubara. Maka, kelebihan produksi batubara dialokasikan untuk diekspor, meskipun diperkirakan bahwa ekspor batubara akan mengalami penurunan sebesar 1,1% per tahun, turun dari 485 juta ton pada 2019 menjadi 306 juta ton pada 2060. Penurunan ini menyebabkan produksi batubara dalam negeri akan dibatasi.



(a)



(b)

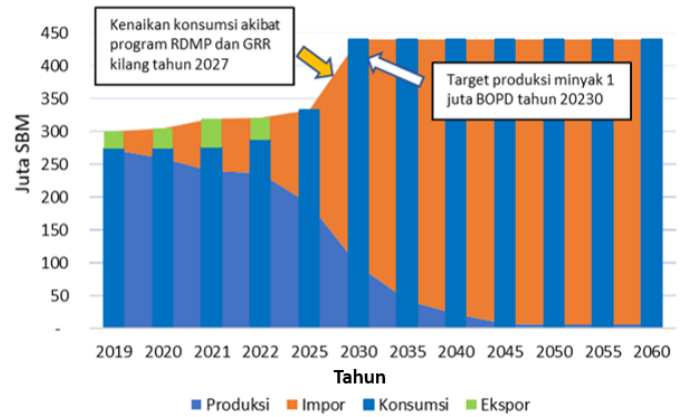
Gambar 1. Neraca batubara, (a) skenario BAU, (b) skenario NZE.

Namun, impor batubara masih akan diperlukan untuk keperluan industri metalurgi yang diperkirakan akan mengalami kenaikan rata-rata 4,6% per tahun, naik dari 7 juta ton pada 2019 menjadi 46 juta ton pada 2060. Sebaliknya, dalam skenario NZE, kebutuhan pasokan batubara dalam negeri diperkirakan akan turun rata-rata sebesar 1,8% per tahun, menurun dari 138 juta ton pada 2019 menjadi 66 juta ton pada 2060, atau turun sebanyak 81% dibandingkan dengan kebutuhan batubara dalam skenario BAU. Hal ini sejalan dengan target skenario NZE yang bertujuan mengurangi penggunaan batubara, terutama pada PLTU.

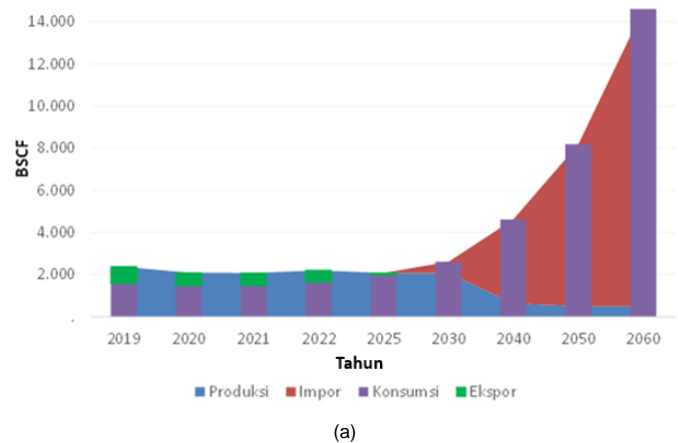
Selama periode 2019-2060, produksi batubara diperkirakan akan tetap konstan pada 614 juta ton. Karena pemenuhan kebutuhan batubara dalam negeri yang diutamakan, kelebihan batubara yang dapat diekspor diperkirakan akan mengalami kenaikan rata-rata sebesar 0,5% per tahun atau meningkat sebanyak 1,6% dibandingkan dengan skenario BAU. Sementara itu, impor batubara diperkirakan akan meningkat rata-rata sebesar 4,6% per tahun, naik dari 7 juta ton pada 2019 menjadi 46 juta ton pada 2060 dalam skenario NZE. Impor batubara masih dibutuhkan, terutama untuk keperluan industri metalurgi, khususnya batubara dengan kalori tinggi (*cooking coal*).

2) NERACA MINYAK BUMI

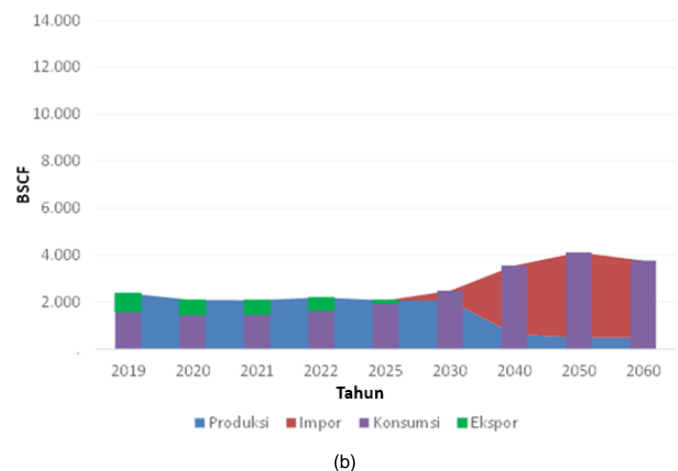
Skenario BAU dan NZE tidak memiliki dampak terhadap produksi, ekspor, dan impor minyak bumi. Selama periode 2019-2060, produksi minyak bumi diperkirakan mengalami penurunan sebesar 9% per tahun. Kebutuhan minyak bumi diperkirakan akan meningkat dari 274 juta setara barel minyak (SBM) pada 2019 menjadi 423 juta SBM pada 2027. Peningkatan ini disebabkan oleh pengembangan atau



Gambar 2. Neraca minyak bumi skenario BAU dan NZE.



(a)

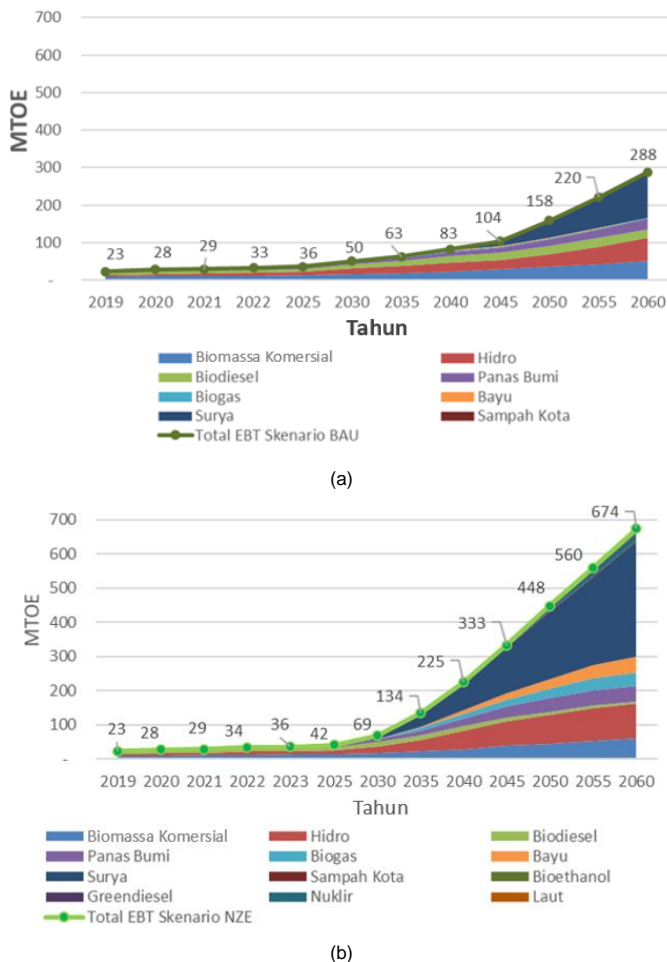


(b)

Gambar 3. Neraca gas, (a) skenario BAU, (b) skenario NZE.

peningkatan kapasitas kilang melalui program *Refinery Development Master Plan* (RDMP) dan pembangunan kilang minyak baru *Grass Root Refinery* (GRR). Selain itu, rencana target optimalisasi *lifting* produksi minyak bumi sebesar 1 juta barel minyak per hari (*barrels of oil per day*, BOPD) pada 2030 diperkirakan akan meningkat menjadi 440 juta SBM hingga 2060, selama tidak ada penambahan kapasitas kilang.

Tujuan optimalisasi adalah mengurangi impor minyak bumi yang diperkirakan akan naik sebesar 7% per tahun, dari 28 juta SBM menjadi 434 juta SBM. Ekspor minyak mentah diperkirakan masih akan berlanjut hingga tahun 2024. Setelah 2024-2060, diperkirakan tidak akan ada lagi ekspor minyak bumi karena produksi terbatas dan cadangan minyak akan habis apabila tidak ditemukan cadangan baru, seperti yang ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 4. Penyediaan EBT, (a) skenario BAU, (b) skenario NZE.

3) NERACA GAS

Neraca gas skenario BAU dan NZE ditampilkan pada Gambar 3. Selama periode 2019-2060, produksi gas diperkirakan akan mengalami penurunan rata-rata sebesar 4% per tahun, menurun dari 2.372 BSCF pada 2019 menjadi 495 BSCF pada 2060. Penurunan ini diperkirakan terjadi karena tidak ada penemuan sumur gas baru yang signifikan.

Dalam skenario BAU, kebutuhan gas bumi diperkirakan meningkat secara signifikan, dengan pertumbuhan rata-rata sebesar 6% per tahun, naik dari 1.578 BSCF pada 2019 menjadi 14.612 BSCF pada 2060. Kelebihan produksi diekspor hingga 2026 dan setelah itu diperkirakan tidak akan ada ekspor gas. Meskipun ada penambahan program gas bumi sebesar 12 BSCF pada 2030, hal tersebut tetap tidak mampu mencukupi kebutuhan gas dalam negeri yang terus meningkat. Oleh karena itu, diperlukan impor gas bumi yang diperkirakan akan meningkat rata-rata 16% per tahun selama periode 2027-2060.

Dampak dari skenario NZE pada 2060 diperkirakan menyebabkan kebutuhan pasokan gas bumi mengalami penurunan sangat drastis, yakni sebesar 74% dibandingkan dengan skenario BAU. Meskipun produksi gas bumi dibatasi dan ekspor gas bumi dihentikan, masih diperlukan impor gas untuk memenuhi kekurangan pasokan produksi gas. Meskipun demikian, impor gas diperkirakan akan mengalami penurunan sangat drastis sebesar 77% dibandingkan dengan skenario BAU pada 2060. Gas alam digunakan sebagai pendukung EBT menuju transisi energi bersih [26].

4) PENYEDIAAN ENERGI BARU TERBARUKAN (EBT)

Penyediaan EBT skenario BAU dan NZE dapat dilihat pada Gambar 4. Selama periode 2019-2060, keseluruhan EBT dalam

skenario BAU diperkirakan meningkat rata-rata sebesar 6% per tahun, dari 23 juta ton ekuivalen minyak (*millions of tonnes of oil equivalent*, MTOE) pada 2019 menjadi 288 MTOE pada 2060. Selama periode tersebut, peningkatan tertinggi terjadi pada pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dengan laju pertumbuhan rata-rata 21% per tahun, meningkat dari 0,06 MTOE pada 2019 menjadi 120 MTOE pada 2060. Peningkatan ini sejalan dengan kenaikan kontribusi PLTS terhadap total EBT, naik dari 0,2% pada 2019 menjadi 42% pada 2060.

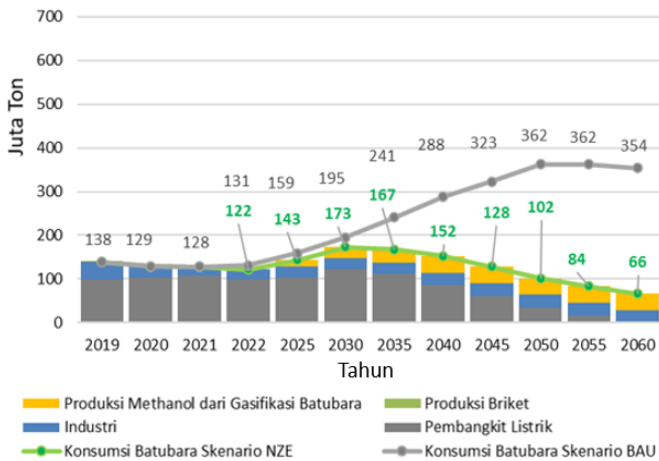
PLTS dengan fotovoltaik memiliki integrasi teknis dan ekonomi dengan potensi tinggi, bahkan tanpa perlu penyimpanan baterai [27]. Peningkatan kedua terjadi pada pembangkit listrik tenaga sampah kota, dengan laju pertumbuhan rata-rata 13% per tahun. Meskipun penggunaannya relatif kecil, yaitu hanya 0,01 MTOE pada 2019, diharapkan EBT ini meningkat menjadi 1,1 MTOE pada 2060. Seiring dengan itu, biogas mengalami laju pertumbuhan sebesar 7% per tahun, sedangkan pangsa nya naik dari 0,7% pada 2019 menjadi 0,9% pada 2060.

Selain itu, energi dari sumber hidro dan angin memiliki laju pertumbuhan rata-rata 6% per tahun. Meskipun demikian, peran keduanya mengalami penurunan dari 23% dan 0,7% pada 2019 menjadi 21% dan 0,6% pada 2060. Pembangkit listrik tenaga panas bumi mengalami penurunan pangsa dari 15% menjadi 10%, tetapi laju pertumbuhannya meningkat 5% per tahun. Sementara itu, biodiesel dan biomassa mengalami penurunan perannya dari, masing-masing, 21% menjadi 8% dan 39% menjadi 18%, antara 2019 dan 2060. Meskipun pangsa pembangkit listrik tenaga panas bumi menurun, laju pertumbuhannya naik sebesar 5% per tahun, sedangkan biodiesel dan biomassa mengalami laju pertumbuhan rata-rata 4% per tahun selama periode 2019-2060.

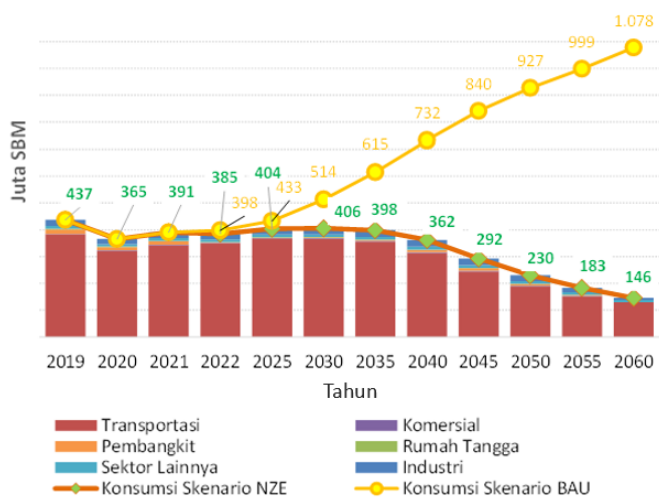
Hasil skenario BAU tersebut lebih tinggi dibandingkan penelitian sebelumnya dengan skenario BAU didasarkan pada Rencana Bisnis Ketenagalistrikan PLN 2019–2028, yang tidak mencakup target untuk energi terbarukan [28]. Berdasarkan penelitian tersebut, komposisi sumber energi pada 2050 terdiri atas hidro (2,75%), panas bumi (2,86%), biomassa (0,07%), tenaga surya (0,16%), angin (0,19%), gas alam (28,48%), batubara (65,49%), dan minyak (0%).

Skenario NZE selama periode 2019-2060 memperkirakan bahwa total penyediaan EBT akan mengalami kenaikan rata-rata sebesar 9% per tahun, naik dari 23 MTOE pada 2019 menjadi 674 MTOE pada 2060. Hal ini mencerminkan peningkatan sebesar 2,3 kali lipat dibandingkan dengan skenario BAU. Kenaikan tersebut berasal dari sumber penyediaan energi seperti sampah, angin, biogas, hidro, panas bumi, biomassa komersial, serta tambahan dari bioetanol yang diperkirakan dimulai pada 2026 hingga 2052. Selain itu, terdapat penambahan dari *green diesel*, yang diestimasi akan dimulai pada 2030 hingga 2060, serta penambahan sumber energi nuklir dan energi laut, yang diperkirakan akan dimulai pada 2045 hingga 2060. Pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) paling layak menggantikan PLTU batubara di masa depan [29].

Penyediaan EBT skenario BAU dan NZE dalam penelitian ini mendekati hasil penelitian serupa untuk negara-negara di ASEAN [30]. Disebutkan pada hasil penelitian tersebut bahwa pembangkitan listrik dari sumber bahan bakar fosil mengalami penurunan bertahap dan mencapai nol pada 2050. Sebaliknya, pembangkitan listrik dari energi terbarukan mengalami peningkatan 16 kali lipat, meningkat dari 247 TWh pada 2020 menjadi 3.696 TWh pada tahun 2050. Pada 2050, energi



Gambar 5. Pemanfaatan batubara skenario BAU dan NZE.



Gambar 6. Pemanfaatan BBM skenario BAU dan NZE.

terbarukan menyumbang sebanyak 99,5% dari total pembangkitan listrik, sedangkan 0,5% sisanya berasal dari tenaga nuklir. PLTS mendominasi dengan pangsa sebesar 61% dalam komposisi pembangkitan listrik, diikuti oleh energi angin sebesar 17%.

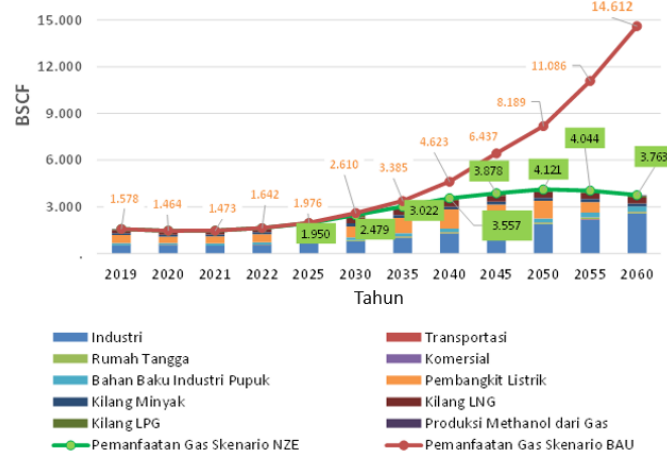
C. HASIL PEMANFAATAN ENERGI

Hasil pemanfaatan energi berdasarkan skenario BAU dan NZE meliputi pemanfaatan batubara, BBM, gas, dan EBT.

1) PEMANFAATAN BATUBARA

Pada 2060, pemanfaatan batubara diestimasi mencapai 354 juta ton, tetapi mengalami penurunan signifikan menjadi 66 juta ton pada skenario NZE, menunjukkan penurunan sebesar 81%. Penurunan ini disebabkan oleh penghentian operasi PLTU dan pergeseran fokus menuju sumber EBT, terutama PLTS, pembangkit listrik tenaga air (PLTA), dan pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB).

Selain itu, pemanfaatan batubara di sektor industri pada skenario BAU diperkirakan mencapai 108 juta ton, tetapi mengalami penurunan drastis menjadi 28 juta ton pada skenario NZE. Meskipun demikian, perlu dicatat bahwa terdapat penambahan produksi metanol dari gasifikasi batubara yang dijadwalkan mulai berproduksi pada 2024. Produksi ini diperkirakan akan meningkat secara bertahap hingga mencapai 38 juta ton pada 2060, dengan pertumbuhan sebesar 6% per tahun pada kedua skenario, sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 5.



Gambar 7. Pemanfaatan gas skenario BAU dan NZE.

2) PEMANFAATAN BBM

Pemanfaatan BBM dalam skenario BAU dan NZE dapat dilihat pada Gambar 6. Perbandingan antara skenario NZE dan BAU dilakukan dari 2022 hingga 2060, dengan mempertimbangkan target pengurangan BBM. Diperkirakan total pemanfaatan BBM akan mengalami penurunan signifikan, mulai dari 3% pada 2022 hingga mencapai 86% pada 2060.

Penurunan terbesar dalam pemanfaatan BBM terjadi di sektor transportasi, dengan penurunan sebesar 87%, yang merupakan hasil dari peralihan kendaraan yang menggunakan BBM menjadi kendaraan listrik. Meskipun terjadi penurunan, masih akan diperlukan bahan bakar avtur dan *gasoil* selama periode transisi. Selanjutnya, pemanfaatan BBM di sektor industri dan sektor lainnya diperkirakan mengalami penurunan masing-masing sebesar 40% pada 2060.

Sektor komersial dan rumah tangga diperkirakan pada 2060 tidak lagi menggunakan BBM, tetapi beralih sepenuhnya ke listrik. Selain itu, pembangkit listrik yang menggunakan BBM dihentikan atau tidak beroperasi pada 2060.

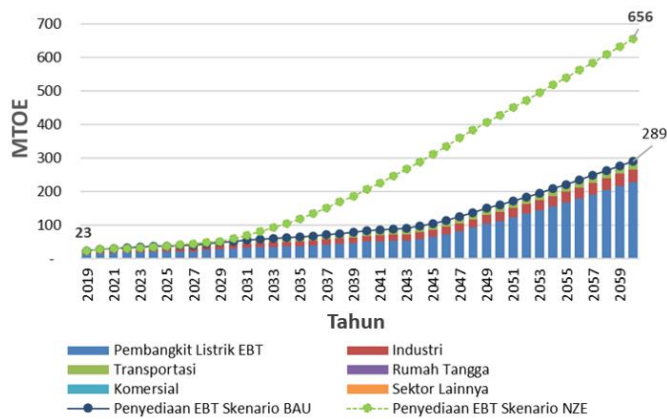
3) PEMANFAATAN GAS

Skenario BAU dan NZE tidak memengaruhi pemanfaatan gas dalam industri pupuk, kilang (*liquefied natural gas/LNG*, minyak, dan *liquefied petroleum gas/LPG*), serta produksi metanol selama periode 2019-2060. Pada 2060, pemanfaatan gas dalam skenario NZE diperkirakan akan mengalami penurunan signifikan, yaitu 100% pada pembangkit listrik karena dihentikan operasionalnya, sekitar 40% pada sektor komersial, 21% pada industri, dan 3% pada rumah tangga.

Selama masa transisi energi, penggunaan listrik yang berasal dari bahan bakar gas akan beralih ke EBT. Selain itu, pemanfaatan gas di sektor transportasi diperkirakan akan meningkat menjadi 6,2 BSCF dari 0,2 BSCF di skenario BAU pada 2060, sebagaimana terlihat pada Gambar 7.

4) PEMANFAATAN EBT

Selama periode 2019-2060, target untuk mengurangi penggunaan energi fosil secara bertahap hingga akhirnya dihentikan menunjukkan bahwa tidak akan ada pembangunan baru pembangkit listrik yang menggunakan bahan bakar fosil. Di antara sektor pemanfaatan EBT, sektor pertama yang paling signifikan adalah pembangkit listrik tenaga (PLT) EBT. Diperkirakan terjadi kenaikan rata-rata 7% per tahun dari 13 MTOE pada 2019 menjadi 266 MTOE pada 2060 untuk skenario BAU. Sementara itu, dalam skenario NZE, terjadi kenaikan rata-rata 10% per tahun dari 13 MTOE pada 2019



Gambar 8. Pemanfaatan gas skenario BAU dan NZE.

menjadi 607 MTOE pada 2060. Artinya, dalam skenario NZE jumlah ini menjadi 2,7 kali lipat dibandingkan skenario BAU.

Selain pemanfaatan dalam pembangkit listrik, pemanfaatan EBT di sektor industri diperkirakan mengalami peningkatan dari 6 MTOE pada 2019 menjadi 39 MTOE pada 2060 dalam skenario BAU dan menjadi 30 MTOE pada 2060 pada skenario NZE (mengalami penurunan sebesar 24% dibandingkan dengan skenario BAU).

Selain itu, pemanfaatan EBT di sektor komersial diperkirakan akan meningkat dari 0,2 MTOE pada 2019 menjadi 0,5 MTOE pada 2060. Di sektor rumah tangga, pemanfaatan EBT diharapkan tetap konstan sebesar 0,1 MTOE mulai 2026 hingga 2060, atau keduanya diperkirakan mengalami penurunan sebesar 40% dibandingkan dengan skenario BAU. Pemanfaatan EBT di sektor transportasi diperkirakan akan meningkat dari 4 MTOE pada 2019 menjadi 22 MTOE pada 2060 dalam skenario BAU dan menjadi 18 MTOE dalam skenario NZE (mengalami penurunan sebesar 18% dibandingkan dengan skenario BAU), seperti yang terlihat pada Gambar 8.

IV. KESIMPULAN

Konferensi G20 di Bali mendorong negara maju dan berkembang untuk mempercepat transisi energi menuju NZE pada 2060, mengingat cadangan energi fosil makin menipis. Dampak dari skenario NZE terhadap penyediaan energi pada tahun 2060 diperkirakan signifikan dengan menggunakan LEAP. Batubara, minyak bumi, dan gas akan mengalami penurunan produksi yang besar, masing-masing sebesar 81%, 87%, dan 74%, sedangkan produksi minyak bumi tidak terpengaruh.

Pemanfaatan EBT hingga tahun 2060 di PLT EBT diperkirakan akan meningkat secara signifikan, dengan skenario NZE menghasilkan kenaikan sekitar 2,7 kali lipat dibandingkan dengan skenario BAU. Di sektor industri, pemanfaatan EBT diestimasi akan menurun sebesar 24% dibandingkan dengan BAU. Sementara itu, pemanfaatan EBT di sektor komersial dan rumah tangga diantisipasi akan mengalami penurunan sebesar 40% dibandingkan dengan BAU. Dalam sektor transportasi, meskipun terjadi peningkatan dalam BAU, pemanfaatan EBT dalam skenario NZE diperkirakan akan mengalami penurunan sebesar 18% dibandingkan dengan BAU pada tahun 2060.

LEAP memiliki keterbatasan dalam menyelesaikan kompleksitas data yang sangat besar dan dinamika sistem energi yang terus berubah. Penggunaan kecerdasan buatan (*artificial intelligence*, AI) dapat menjadi alternatif untuk mengeksplorasi secara lebih mendalam pola-pola yang

mungkin sulit diidentifikasi oleh LEAP. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan model AI yang mampu memprediksi transformasi energi yang lebih dinamis dan adaptif serta mampu mengidentifikasi solusi-solusi inovatif dalam pengoptimalan bauran energi untuk masa depan.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan dengan pihak dan institusi mana pun dalam penulisan makalah ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Konseptualisasi, Widhiatmaka dan Nona Niode; metodologi, Joko Santosa; perangkat lunak, Joko Santosa; validasi, Erwin Siregar; analisis formal, Arif Darmawan; investigasi, Prima Trie Wijaya; sumber daya, Nona Niode; kurasi data, Nona Niode; penulisan—penyusunan draf asli, Widhiatmaka dan Nurry Widya Hesty; penulisan—peninjauan dan penyuntingan, Agus Nurrohm dan Erwin Siregar; visualisasi, Prima Trie Wijaya dan Afri Dwijatmiko; pengawasan, Arif Darmawan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Kuasa Pengguna Anggaran DIP A BRIN 2022 atas pendanaan kegiatan Transisi Energi di Sektor Pembangkit Listrik. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Bapak Haznan Abimanyu sebagai Kepala Organisasi Riset Energi dan Manufaktur (OREM) dan Bapak Cuk Supriyadi Ali Nandar sebagai Kepala Pusat Riset Konversi dan Konservasi Energi (KKE) atas dukungan untuk kegiatan tersebut.

REFERENSI

- [1] V.S. Husada dan I.E. Joesoef, "Legal policy of the Indonesian government to achieve net zero emissions," *J. Res. Soc. Sci. Econ. Manag.*, vol. 2, no. 1, hal. 128–133, Agu. 2022, doi: 10.59141/jrsem.v2i1.248.
- [2] N. Shofiyana, I. Supriyadi, dan M.U.A. Qarni, "Transisi energi Indonesia pasca pandemi COVID-19 dan konflik militer Rusia-Ukraina," *J. Kewarganegaraan*, vol. 6, no. 2, hal. 3381–3387, Sep. 2022.
- [3] M.Z. Jacobson dkk., "100% clean and renewable wind, water, and sunlight all-sector energy roadmaps for 139 countries of the world," *Joule*, vol. 1, no. 1, hal. 108–121, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.joule.2017.07.005.
- [4] L. Suganthi dan A.A. Samuel, "Energy models for demand forecasting—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 2, hal. 1223–1240, Feb. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2011.08.014.
- [5] P. Misila, P. Winyuchakrit, dan B. Limmeechokchai, "Thailand's long-term GHG emission reduction in 2050: The achievement of renewable energy and energy efficiency beyond the NDC," *Heliyon*, vol. 6, no. 12, hal. 1–17, Des. 2020, doi: 10.1016/j.heliyon.2020.e05720.
- [6] M. Shahid dkk., "LEAP simulated economic evaluation of sustainable scenarios to fulfill the regional electricity demand in Pakistan," *Sustain. Energy Technol. Assess.*, vol. 46, hal. 1–13, Agu. 2021, doi: 10.1016/j.seta.2021.101292.
- [7] M. Azam dkk., "Energy consumption and emission projection for the road transport sector in Malaysia: An application of the LEAP model," *Environ. Dev. Sustain.*, vol. 18, no. 4, hal. 1027–1047, Agu. 2016, doi: 10.1007/s10668-015-9684-4.
- [8] J.D. Correa-Laguna, M. Pelgrims, M.E. Valderrama, dan R. Morales, "Colombia's GHG emissions reduction scenario: Complete representation of the energy and non-energy sectors in LEAP," *Energies*, vol. 14, no. 21, hal. 1–24, Nov. 2021, doi: 10.3390/en14217078.
- [9] V. Sessa, R. Bhandari, dan A. Ba, "Rural electrification pathways: An implementation of LEAP and GIS tools in Mali," *Energies*, vol. 14, no. 11, hal. 1–19, Jun. 2021, doi: 10.3390/en14113338.
- [10] D. Yang dkk., "Critical transformation pathways and socio-environmental benefits of energy substitution using a LEAP scenario modeling," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 135, hal. 1–12, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2020.110116.

- [11] J.H. Hong dkk., "Long-term energy strategy scenarios for South Korea: Transition to a sustainable energy system," *Energy Policy*, vol. 127, hal. 425–437, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2018.11.055.
- [12] D.J. Massaga, G. Kirkil, dan E. Celebi, "A Comparative study of energy models for Turkish electricity market using LEAP," dalam *2019 16th Int. Conf. Eur. Energy Mark. (EEM)*, 2019, hal. 1–4, doi: 10.1109/EEM.2019.8916283.
- [13] K. Handayani, Y. Krozer, dan T. Filatova, "From fossil fuels to renewables: An analysis of long-term scenarios considering technological learning," *Energy Policy*, vol. 127, hal. 134–146, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2018.11.045.
- [14] D.S. Nurwahyudin, N. Trihastuti, dan N.A. Utama, "Energy planning in West Java using software LEAP (long-range energy alternatives planning)," dalam *7th Int. Conf. Energy Environ. Epidemiol. Inf. Syst. (ICENIS 2022)*, 2022, hal. 1–18, doi: 10.1051/e3sconf/202235901001.
- [15] L. Sani, D. Khatiwada, F. Harahap, dan S. Silveira, "Decarbonization pathways for the power sector in Sumatra, Indonesia," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 150, hal. 1–11, Okt. 2021, doi: 10.1016/j.rser.2021.111507.
- [16] "Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2021," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2022.
- [17] "Proyeksi Penduduk Indonesia 2015-2045 Hasil SUPAS 2015," Badan Pusat Statistik, 2018.
- [18] Badan Pusat Statistik, "Berita Resmi Statistik 2023 No. 15/02/Th. XXV, no. 6 Februari 2023," 2023, [Online], <https://www.bps.go.id/id/pressrelease/2023/02/06/1997/ekonomi-indonesia-tahun-2022-tumbuh-5-31-persen.html>, tanggal akses: 1-Mar-2023.
- [19] A. Sugiyono, J. Santosa, Adiarso, dan E. Hilmawan, "Pemodelan dampak COVID-19 terhadap kebutuhan energi di Indonesia," *J. Sist. Cerdas*, vol. 3, no. 2, hal. 65–73, Agu. 2020, doi: 10.37396/jsc.v3i2.65.
- [20] Stockholm Environment Institute, *LEAP: The Low Emissions Analysis Platform. [Software version: 2020.1.76]*. Somerville, MA, AS: Stockholm Environment Institute, 2022.
- [21] B. Ugwoke dkk., "Low emissions analysis platform model for renewable energy: Community-scale case studies in Nigeria," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 67, Apr. 2021, Art. no. 102750, doi: 10.1016/j.scs.2021.102750.
- [22] M. Artzrouni, "Mathematical demography," *Encycl. Soc. Meas.*, 2005, hal. 641–651, doi: 10.1016/B0-12-369398-5/00360-1.
- [23] R.A. Aprilianto dan R.M. Ariefianto, "Peluang dan tantangan menuju net zero emission (NZE) menggunakan variable renewable energy (VRE) pada sistem ketenagalistrikan di Indonesia," *J. Paradigma, J. Multidisipliner Mhs. Pascasarj. Indones.*, vol. 2, no. 2, hal. 1–13, Des. 2021, doi: 10.22146/jpmmpi.v2i2.70198.
- [24] M. Triani dan K. Dewi, "Carbon emission reduction and indicative carbon revenue in the coal-fired power plants in Indonesia," dalam *8th Int. Conf. Workshop Basic Appl. Sci. (ICOWOBAS)*, 2021, hal. 1–8, doi: 10.1063/5.0103750.
- [25] Bapennas (2023) "Segera bergabung dengan OECD, strategi mewujudkan Indonesia Emas 2045," [Online], <https://www.bapenas.go.id/berita/segera-bergabung-dengan-oecd-strategi-mewujudkan-indonesia-emas-2045-9yHr9>, tanggal akses: 10-Okt-2023.
- [26] N.A. Pambudi dkk., "Renewable energy in Indonesia: Current status, potential, and future development," *Sustainability*, vol. 15, no. 3, hal. 1–29, Feb. 2023, doi: 10.3390/su15032342.
- [27] J.A. Ordenez, M. Fritz, dan J. Eckstein, "Coal vs. renewables: Least-cost optimization of the Indonesian power sector," *Energy Sustain. Dev.*, vol. 68, hal. 350–363, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.esd.2022.04.017.
- [28] S.P. Kanugrahan, D.F. Hakam, dan H. Nugraha, "Techno-economic analysis of Indonesia power generation expansion to achieve economic sustainability and net zero carbon 2050," *Sustainability*, vol. 14, no. 15, hal. 1–25, Agu. 2022, doi: 10.3390/su14159038.
- [29] I. Utami, M.A. Riski, dan D.R. Hartanto, "Nuclear power plants technology to realize net zero emission 2060," *Int. J. Bus. Manag. Technol.*, vol. 6, no. 1, hal. 158–162, Jan./Feb.2022.
- [30] K. Handayani dkk., "Moving beyond the NDCs: ASEAN pathways to a net-zero emissions power sector in 2050," *Appl. Energy*, vol. 311, hal. 1–19, Apr. 2022, doi: 10.1016/j.apenergy.2022.118580.