



Persimpangan Menuju Nol Emisi

Memilih jalur optimal menuju masa depan energi terbarukan

Contents

Kata pengantar	3
Ringkasan eksekutif	4
Mempercepat transisi energi global	6
Ajakan bertindak bagi sektor kelistrikan	15
Wawasan pasar	16
Metodologi	19

Ringkasan laporan

Laporan ini mengevaluasi dua jalur yang umum dipertimbangkan untuk mencapai emisi nol bersih di sektor listrik pada tingkat global. Temuan menunjukkan bahwa menggabungkan pembangkit listrik penyeimbang, energi terbarukan dan penyimpanan energi menawarkan jalur yang paling layak dan hemat biaya untuk mempercepat dekarbonisasi dan mencapai emisi nol bersih.



Anders Lindberg
Presiden, Wärtsilä Energy
dan Wakil Presiden Eksekutif
Wärtsilä Corporation

Jalur optimal menuju nol emisi karbon

Dunia sedang berada di jalur yang semakin sempit untuk mencapai emisi nol bersih pada tahun 2050 dan membatasi kenaikan suhu global hingga 1,5°C, sebagaimana yang telah dijanjikan oleh lebih dari 190 negara dalam Perjanjian Paris.

“

Dunia sedang berada pada jalur yang semakin sempit untuk mencapai emisi nol bersih pada tahun 2050.”

Sektor listrik sangat penting dalam upaya dekarbonisasi global, yang menuntut transformasi cepat dan berskala besar. Transformasi ini mengharuskan kita mengoptimalkan sistem listrik untuk memungkinkan pengurangan emisi besar-besaran, sambil mempertahankan keandalan dan keterjangkauan energi untuk rumah, industri, dan bisnis di seluruh dunia. Untuk mencapainya, kita memerlukan berbagai teknologi energi yang bekerja sama.

Studi kami menunjukkan bahwa teknologi yang seimbang sangat penting untuk mencapai transisi yang cepat dan hemat biaya menuju 100% energi terbarukan. Transisi energi bergantung pada penyebaran energi terbarukan berskala besar; namun, listrik tetap dibutuhkan bahkan saat angin tidak bertiup, atau matahari tidak bersinar, untuk memastikan keandalan sistem.

Fleksibilitas ini harus berasal dari berbagai sumber teknologi penyeimbang, seperti mesin penyeimbang jaringan dan penyimpanan energi dalam bentuk baterai, karena ini merupakan komponen penting dalam memungkinkan jalur dekarbonisasi yang optimal dan cepat.

Mencapai transisi juga memerlukan tindakan yang terarah dan terkoordinasi dari pemerintah, regulator, perusahaan utilitas, dan operator jaringan. Sangat penting bagi transisi energi bahwa kita dengan cepat memperluas kapasitas terbarukan, mendesain ulang pasar listrik untuk fleksibilitas, dan mempersiapkan integrasi bahan bakar berkelanjutan di masa mendatang.

Kebutuhan untuk meningkatkan energi terbarukan dan penyimpanan energi dipahami dengan baik. Namun, kita masih memerlukan pendekatan regulasi dan kebijakan yang lebih holistik untuk menciptakan sistem tenaga listrik yang berfungsi saat ini, menempatkan kita di jalur menuju emisi nol, dan siap untuk beberapa dekade mendatang. Laporan ini bertujuan untuk menunjukkan jalur optimal untuk mencapai tujuan itu.

Nol emisi berada di persimpangan jalan. Tindakan tegas diperlukan sekarang untuk memastikan kita memilih jalur yang optimal.



Malin Östman
Wakil Presiden,
Strategi dan Pengembangan Bisnis

Ringkasan eksekutif

Mengingat urgensi tindakan global yang terkoordinasi untuk mencapai nol emisi bersih pada tahun 2050, mencapai keselarasan yang lebih baik pada jalur yang paling efektif menuju target dekarbonisasi sangat penting untuk kemajuan yang berarti. Untuk mendukung tujuan ini, Wärtsilä memulai analisis pemodelan sistem tenaga listrik global untuk mengevaluasi dampak jalur dekarbonisasi yang banyak dibahas.

Laporan ini mengevaluasi dua jalur untuk mencapai emisi nol bersih di sektor listrik pada tahun 2050.

Jalur 1: Energi terbarukan dan penyimpanan hanya bergantung pada perluasan energi terbarukan yang bervariasi, yaitu tenaga surya dan angin, serta sistem penyimpanan energi.

Jalur 2: Seimbang menggabungkan pembangkit listrik penyeimbang, misalnya pembangkit listrik dengan mesin fleksibel, di samping energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi.

Temuan menunjukkan bahwa jalur dengan menggunakan pembangkit listrik penyeimbang mencapai nol emisi lebih cepat dan lebih hemat biaya, dengan proyeksi penghematan lebih dari 42% (EUR 65 triliun), emisi 21% lebih rendah, dan penggunaan lahan untuk energi terbarukan dari tahun 2025 hingga 2050 berkurang dibandingkan dengan jalur hanya Energi terbarukan dan penyimpanan. Pengurangan biaya yang signifikan ini sebagian besar disebabkan oleh pembatasan yang diminimalkan dan kelebihan kapasitas energi terbarukan yang berkurang yang dimungkinkan oleh penggunaan pembangkit listrik penyeimbang, yang memberikan fleksibilitas tambahan dan mengoptimalkan sistem secara keseluruhan.

Studi ini juga menemukan bahwa lebih dari 76% pengurangan emisi tahunan tercapai sebelum bahan bakar berkelanjutan diperkenalkan mulai pertengahan dekade berikutnya (2035 dalam model kami), yang menunjukkan bahwa kita dapat mencapai lebih dari tiga perempat target karbon sektor tenaga listrik tanpa menggunakan bahan bakar berkelanjutan yang langka untuk pembangkitan listrik.

Hasilnya menunjukkan bahwa pembangkit listrik penyeimbang sangat penting untuk jalur yang cepat dan hemat biaya menuju nol emisi. Sementara energi terbarukan adalah kunci dekarbonisasi, keandalan sistem bergantung pada fleksibilitas. Penyimpanan energi menawarkan fleksibilitas yang hampir instan, sementara pembangkit listrik penyeimbang menyediakan cadangan penting dan fleksibilitas jangka pendek dan jangka panjang selama jeda dalam pembangkitan energi terbarukan. Bersama-sama, keduanya mendukung sistem energi terbarukan yang andal dan optimal. Menambahkan daya yang seimbang juga mengurangi ketergantungan pada aset yang tidak fleksibel, seperti pembangkit listrik tenaga batu bara, dan karenanya akan mempercepat pengurangan emisi.

Laporan ini menggarisbawahi perlunya tindakan terkoordinasi dalam perluasan energi terbarukan, reformasi pasar, dan pemanfaatan teknologi yang ada untuk memungkinkan transisi menuju nol bersih yang tepat waktu dan hemat biaya.



Keuntungan signifikan dari penambahan pembangkit listrik yang seimbang



Biaya berkurang sebesar EUR 65 triliun: Studi menunjukkan bahwa dibandingkan dengan jalur energi terbarukan dan penyimpanan saja, penerapan pembangkit listrik yang seimbang mengurangi total biaya sistem listrik masa depan hingga 42%, sekitar EUR 65 triliun.



Emisi berkurang sebesar 21%: Penambahan daya yang seimbang dapat mengurangi total emisi CO2 sektor kelistrikan kumulatif antarasekarang dan 2050 sebesar 21%, dibandingkan dengan jalur energi terbarukan dan penyimpanan.



Energi yang terbuang berkurang 88%: Pemodelan menunjukkan bahwa penggunaan daya yang seimbang memungkinkan pengoptimalan sistem listrik yang lebih baik, yang menghasilkan energi terbuang berkurang 88% karena pembatasan energi terbarukan pada 2050, dibandingkan dengan jalur lainnya. Secara total, 458.000 TWh pembatasan akan dapat dihindari, cukup untuk memberi daya pada seluruh dunia (berdasarkan konsumsi listrik saat ini) selama lebih dari 15 tahun.



50% lebih sedikit kapasitas terbarukan dan lahan yang dibutuhkan: Dengan menambahkan pembangkit listrik Penyeimbang, kita dapat mengurangi separuh total kapasitas terbarukan yang dibutuhkan dan secara signifikan mengurangi lahan yang dibutuhkan untuk membangun infrastruktur angin dan surya, jika tidak maka akan diperlukan area yang sebanding dengan ukuran benua Eropa.



Studi tersebut menunjukkan bahwa penerapan pembangkit listrik penyeimbang mengurangi total biaya sistem tenaga listrik di masa depan hingga EUR 65 triliun.”

Mempercepat transisi energi global

Transisi energi global terus mendapatkan momentum, didorong oleh dukungan kebijakan yang tepat sasaran dan penurunan biaya energi terbarukan. Tahun 2023 mencatat rekor kapasitas energi terbarukan baru sebesar 565 GW - meningkat 60% dari tahun 2022. Total kapasitas energi terbarukan yang terpasang mencapai 4.000 GW, yang memasok hampir 30% dari permintaan listrik global¹.

Tonggak-tonggak ini mencerminkan kemajuan signifikan dalam upaya dekarbonisasi, namun kita masih belum mencapai target yang ditetapkan pada COP28 untuk melipatgandakan energi terbarukan menjadi 11.000 GW kapasitas terbarukan pada tahun 2030. Hingga tahun 2022, sektor listrik menyumbang sekitar 40% dari total emisi CO2 terkait energi, yang menggarisbawahi perlunya memenuhi target ini untuk mencapai tujuan iklim yang ditetapkan dalam Perjanjian Paris².

Untuk tetap berada di jalur yang sempit menuju emisi nol bersih, kita perlu segera memasuki 'era implementasi'. Tindakan konkret dan kebijakan pendukung diperlukan untuk mendorong investasi penting yang dibutuhkan untuk transformasi sektor kelistrikan. Sangat penting untuk memastikan bahwa tindakan kita dipandu oleh data yang jelas, yang memungkinkan transisi tercepat menuju sistem energi berkelanjutan dengan biaya terendah.

Menentukan jalur optimal menuju nol emisi bersih

Konsensus luas telah muncul mengenai pentingnya dekarbonisasi yang cepat, namun perspektif sangat berbeda mengenai jalur yang paling efektif untuk mencapai net zero emission di sektor kelistrikan.

Beberapa pihak menganjurkan pendekatan yang hanya berpusat pada sumber energi terbarukan yang bervariasi, seperti angin dan matahari, yang didukung oleh sistem penyimpanan energi seperti penyimpanan energi baterai. Pihak lain berpendapat bahwa, meskipun energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi penting, bentuk fleksibilitas tambahan sangat penting untuk memastikan pasokan listrik yang andal dan hemat biaya.

Mengingat urgensi tindakan global yang terkoordinasi, Wärtsilä memulai analisis pemodelan sistem tenaga listrik global ini untuk mengevaluasi kelayakan dan optimalitas jalur dekarbonisasi yang dibahas secara luas.

Keahlian pemodelan sistem tenaga

Wärtsilä membantu pelanggannya untuk mempercepat perjalanan dekarbonisasi mereka melalui teknologi terdepan di pasar dan keahlian sistem tenaga. Dengan menggunakan perangkat lunak PLEXOS®, Wärtsilä telah menyelesaikan lebih dari 200 analisis negara dan sistem tenaga di seluruh dunia, mengidentifikasi desain sistem tenaga yang optimal untuk mendukung integrasi energi terbarukan dan mengurangi biaya operasional sistem serta emisi.

Pilihan jalur net zero yang kontras

Dalam studi ini, kami mendefinisikan dua jalur yang kontras antara periode 2025-2050 untuk mencapai sistem tenaga listrik net zero dengan tujuan akhir untuk lebih memahami pilihan dan pendekatan untuk dekarbonisasi yang layak.

Jalur 1: Energi terbarukan dan Penyimpanan

Dalam jalur Energi Terbarukan dan penyimpanan, perluasan sektor listrik bergantung secara eksklusif pada energi terbarukan variabel (VRE) dan sistem penyimpanan energi (ESS). Pembangkit listrik yang ada secara bertahap dinonaktifkan pada tahun 2040 tetapi diizinkan untuk beroperasi dalam batas emisi hingga pensiun. Tidak ada kapasitas pembangkit listrik baru kecuali untuk energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi yang diperkenalkan selama cakrawala pemodelan.

Jalur 2: Penyeimbang

Dalam jalur Penyeimbang, perluasan juga dipimpin oleh energi terbarukan dan sistem penyimpanan energi, tetapi dengan penambahan pembangkit listrik penyeimbang yang memberikan fleksibilitas tambahan dan meningkatkan kinerja sistem. Hal ini dimungkinkan untuk bahan bakar berkelanjutan yang diharapkan akan tersedia secara luas pada tahun 2030-an. Pembangkit listrik yang tidak fleksibel yang ada secara bertahap diganti dengan kapasitas baru setelah pensiun. Penambahan kapasitas untuk pembangkit nuklir, biofuel, dan batu bara serta gas dengan penangkapan dan penyimpanan karbon (CCS), mengikuti proyeksi konservatif dari sumber yang tersedia untuk umum, seperti Badan Energi Internasional (IEA) dan Badan Energi Atom Internasional (IAEA).

Pada pertemuan puncak iklim COP28 tahun 2023, pemerintah berkomitmen untuk melipatgandakan kapasitas energi terbarukan secara global hingga tiga kali lipat pada tahun 2030, yang akan meningkat hingga 11 TW pada dekade ini. Target kapasitas ini diterapkan dalam model dan di kedua jalur. Mulai tahun 2025, sistem mengoptimalkan perluasan dan pembangkitan kapasitas berdasarkan batasan yang ditetapkan dan teknologi unik yang tersedia di setiap jalur. Tujuan dari pengoptimalan ini adalah untuk meminimalkan total biaya sistem sekaligus memenuhi batasan ketersediaan, keandalan, dan batas karbon yang diperlukan untuk mencapai target Perjanjian Paris.

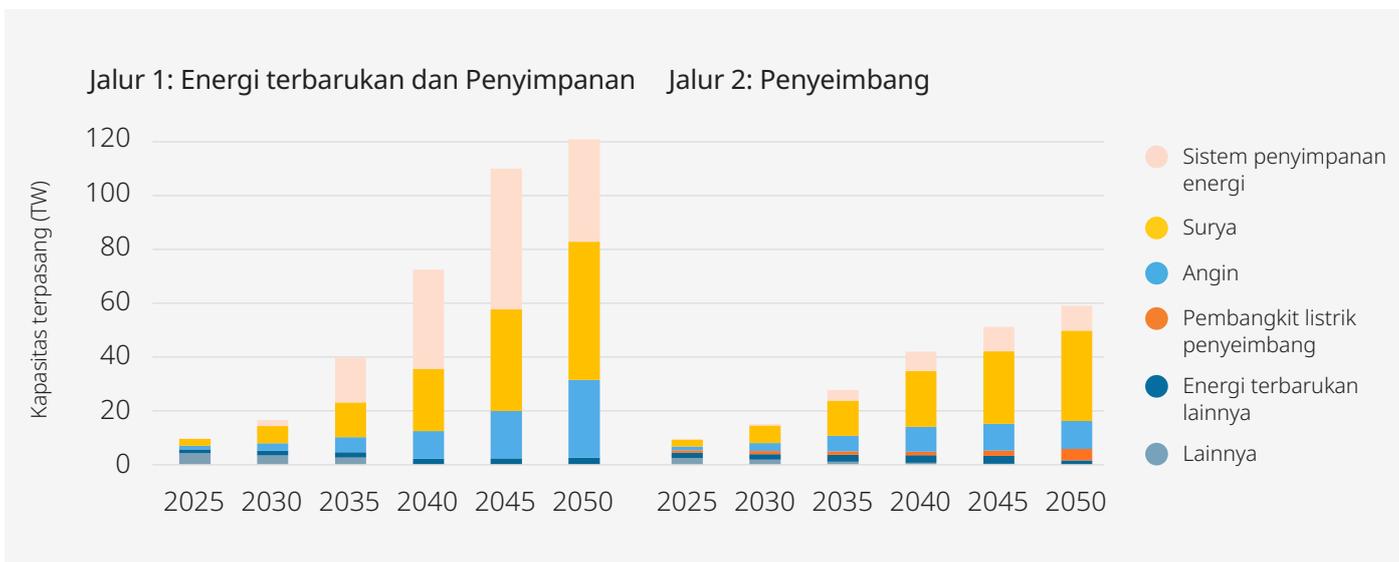
Untuk mengurangi tuntutan komputasi, sistem tenaga global dimodelkan sebagai sistem tunggal dan agregat menggunakan data dari berbagai penelitian dan penyedia data independen. Pendekatan ini memerlukan beberapa penyederhanaan untuk memperhalus perbedaan regional dan menghasilkan pandangan rata-rata dari sistem tenaga global. Kedua jalur menerapkan asumsi yang konsisten untuk variabel-variabel utama, termasuk biaya teknologi, harga bahan bakar, profil energi terbarukan, batas emisi tahunan, permintaan hidrogen di luar sektor tenaga listrik, dan profil beban (tidak termasuk permintaan elektroliser). Hasil model tersebut secara umum selaras dengan hasil lembaga-lembaga energi utama, seperti Bloomberg New Energy Finance (BNEF), International Energy Agency (IEA), dan International Renewable Energy Agency (IRENA), yang menggunakan pendekatan yang lebih terperinci, dari bawah ke atas, dan khusus sektor.

Perluasan kapasitas

Pada jalur Energi Terbarukan dan Penyimpanan, kapasitas terpasang energi terbarukan variabel (tenaga surya dan angin) meningkat hingga lebih dari 79 TW pada tahun 2050, sementara kapasitas penyimpanan energi meningkat hingga lebih dari 37 TW - masing-masing meningkat 31 kali lipat dan 441 kali lipat, dibandingkan dengan total kapasitas terpasang pada tahun 2023.

Dalam jalur Penyeimbang, kapasitas energi terbarukan variabel mencapai lebih dari 41 TW pada tahun 2050, dengan kapasitas penyimpanan energi meningkat hingga lebih dari 10 TW - masing-masing meningkat 16 kali lipat dan 123 kali lipat. Jalur ini juga menggabungkan hampir 4 TW pembangkit listrik yang seimbang sebagai bagian dari campuran kapasitas yang optimal.

Campuran kapasitas
2025-2050



Dengan membandingkan hasil ini, kami melihat peningkatan signifikan dalam pengembangan energi terbarukan dan penyimpanan energi di jalur Energi terbarukan dan penyimpanan. Hal ini menunjukkan bahwa bahkan sejumlah kecil pembangkit listrik penyeimbang yang ditambahkan di jalur Penyeimbang mengurangi kebutuhan untuk perluasan berlebihan sistem energi terbarukan dan penyimpanan energi untuk mencapai sistem yang optimal dari segi biaya.

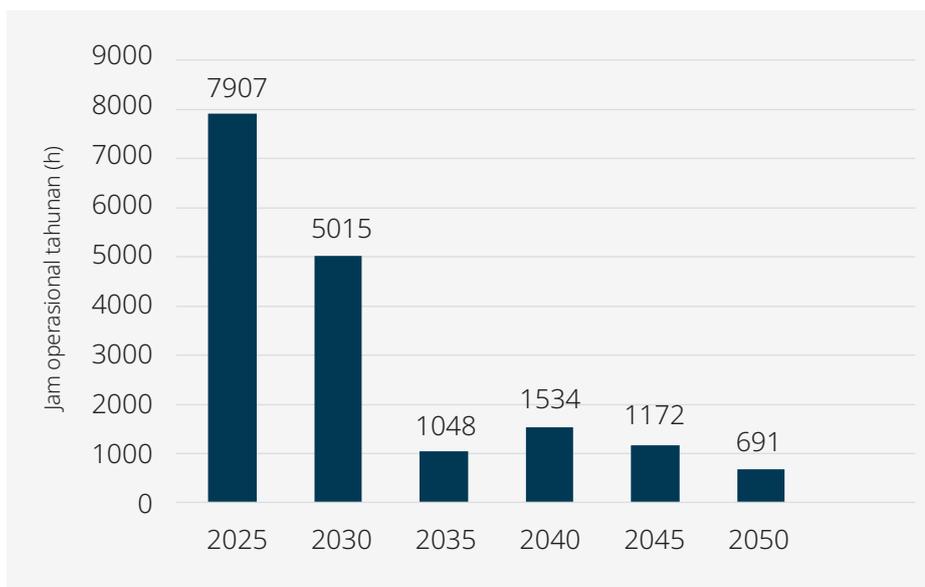
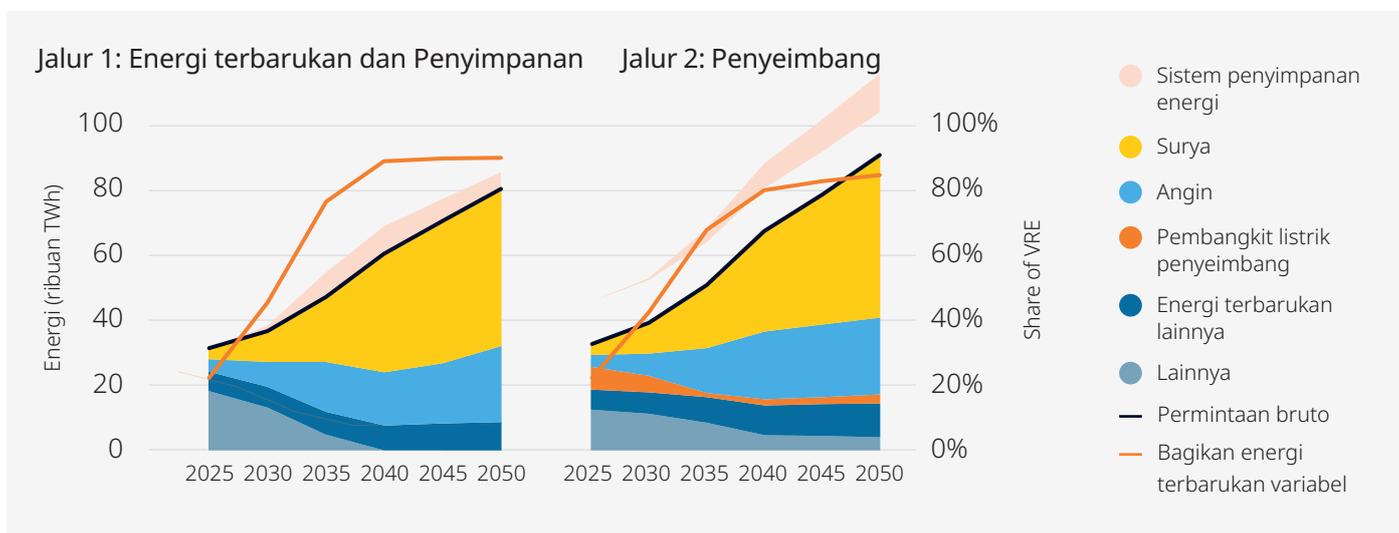
Hasil penting dalam jalur Energi Terbarukan dan penyimpanan adalah skala besar perluasan energi terbarukan yang dibutuhkan. Lahan yang dibutuhkan untuk infrastruktur tenaga angin dan surya saja akan mencakup area yang sebanding dengan ukuran benua Eropa, sehingga menimbulkan tantangan signifikan bagi hak atas tanah, perizinan, dan jangkauan geografis sistem transmisi.

Bagian dari Generasi

Pada kedua jalur tersebut, energi terbarukan variabel memenuhi mayoritas total permintaan listrik pada tahun 2035, mencapai 90% dan 85% dari total pembangkitan daya bersih pada tahun 2050 di jalur Energi terbarukan dan penyimpanan dan jalur Seimbang, masing-masing. Pangsa permintaan yang dipenuhi oleh penyimpanan energi pada tahun 2050 mencapai 6,5% di jalur Energi terbarukan dan penyimpanan, sementara di jalur Penyeimbang mencapai hampir 13,5%. Di jalur Penyeimbang, pangsa permintaan yang dipasok oleh pembangkit listrik penyeimbang secara bertahap menurun dari sekitar 23% pada tahun 2025 menjadi 3% pada tahun 2050.

Meskipun pembangkit listrik Penyeimbang memainkan peran kunci dalam mengoptimalkan sistem, hasil pemodelan menunjukkan bahwa pembangkit listrik tersebut akan dioperasikan dengan jam operasi yang relatif rendah. Akan tetapi, profil operasionalnya dicirikan oleh tingkat peningkatan yang tinggi dan seringnya memulai dan menghentikan. Hal ini menunjukkan bahwa tingkat fleksibilitas operasional yang tinggi sangat penting bagi aset-aset ini untuk secara efektif mendukung keseimbangan energi terbarukan, sehingga aset yang tidak fleksibel, seperti Pembangkit Listrik base load yang lama, tidak cocok.

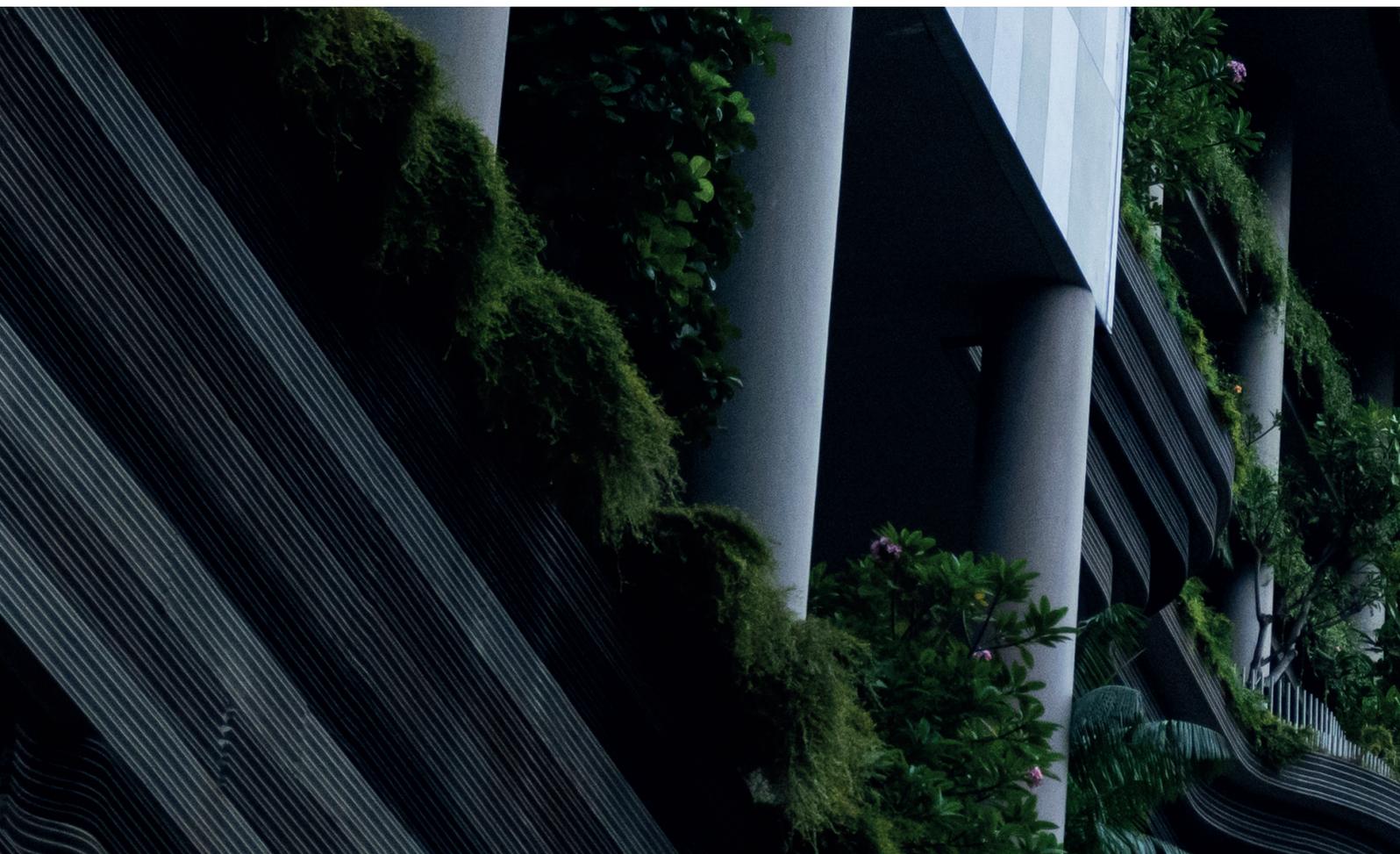
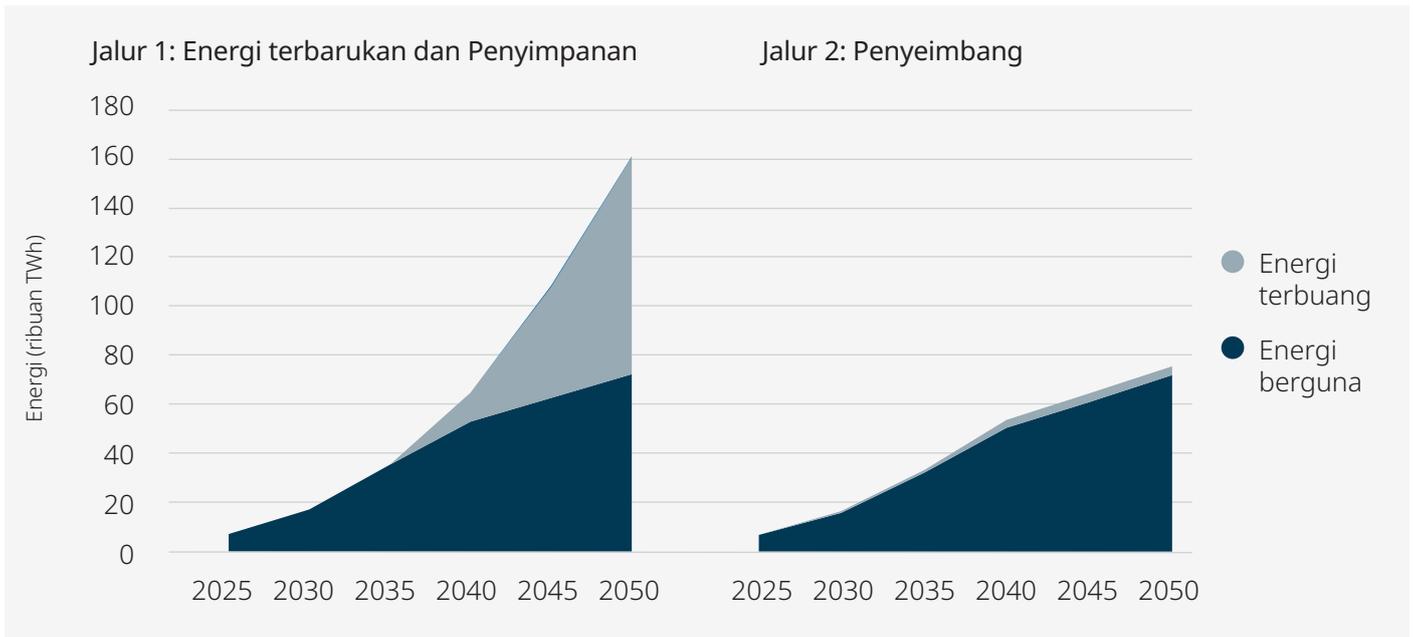
Campuran energi 2025-2050



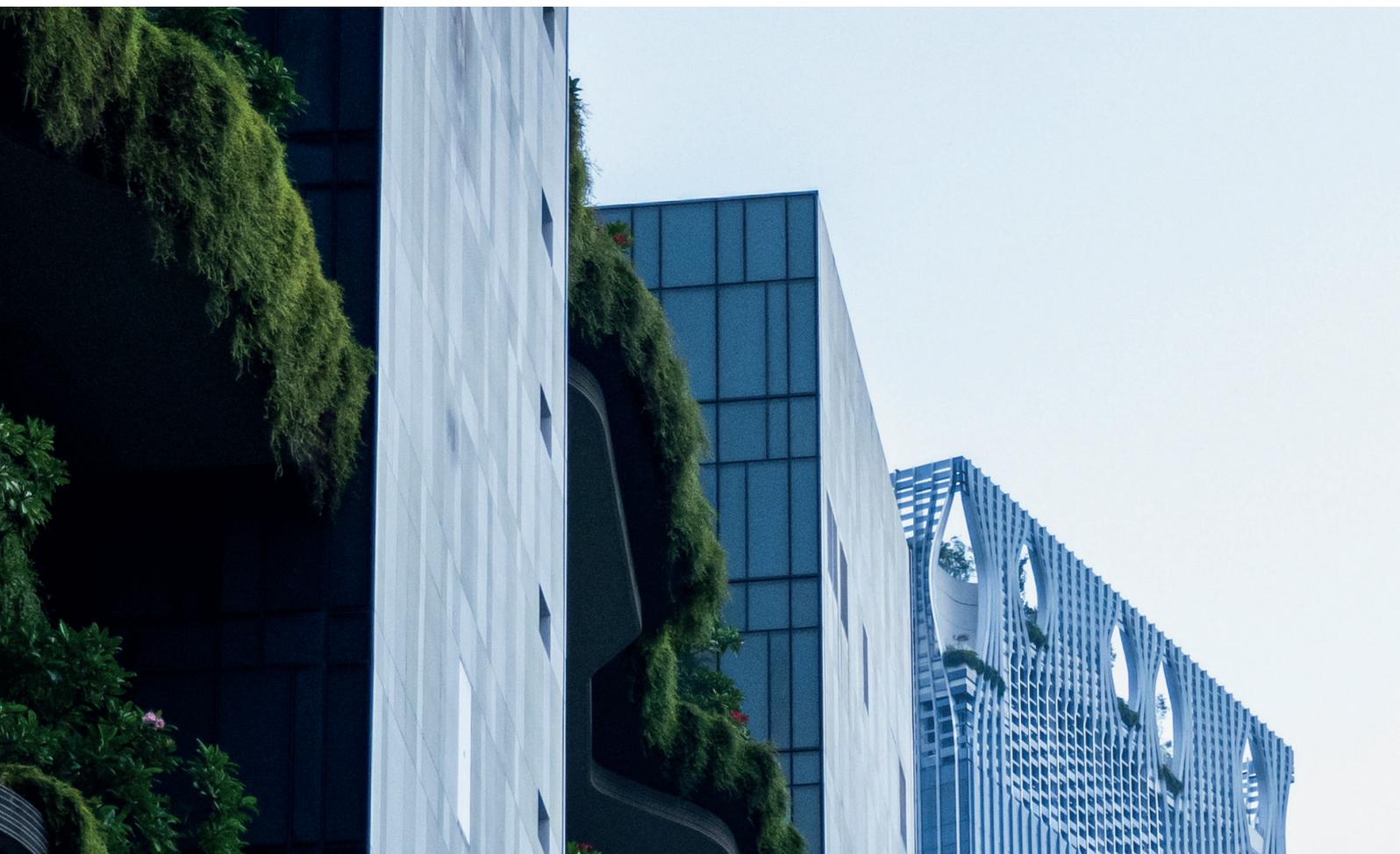
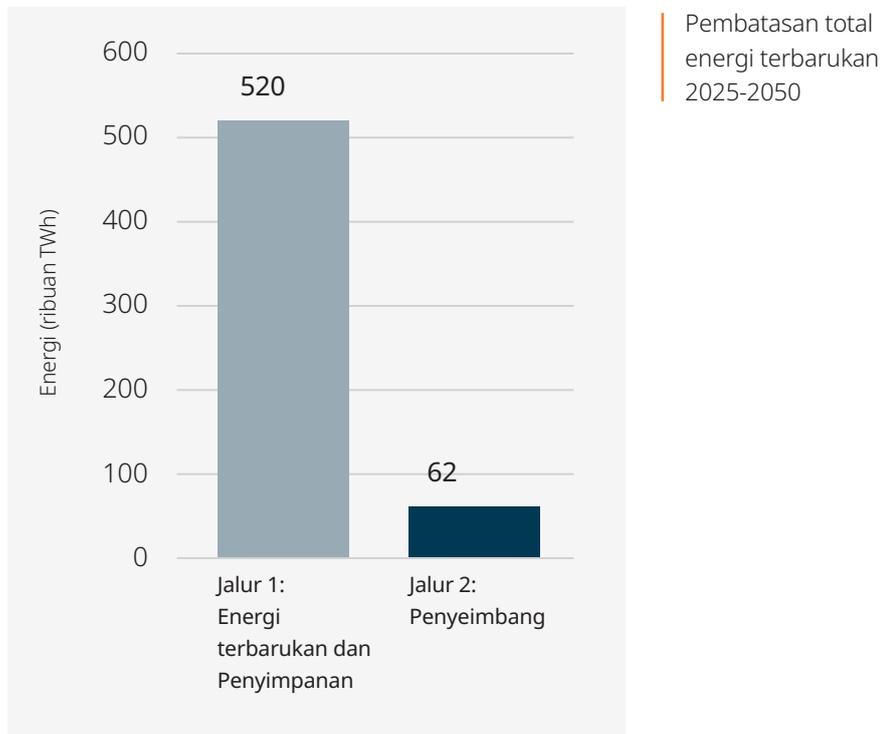
Pembatasan

Meskipun kedua jalur tersebut memenuhi sebagian besar permintaan daya melalui pembangkitan energi terbarukan, perbedaan tingkat perluasan kapasitas di seluruh jalur tersebut berdampak signifikan pada cara pembangkitan energi terbarukan dikelola oleh sistem. Meskipun pembatasan tidak selalu menunjukkan inefisiensi sistem dan dapat memainkan peran penting dalam menjaga stabilitas dan mengatasi kendala transmisi, dalam praktiknya pembatasan yang berlebihan dapat menandakan kendala atau keterbatasan sistem yang serius, yang mengakibatkan pemborosan energi.

Pengurangan energi terbarukan



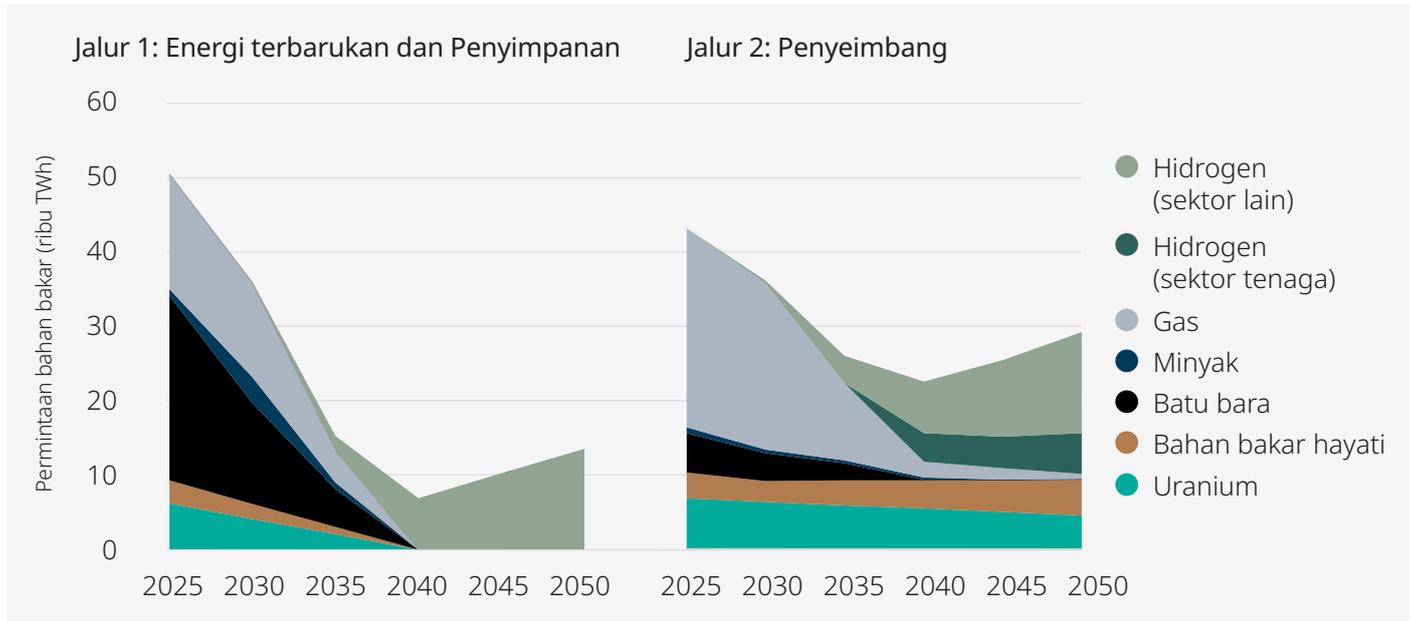
Dalam jalur Energi Terbarukan dan penyimpanan, pembatasan energi terbarukan meningkat tajam pada tahun 2035 dan seterusnya, mencapai sekitar 55% dari total pembangkitan energi terbarukan pada tahun 2050, dibandingkan dengan hanya 5% di jalur Seimbang. Untuk mengkontekstualisasikan hal ini, energi kumulatif yang dibatasi dalam jalur Energi Terbarukan dan penyimpanan dari tahun 2025 hingga 2050 akan cukup untuk memenuhi seluruh permintaan daya dunia pada tahun 2023 (berdasarkan konsumsi listrik saat ini) sel ama lebih dari 15 tahun.



Permintaan bahan bakar dan bahan bakar berkelanjutan

Di kedua jalur tersebut, sektor listrik memainkan peran penting dalam produksi bahan bakar berkelanjutan, yang penting untuk dekarbonisasi perekonomian secara keseluruhan, terutama di sektor-sektor yang sulit dielektifikasi seperti industri, transportasi laut, dan penerbangan.

Permintaan bahan bakar



Dalam jalur Penyeimbang, hidrogen tambahan dihasilkan untuk sektor listrik mulai pertengahan 2030-an dan seterusnya. Mengingat biaya bahan bakar berkelanjutan yang berasal dari hidrogen relatif tinggi, bahan bakar ini digunakan secara eksklusif untuk daya penyeimbang dengan jam operasi rendah, yang memberikan fleksibilitas sistem tambahan saat penyimpanan energi yang terpasang mencapai batas daya atau penyimpanannya.

Emisi

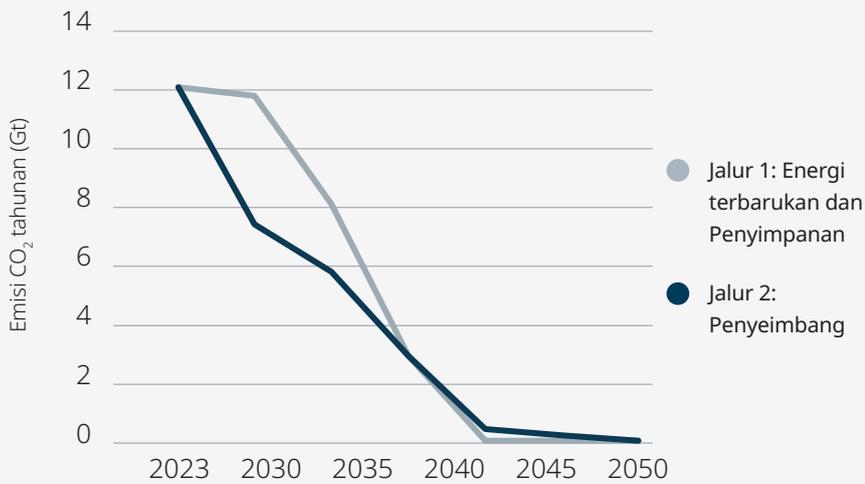
Pada kedua jalur tersebut, batasan emisi karbon diberlakukan untuk memastikan kepatuhan terhadap target Perjanjian Paris, dengan kedua jalur tersebut mencapai nol emisi paling lambat pada tahun 2050. Namun, laju pengurangan emisi sangat bervariasi antara kedua jalur tersebut. Pada jalur Energi terbarukan dan penyimpanan, laju penurunannya lebih bertahap, karena kurangnya kapasitas fleksibel jangka panjang yang diperlukan untuk sepenuhnya menghilangkan kebutuhan akan pembangkit listrik lama yang tidak fleksibel.

Sebaliknya, jalur Penyeimbang melihat penurunan emisi yang lebih cepat karena aset yang tidak fleksibel dihapuskan dan digantikan oleh energi terbarukan yang didukung oleh penyimpanan energi dan pembangkit listrik penyeimbang bahan bakar berkelanjutan untuk menyediakan daya yang kuat dan andal dalam jangka waktu yang lama. Akibatnya, jalur Penyeimbang mencapai pengurangan emisi kumulatif hampir 21% (19 Gt) pada tahun 2050 dibandingkan dengan jalur Energi terbarukan dan penyimpanan, yang setara dengan lebih dari 1,5 tahun emisi sektor listrik global saat ini.

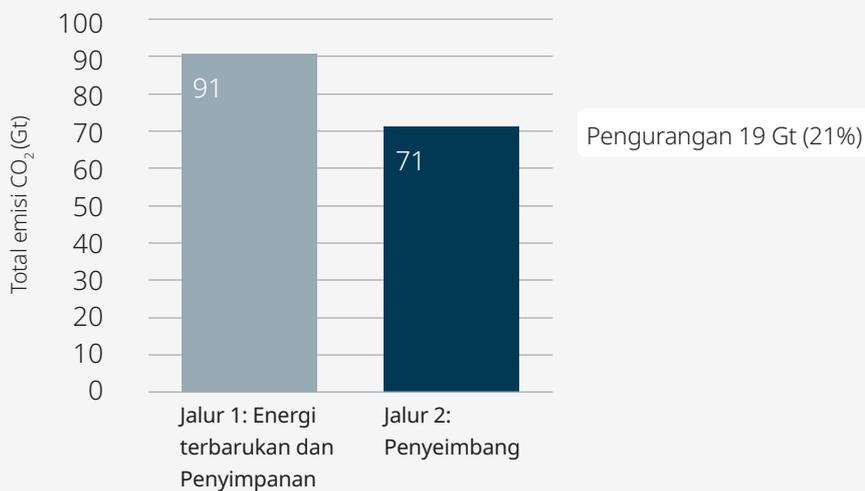
Temuan penting dalam jalur Penyeimbang adalah bahwa lebih dari 76% pengurangan emisi tahunan tercapai sebelum bahan bakar berkelanjutan diperkenalkan di sektor listrik pada pertengahan tahun 2030-an. Pengurangan ini terutama didorong oleh peningkatan skala energi terbarukan dan penyimpanan energi, bersama dengan pengurangan jam operasional untuk menyeimbangkan pembangkit listrik yang menggunakan gas. Sisa 24% pengurangan emisi tahunan tercapai setelah penerapan bahan bakar berkelanjutan.



Perbandingan emisi CO₂ tahunan (sektor listrik)

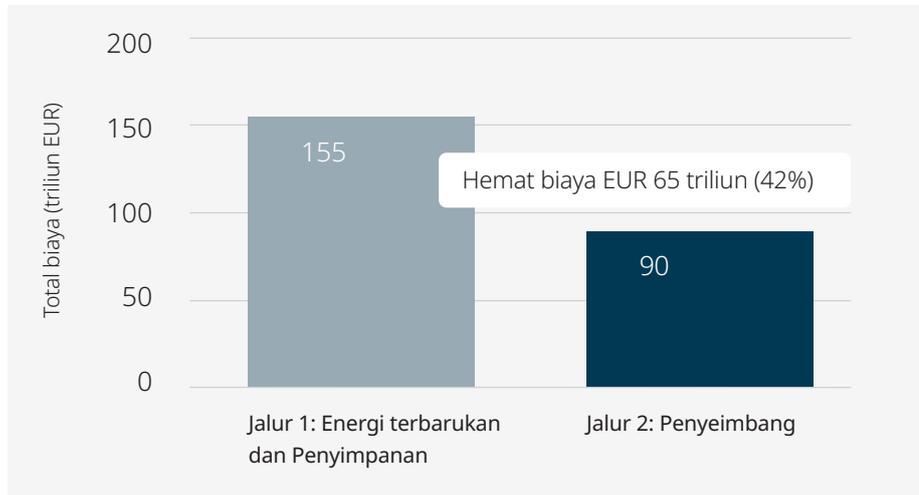


Total emisi CO₂ 2025-2050 (sektor listrik)

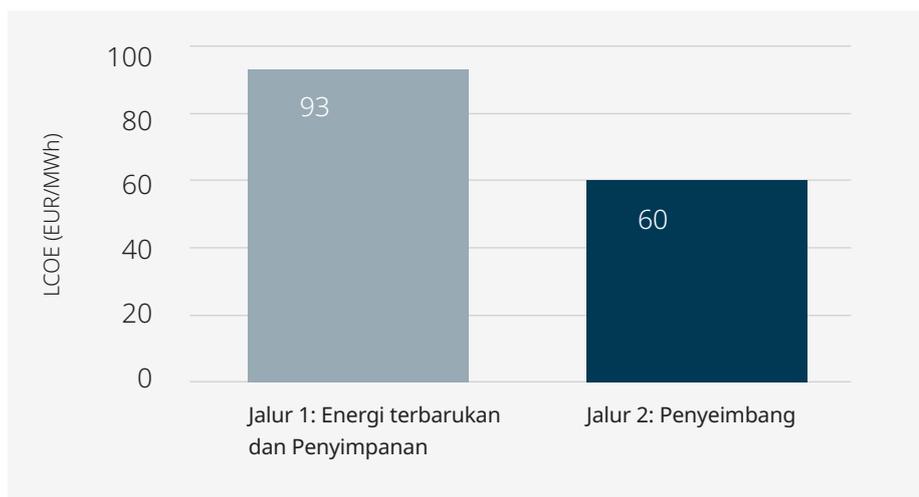


Total biaya sistem

Secara keseluruhan, total biaya sistem antara tahun 2025 dan 2050 diperkirakan sekitar EUR 155 triliun untuk jalur Energi Terbarukan dan penyimpanan dan EUR 90 triliun untuk jalur Penyeimbang. Ini berarti penghematan kumulatif lebih dari EUR 65 triliun untuk jalur Penyeimbang dibandingkan dengan jalur Energi Terbarukan dan penyimpanan - setara dengan lebih dari 60% PDB global saat ini.



Total biaya sistem 2025-2050



Biaya listrik yang diratakan 2025-2050

Biaya kumulatif ini diterjemahkan menjadi biaya listrik yang diratakan (LCOE) sebesar EUR 93/MWh untuk jalur Energi Terbarukan dan penyimpanan dan EUR 60/MWh untuk jalur Penyeimbang. Kesenjangan biaya yang signifikan antara kedua jalur, sebagian besar disebabkan oleh kelebihan kapasitas energi terbarukan yang substansial di jalur Energi Terbarukan dan penyimpanan dan tingginya volume energi yang terbuang karena pembatasan.

Jalur yang jelas ke depan

Dalam mengevaluasi berbagai jalur untuk mencapai emisi nol bersih, hasil pemodelannya meyakinkan: penyertaan pembangkit listrik penyeimbang sangat penting untuk optimalisasi sistem yang hemat biaya. Energi terbarukan merupakan inti dari dekarbonisasi, tetapi keandalan sistem bergantung pada fleksibilitas.

Fleksibilitas hadir dalam berbagai bentuk, masing-masing memainkan peran penting. Penyimpanan energi sangat penting untuk fleksibilitas yang hampir seketika dan pengalihan energi berdurasi pendek, sementara daya penyeimbang, yang tersedia selama jeda panjang dalam pembangkitan energi terbarukan, memberikan fleksibilitas dalam jangka waktu yang lama. Pada akhirnya, penerapan daya penyeimbang di samping penyimpanan energi merupakan campuran teknologi yang optimal untuk mendukung energi terbarukan.

Seruan untuk bertindak bagi sektor kelistrikan

Dikarenakan jalur optimalnya sudah jelas, tindakan tegas dari seluruh sektor kelistrikan kini sangat penting untuk mencapai transisi energi berbiaya rendah dan rendah emisi sesuai dengan Perjanjian Paris 2050. Daripada hanya berfokus pada percepatan pembangunan energi terbarukan, pemikiran holistik di tingkat sistem harus diterapkan saat berinvestasi dan merencanakan sistem kelistrikan. Perencanaan strategis untuk sistem kelistrikan masa depan dan penambahan kapasitas harus dipandu oleh data untuk mencapai transisi yang cepat dan campuran teknologi yang optimal dari segi biaya untuk listrik yang terjangkau.

1. Memungkinkan percepatan perluasan energi terbarukan dan teknologi penyeimbang

- Memungkinkan perluasan energi terbarukan dengan cepat melalui peningkatan sistem transmisi, penyederhanaan proses perizinan, dan investasi dalam interkoneksi regional.
- Memperluas teknologi penyeimbangan jangka pendek dan panjang dengan cepat untuk memastikan keandalan dan ketahanan jaringan. Bersama-sama, teknologi ini mendukung pertumbuhan energi terbarukan yang cepat, mengurangi ketergantungan pada aset yang tidak fleksibel, seperti pembangkit listrik tenaga batu bara, dan mempercepat pengurangan emisi.
- Memobilisasi pembiayaan untuk mengamankan pengembangan proyek energi terbarukan dan penyeimbang pada skala dan kecepatan yang diperlukan.

2. Mendesain ulang pasar listrik untuk memberikan insentif fleksibilitas

Mereformasi struktur pasar listrik untuk mendukung integrasi energi terbarukan yang lebih besar. Penyeimbangan harus diberi insentif untuk memberikan fleksibilitas penting guna mengoptimalkan sistem energi terbarukan.

- Meningkatkan ketelitian pengiriman hingga resolusi 5 menit di pasar grosir energi. Kerangka waktu yang lebih pendek dan lebih tepat untuk penyesuaian harga dan pasokan akan mendukung integrasi energi terbarukan yang bervariasi dan memberi insentif bagi pembangkit listrik penyeimbang yang fleksibel yang dapat merespons dengan cepat perubahan permintaan listrik.
- Memperkenalkan layanan tambahan baru, seperti produk cadangan, peningkatan, tegangan, dan inersia, untuk menjamin stabilitas jaringan. Kebutuhan akan layanan tambahan meningkat seiring penetrasi energi terbarukan yang lebih tinggi, dan pasokan dapat dioptimalkan bersama dengan persyaratan energi dan penyeimbangan dan disediakan oleh teknologi penyeimbangan.
- Menetapkan model pendapatan yang dapat dibiayai bank untuk pembangkit listrik penyeimbang dengan jam operasi rendah, termasuk mekanisme seperti pembayaran kapasitas yang terkait dengan fleksibilitas dan penetapan harga kelangkaan. Pembangkit listrik penyeimbang memberikan manfaat tingkat sistem yang penting, namun karena faktor kapasitas yang rendah, mekanisme pendapatan tambahan diperlukan untuk menghasilkan investasi yang cukup ke dalam aset penyeimbang.

3. Pilih teknologi yang tepat untuk masa depan dan persiapkan bahan bakar yang berkelanjutan

- Pilih teknologi penyeimbang yang tahan masa depan dan siap untuk pengenalan bahan bakar berkelanjutan guna sepenuhnya mendekarbonisasi sektor listrik mulai pertengahan 2030-an dan seterusnya.
- Dukung peningkatan pesat energi terbarukan dan aktifkan penghentian bertahap teknologi lama, dengan menggunakan gas alam sebagai bahan bakar transisi untuk pembangkit listrik penyeimbang yang fleksibel. Ini tidak boleh disamakan dengan pendekatan 'status quo', karena gas akan digunakan dengan sangat berbeda dari saat ini, dan dalam jumlah yang jauh lebih sedikit. Menjembatani transisi dengan gas untuk penyeimbangan dapat memangkas lebih dari 75% emisi CO₂ sektor listrik tahunan pada tahun 2035 (dibandingkan dengan tingkat tahun 2023).
- Persiapkan pengenalan bahan bakar berkelanjutan dengan membangun keahlian dan infrastruktur yang dibutuhkan untuk memastikan transisi yang mulus ke sektor listrik yang sepenuhnya terdekarbonisasi di masa mendatang. Setelah bahan bakar berkelanjutan menjadi layak dalam skala besar, yaitu tersedia secara komersial dan kompetitif, pengurangan emisi dapat didorong hingga 100%. Daya saing atau paritas biaya bahan bakar berkelanjutan akan memerlukan tindakan kebijakan, yang bisa berupa subsidi, regulasi, atau pajak karbon (atau campurannya).

Wawasan Pasar

Amerika

Amerika Serikat: Komposisi pembangkit listrik AS telah berubah dalam dekade terakhir. Pembangkit listrik berbahan bakar batu bara telah menurun drastis dan dengan cepat digantikan oleh energi terbarukan dan gas alam, yang mengakibatkan pengurangan emisi gas rumah kaca lebih dari 5% sejak 2015. Insentif pemerintah, seperti Undang-Undang Pengurangan Inflasi (IRA), mandat nol bersih tingkat negara bagian, dan penurunan biaya teknologi akan terus mendorong pertumbuhan pesat pembangkit listrik terbarukan. Pertumbuhan ini membawa lebih banyak variabilitas dalam produksi energi dan memerlukan pembangkit listrik yang dapat didistribusikan secara fleksibel untuk mengelola output tersebut. Sementara, misalnya, Texas telah menjadi pemimpin dalam pembangkit listrik tenaga angin dan surya, negara bagian tersebut juga memperkenalkan dana untuk mendukung investasi baru dalam daya penyeimbang yang dapat didistribusikan secara fleksibel dan tidak berdurasi. Dana tersebut bertujuan untuk mendukung ekonominya yang tumbuh pesat dan memastikan listrik yang andal dan terjangkau. Pada tahun 2023, California, yang telah lama dianggap sebagai pelopor dalam ambisi energi terbarukan, perlu mengurangi lebih dari 2,6 juta MWh energi terbarukan karena ketidakfleksibelan jaringan. Jumlah energi tersebut cukup untuk memberi daya pada 250.000 rumah. Daya penyeimbang yang fleksibel sangat penting untuk mendukung energi terbarukan yang terputus-putus dan menghindari pembatasan besar-besaran yang jika tidak akan mengakibatkan biaya bagi konsumen. Diperlukan lebih banyak insentif untuk memastikan teknologi penyeimbang tertanam dalam sistem tenaga listrik AS.



Risto Paldanius
Wakil Presiden,
Amerika

Brasil: Kondisi cuaca ekstrem, seperti kekeringan bersejarah di Brasil tahun ini (2024), telah menyoroti kebutuhan mendesak untuk diversifikasi energi guna memastikan keandalan sistem. Dengan tingkat reservoir yang menurun tajam, solusi fleksibel sangat dibutuhkan untuk mencegah pemadaman listrik dan menjaga stabilitas sistem tenaga. Menggabungkan pembangkit listrik yang seimbang akan menjadi kunci untuk meningkatkan keandalan dan fleksibilitas sistem. Daya yang seimbang, seperti mesin yang fleksibel, dapat mendukung energi terbarukan, terutama selama periode kekeringan kritis, dan dapat diakses secara ekonomi serta maju secara teknologi. Saat Brasil bersiap menjadi tuan rumah COP30 pada tahun 2025, fokus pada solusi energi berkelanjutan menjadi semakin penting. Negara ini memiliki peluang unik untuk menunjukkan komitmennya terhadap masa depan energi yang tangguh dan terjangkau dengan mengintegrasikan energi terbarukan, penyimpanan energi, dan daya yang seimbang, untuk memberikan pendekatan yang seimbang guna mencapai emisi nol bersih. Pendekatan ini tidak hanya memastikan stabilitas sistem tetapi juga mempercepat dekarbonisasi dan mengurangi emisi secara keseluruhan.

Chili memiliki ambisi besar untuk mencapai campuran energi terbarukan sepenuhnya pada tahun 2050. Negara tersebut telah membuat kemajuan signifikan dalam menambah pembangkitan energi terbarukan, tetapi fleksibilitas sistem yang lebih besar diperlukan untuk mengatasi intermittensi energi surya dan angin. Hal ini sejalan dengan temuan laporan kami, yang menekankan peran penting pembangkit listrik penyeimbang dalam meningkatkan keandalan dan fleksibilitas sistem selama jeda yang panjang dalam pembangkitan energi terbarukan variabel. Menggabungkan daya penyeimbang yang fleksibel, seperti mesin penyeimbang jaringan yang dapat dengan cepat dinyalakan dan dihentikan, dapat memberikan keseimbangan yang diperlukan saat sumber daya terbarukan tidak tersedia, melengkapi tujuan netralitas karbon negara tersebut. Penelitian kami di Chili memperkirakan bahwa menggabungkan energi terbarukan, penyimpanan energi, dan daya penyeimbang dapat menghemat \$17 miliar pada tahun 2045. Namun, serupa dengan tantangan global, infrastruktur transmisi yang terbatas dan perlunya kerangka peraturan yang mendukung tetap menjadi tantangan penting untuk mengintegrasikan energi terbarukan secara efisien dan memastikan transisi yang berkelanjutan. Hal ini menggarisbawahi perlunya tindakan terkoordinasi dalam perluasan energi terbarukan, reformasi pasar, dan pemanfaatan teknologi yang ada untuk memungkinkan transisi menuju nol bersih yang tepat waktu dan hemat biaya.

Afrika dan Eropa

Finlandia bermaksud mencapai netralitas karbon pada tahun 2035, dengan peningkatan signifikan dalam kapasitas terbarukan yang bergantung pada cuaca, khususnya tenaga angin. Bersamaan dengan itu, sistem tenaga listrik akan mengalami pengurangan bertahap dalam kapasitas tetap karena unit bahan bakar fosil yang tidak fleksibel yang lama tidak lagi digunakan. Meskipun demikian, kapasitas yang tetap dan fleksibel tetap penting untuk mengimbangi tenaga angin selama kondisi cuaca yang tidak menguntungkan, terutama selama periode dingin dan angin rendah yang berkepanjangan. Pemodelan Finlandia terbaru kami menunjukkan bahwa dengan sistem tenaga listrik saat ini di Finlandia, harga listrik akan menjadi 30% lebih tinggi pada tahun 2027 dibandingkan dengan tahun 2023. Untuk mengatasi hal ini, kami menghitung bahwa mengintegrasikan daya penyeimbang yang tetap dan fleksibel sebesar 2 GW dapat mengurangi biaya listrik hingga 10%, setara dengan EUR 1,3 miliar dan meningkatkan stabilitas sistem. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengadopsi mekanisme kapasitas yang dirancang dengan cermat dan berkelanjutan di masa depan. Kapasitas baru yang tetap dan fleksibel, bersama dengan penyimpanan energi dan respons sisi permintaan, juga akan menjadi kunci untuk memastikan keamanan pasokan di masa depan dan mencapai target iklim.



Kenneth Engblom

Wakil Presiden,
Afrika dan Eropa

Polandia bermaksud mempercepat peralihan dari batu bara, yang saat ini menjadi sumber utama listrik dan pembangkit pemanas. Negara tersebut telah memajukan target penghentian penggunaan batu bara dari tahun 2049 menjadi tahun 2035, dan bermaksud mencapai netralitas karbon pada tahun 2050. Porsi energi terbarukan di Polandia terus tumbuh, mencapai 27% dari produksi energi saat ini (naik 3% dari tahun ke tahun), dengan rencana untuk meningkatkan kapasitas angin lepas pantai dan darat dari 10 menjadi 25 GW pada tahun 2030. Tantangan kritisnya adalah kurangnya kapasitas penyeimbang dalam jaringan, yang menimbulkan risiko terhadap stabilitas.

Polandia juga memiliki jaringan pemanas distrik terbesar di Eropa, dengan total kapasitas 54 GW yang sebagian besar terdiri dari boiler berbahan bakar batu bara. Dekarbonisasi dan modernisasi sektor ini menimbulkan tantangan sekaligus peluang, karena jaringan pemanas distrik juga merupakan sumber fleksibilitas terbesar bagi jaringan listrik. Pemodelan terbaru kami di Polandia menunjukkan bahwa dekarbonisasi yang hemat biaya di kedua sektor tersebut dimungkinkan dengan mengoptimalkan panas dan listrik secara bersama-sama. Ini akan memungkinkan Polandia untuk meningkatkan pangsa energi terbarukannya menjadi 68% pada tahun 2032, mengurangi pangsa batu bara menjadi 26% dalam listrik dan 8% dalam pemanas, dan menghasilkan penghematan kumulatif sebesar 3,8 BEUR. Untuk mencapai hal ini, sangat penting bagi Polandia untuk memperkenalkan berbagai teknologi fleksibel, dengan mesin pemanas dan listrik gabungan, pompa panas, dan penyimpanan panas sebagai fasilitator utama, dilengkapi dengan boiler listrik dan penyimpanan energi baterai.

Kontribusi yang ditentukan secara nasional (NDC) **Maroko** yang diperbarui mengharuskan negara tersebut untuk mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 18,3% pada tahun 2030. Untuk mencapainya, negara tersebut berambisi mencapai 52% listrik terbarukan pada tahun 2030, namun mengintegrasikan energi terbarukan pada skala ini menimbulkan tantangan. Pemodelan kami di Maroko merekomendasikan sistem yang seimbang dengan energi terbarukan, penyimpanan energi baterai, dan pembangkit listrik yang fleksibel, termasuk 60% mesin penyeimbang jaringan. Kombinasi ini dapat mengoptimalkan integrasi energi terbarukan, mengurangi biaya bahan bakar, dan memastikan keandalan untuk mencapai ambisi tersebut melalui jalur yang hemat biaya dan rendah emisi.

Timur Tengah dan Asia

India: Bayangkan masa depan di mana jaringan listrik India mengintegrasikan 500 GW sumber bahan bakar non fosil secara mulus pada tahun 2030. Untuk mencapai visi ini, sangat penting untuk berinvestasi dalam sumber daya seperti pembangkit listrik penyeimbang. Studi menunjukkan bahwa pada tahun 2030, India akan membutuhkan 9 GW mesin penyeimbang yang fleksibel, yang memanfaatkan gas, untuk mengintegrasikan energi terbarukan secara efisien dan andal. Dengan restrukturisasi pasar listrik untuk menyediakan model pendapatan yang dapat dibiayai, kita dapat menarik investasi dalam teknologi fleksibel dan pembangkit listrik penyeimbang dengan jam operasi rendah. Pergeseran strategis ini akan memastikan masa depan energi yang stabil dan berkelanjutan bagi India.

Indonesia: Mencapai target emisi nol di Indonesia pada tahun 2060 atau lebih cepat memungkinkan tetapi memerlukan upaya signifikan untuk menambah energi terbarukan dan solusi penyeimbang dalam skala besar, sambil menghentikan pembangkit listrik yang tidak fleksibel. Memperluas pembangkitan energi terbarukan dengan cepat dalam jangka pendek sangat penting untuk mencapai tujuan iklim. Pemodelan terbaru kami di Indonesia menunjukkan bahwa pembangkitan listrik terbarukan di Indonesia dapat mencapai 3-4 kali lebih tinggi dari target saat ini, tetapi sangat penting untuk menyesuaikan peningkatan daya terbarukan dengan penambahan teknologi penyeimbang untuk mengoptimalkan biaya produksi energi secara keseluruhan.

Arab Saudi telah memulai perjalanan transisi energinya, dan proyek energi terbarukan skala giga pertamanya kini sedang dibangun. Saat ini kapasitas penyimpanan energi sebesar 8 GWh sedang dilelang dan generasi muda Saudi yang peduli lingkungan memainkan peran penting dalam perencanaan energi masa depan negara tersebut. Visi Saudi difokuskan pada pencapaian 50% energi terbarukan dan 50% listrik berbasis gas alam pada tahun 2030. Kebutuhan akan fleksibilitas diakui sebagai pendorong penting keandalan sistem dan integrasi energi terbarukan.

Uni Emirat Arab adalah pemimpin energi hijau di Timur Tengah. Namun, dengan perubahan teknologi dalam desalinasi air dan penambahan energi nuklir serta ladang surya yang kuat, UEA menghadapi tantangan baru dengan sistem energinya. Musim dingin akan membutuhkan penyeimbangan yang efisien, sementara musim panas membutuhkan daya yang kuat dan efisien. Perusahaan utilitas nasional telah mengidentifikasi kebutuhan akan kapasitas tambahan yang dapat didistribusikan dan fleksibel dan akan memasang lebih dari 2,5 GW pembangkit listrik berbasis gas untuk memenuhi permintaan puncak dan permintaan menengah sistem. Ini akan memungkinkan percepatan lebih lanjut dari transisi energi bersih di UEA.



Frederic Carron
Wakil Presiden,
Timur Tengah dan Asia

Metodologi

Analisis dalam laporan ini didasarkan pada optimalisasi tekno-ekonomi untuk menentukan campuran kapasitas berbiaya paling rendah yang diperlukan untuk memenuhi permintaan listrik di masa mendatang dengan tetap mematuhi batasan emisi dan kendala politik lainnya. Pembangkit listrik konvensional disertakan dengan spesifikasi teknis dan sumber bahan bakarnya untuk memodelkan emisi dan perannya secara akurat dalam menyeimbangkan pembangkitan energi terbarukan yang bervariasi. Pembangkitan tenaga angin dan surya dimodelkan menggunakan profil per jam berdasarkan data cuaca.

Optimalisasi terperinci ini menggunakan pendekatan kronologis, yang menyeimbangkan variabilitas pembangkitan energi terbarukan dan beban per jam dari tahun 2023 hingga 2050. Model ini mengoptimalkan perluasan sistem dengan pengiriman, menggunakan resolusi satu jam untuk menangkap pola beban dan pembangkitan energi terbarukan dengan sangat rinci.

Sistem tenaga listrik global digabungkan menjadi satu model, menyelaraskan berbagai profil tenaga listrik regional untuk mempertahankan pola harian seperti puncak permintaan dan keteraturan output tenaga surya. Pendekatan agregat ini menghindari perbedaan zona waktu yang dapat mendistorsi profil permintaan dan pembangkitan.

Asumsi umum

Kedua Jalur tersebut memiliki asumsi dasar yang sama untuk faktor-faktor utama:

- Campuran kapasitas awal pada tahun 2023 (sumber: Platts, IEA WEO 2023).
- Batas CO₂ tahunan hingga tahun 2050 (IEA WEO 2023).
- Target energi terbarukan sebesar 11 TW pada tahun 2030 (IEA, IRENA, COP28).
- Harga bahan bakar dan karbon (IEA WEO 2023), kandungan CO₂ per jenis bahan bakar (Statistik Finlandia, selaras dengan EU ETS), pertumbuhan beban (BNEF NEO2024), dan profil energi terbarukan/beban.
- Tidak ada pembatasan penggunaan lahan; kebutuhan lahan dihitung pasca-simulasi.
- Bahan bakar berkelanjutan diasumsikan sebagai hidrogen, tetapi bahan bakar netral karbon lainnya juga dapat dimodelkan.

Keterbatasan

Model ini didasarkan pada satu tahun cuaca, pendekatan umum untuk perencanaan jangka panjang tetapi terbatas dalam menangkap variabilitas multi-tahun. Akibatnya, hasilnya tidak mencakup margin keandalan, dan kebutuhan kapasitas mungkin sedikit lebih tinggi dalam skenario dengan tahun cuaca buruk. Keterbatasan ini khususnya memengaruhi Jalur Energi Terbarukan saja, sehingga estimasi biaya dan pembatasan yang disajikan menjadi konservatif.



Sumber

¹ Renewables 2024: Analysis and Forecast to 2030, International Energy Agency, 2023

² CO2 Emissions in 2022, International Energy Agency, 2023

³ New Energy Outlook, Bloomberg New Energy Finance, 2024

⁴ S&P Global, 2024



Wärtsilä Energy berada di garis depan transisi menuju masa depan energi terbarukan 100%. Kami membantu pelanggan dan sektor kelistrikan untuk mempercepat perjalanan dekarbonisasi mereka melalui teknologi terdepan di pasar dan keahlian sistem kelistrikan kami. Solusi kami meliputi pembangkit listrik dengan mesin fleksibel, teknologi penyimpanan dan pengoptimalan energi, serta layanan untuk seluruh siklus hidup instalasi kami. Mesin kami tahan terhadap masa depan dan dapat beroperasi dengan bahan bakar berkelanjutan. Rekam jejak kami mencakup kapasitas pembangkit listrik sebesar 79 GW, yang 18 GW di antaranya berada dalam perjanjian layanan, dan lebih dari 125 sistem penyimpanan energi, di 180 negara di seluruh dunia.



www.wartsila.com/energy

© 2024 Wärtsilä Corporation – All rights reserved.

No part of this publication may be reproduced or copied in any form or by any means (electronic, mechanical, graphic, photocopying, recording, taping or other information retrieval systems) without the prior written permission of the copyright holder. Neither Wärtsilä Finland Oy, nor any other Wärtsilä Group Company, makes any representation or warranty (express or implied) in this publication and neither Wärtsilä Finland Oy, nor any other Wärtsilä Group Company, assumes any responsibility for the correctness, errors or omissions of information contained herein. Information in this publication is subject to change without notice. No liability, whether direct, indirect, special, incidental or consequential, is assumed with respect to the information contained herein. This publication is intended for information purposes only.