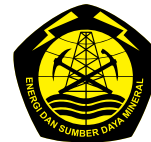




Danish Energy Agency



Kementerian Energi dan
Sumber Daya Mineral
Republik Indonesia

ANALISIS TEKNO-EKONOMI PADA PILIHAN TEKNOLOGI DEKARBONISASI UNTUK SEKTOR PENGGUNA AKHIR ENERGI DI INDONESIA

Analisis biaya, efisiensi, dan emisi CO₂



**ANALISIS TEKNO-EKONOMI PADA PILIHAN TEKNOLOGI DEKARBONISASI UNTUK SEKTOR
PENGGUNA AKHIR ENERGI DI INDONESIA**
Analisis Biaya, Efisiensi, Dan Emisi CO₂

Penulis:

Penasihat, Amanda Ngwenya (Danish Energy Agency)
Penasihat, Morten Egestrand (INDODEPP)
Penasihat, Paolo Zuliani (Danish Energy Agency)
Konsultan, Rio Pradana Manggala Putra (Independen)
Peneliti, Joko Santosa (Badan Riset dan Inovasi Nasional, BRIN)

Sumber gambar: Shutterstock

Tanggal publikasi: Desember 2024



Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral
Republik Indonesia

**Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi
Gedung Slamet Bratanata**

Jl. Pegangsaan Timur No. 1,
Menteng Jakarta Pusat 10320, Jakarta
T 021-39 83 00 77
F: 021-31-90-10-87
E: ebtke@esdm.go.id
www.ebtke.esdm.go.id



Danish Energy Agency

**Danish Energy Agency
Carsten Niebuhrs Gade 43**

DK-1577 Copenhagen V
Denmark
T 0045 33 92 67 00
E: ens@ens.dk
www.ens.dk

Hak cipta

© 2024 Danish Energy Agency. Seluruh hak cipta dilindungi undang-undang.

Laporan ini, berjudul "Analisis Tekno-Ekonomi Pada Pilihan Teknologi Dekarbonisasi untuk Sektor Pengguna Akhir Energi di Indonesia Analisis biaya, efisiensi, dan emisi CO₂," termasuk desain, teks, grafik, dan konten lainnya, adalah kekayaan intelektual dari Danish Energy Agency.

Dilarang memperbanyak, mendistribusikan, atau menggunakan bagian mana pun dari publikasi ini tanpa izin tertulis. Untuk permintaan izin, silakan hubungi Danish Energy Agency.

Kecuali dinyatakan lain, dokumen ini disediakan untuk tujuan informasi. Meskipun segala upaya telah dilakukan untuk memastikan keakuratan, DEA tidak bertanggung jawab atas kesalahan atau kelalaian, atau atas tindakan apa pun yang diambil berdasarkan informasi yang diberikan. Pandangan dan opini yang diungkapkan dalam laporan ini adalah milik penulis dan tidak mencerminkan kebijakan atau posisi resmi entitas afiliasi mana pun.

Diterbitkan oleh DEA dan EBTKE, Desember 2024.

ANALISIS TEKNO-EKONOMI PADA PILIHAN TEKNOLOGI DEKARBONISASI UNTUK SEKTOR PENGGUNA AKHIR ENERGI DI INDONESIA

Analisis biaya, efisiensi, dan emisi CO₂

UCAPAN TERIMA KASIH

Laporan ini disusun oleh Danish Energy Agency (DEA), bermitra dengan Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE) di Indonesia. Kegiatan ini dilakukan sebagai bagian dari Program Kemitraan Energi Indonesia-Denmark (INDODEPP), kerja sama antarpemerintah yang berfokus pada perencanaan energi jangka panjang, integrasi energi terbarukan, dan efisiensi energi. Program ini ditujukan untuk mengembangkan jalur rendah karbon guna mendukung ambisi dekarbonisasi sektor energi Indonesia.

Untuk itu, penulis menyampaikan apresiasi yang tinggi kepada Kelompok Kerja Penyiapan Program Konservasi Energi pada Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE) yang beranggotakan Muhammad Arifuddin (Koordinator Kelompok Kerja Penyiapan Program Konservasi Energi), Haris Askari (Perencana), Nuzulia Fajriningrum (Analisis Konservasi Energi), Deddy Kurniawan (Subkoordinator Perencanaan Program Konservasi Energi), dan Muhammad Atar (Subkoordinator Analisis dan Evaluasi Program Konservasi Energi).

Lebih lanjut, penulis ingin menyampaikan penghargaan yang sebesar-besarnya atas kontribusi berharga yang diberikan oleh para peninjau dokumen ini. Diantaranya Bapak Rusmanto (Peneliti Industri Independen), Aditya Mahalana, Jeanly Syahputri, Tenny Kristiana dari International Council on Clean and Transportation (ICCT) yang meninjau bab-bab industri dan transportasi secara berurutan. Laporan ini juga mendapat manfaat dari wawasan dan keterlibatan aktif berbagai pemangku kepentingan yang masukannya diperoleh selama Diskusi Kelompok Terpumpun dan atau konsultasi tatap muka yang mewakili lembaga pemerintah, organisasi nonpemerintah, asosiasi industri, lembaga penelitian, dan mitra internasional yang tercantum secara lebih rinci di bawah ini.

Kami menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada seluruh kementerian dan lembaga pemerintah yang telah berkontribusi dalam upaya ini, antara lain Badan Perencanaan Pembangunan Nasional (Bappenas), Direktorat Jenderal Perhubungan Darat (DJPD) Kementerian Perhubungan (Kemenhub), Badan Pengelola Transportasi Jabodetabek (BPTJ), dan Pusat Data dan Teknologi Informasi (Pusdatin) di Kementerian ESDM.

Selain itu, partisipasi aktif asosiasi industri, termasuk Asosiasi Semen Indonesia (ASI) dan Asosiasi Produsen Pupuk Indonesia (APPI), semakin memperkaya laporan ini dengan perspektif sektoral. Penulis juga berterima kasih atas kontribusi dari International Energy Agency (IEA) dan Institute for Transportation and Development Policy (ITDP).

Lebih jauh, kami mengucapkan terima kasih atas kontribusi bijaksana dari lembaga-lembaga penelitian, donatur internasional, dan organisasi-organisasi mitra seperti Institute for Essential Services Reform (IESR), Net Zero World Initiative (NZWI), World Resources Institute (WRI), dan Joint Committee for Leaded Gasoline Phase-out (KPBB), serta OECD CEFIM, Krakatau Posco, Langgeng Ciptalindo, dan ASEAN Centre for Energy (ACE).

Penghargaan khusus diberikan kepada para individu yang berpartisipasi dalam diskusi tatap muka, berbagi pengetahuan dan pengalaman khusus mereka. Termasuk Farid Wijaya, Analis Senior Material dan Energi Terbarukan di IESR; Azarine Raina Erwita Putri, Analis Riset di WRI Indonesia; Vivi Fitriyanti, Analis Dekarbonisasi di Cendekia Iklim Indonesia; Rizky Fauzianto, Country Manager Indonesia di RMI, bersama Kelly Carlin, Manajer Transportasi Bebas Karbon, Hannah Lindsell, Associate Senior, dan Andika Akbar Hermawan, Associate Program Energi Asia Tenggara di RMI, atas wawasan berharga mereka.

DAFTAR ISI

Kata Pengantar	IV
Daftar Gambar	VI
Daftar Tabel	VII
Daftar Singkatan	IX
Latar Belakang	X
Kata Pengantar	XII
Ringkasan Eksekutif	XIV
Pendahuluan	XVIII

1	SEKTOR TRANSPORTASI JALAN	2
	1.1 Mobil penumpang	2
	1.2 Kendaraan Roda Dua	8
	1.3 Bus	11
	1.4 Truk	14
	1.5 Ringkasan	20



2	SEKTOR PEMANASAN PROSES INDUSTRI	22
	2.1 Proses Pemanasan: Deskripsi	
	Teknologi Dekarbonisasi	23
	2.2 Analisis Biaya Panas yang Diratakan	27
	2.3 Biaya Bahan Bakar	29
	2.4 Proses Pemanasan: Data Emisi	31
	2.5 Analisis Sensitivitas: biaya bahan bakar	31
	2.6 Analisis Sensitivitas	33
	2.7 Pertimbangan dan keterbatasan	
	lain dari analisis	33
	2.8 Ringkasan	35

3	SEKTOR BANGUNAN PERUMAHAN	39
	3.1 PENCAHAYAAN	40
	3.2 PENDINGIN UDARA	44
	3.3 TELEVISI	46
	3.4 KULKAS	48
	3.5 PENANAK NASI	50
	3.6 KOMPOR	52
	3.7 PEMANAS AIR	54
	3.8 RINGKASAN	56

Daftar Referensi	59
------------------	----



DAFTAR GAMBAR

1. SEKTOR TRANSPORTASI DARAT

Gambar 1.	Intensitas energi final berbagai kategori mobil	3
Gambar 2.	Proyeksi emisi GRK WTW berbagai model mobil berbahan bakar fosil dan listrik hingga tahun 2050	4
Gambar 3.	Total biaya operasional tanpa pajak dan subsidi berbagai kategori mobil yang dibeli pada tahun 2024, selama 10 tahun penggunaan	5
Gambar 4.	Proyeksi total biaya kepemilikan tahunan BEV kecil dan ICEV hingga tahun 2050	7
Gambar 5.	Proyeksi total biaya kepemilikan tahunan kendaraan BEV dan ICEV menengah hingga tahun 2050	7
Gambar 6.	Harga dan jangkauan maksimum model E2W di pasar Indonesia.	8
Gambar 7.	Intensitas energi final berbagai kategori kendaraan roda dua	9
Gambar 8.	Proyeksi emisi GRK WTW berbagai model kendaraan roda dua berbahan bakar fosil dan listrik hingga tahun 2050	9
Gambar 9.	Proyeksi total biaya kepemilikan E2W dan ICE2W hingga tahun 2050	10
Gambar 10.	Jumlah stok bus di Indonesia (2015–2023)	11
Gambar 11.	Intensitas energi final bus biodiesel B35, diesel dan listrik	12
Gambar 12.	Proyeksi emisi GRK WTW model bus biodiesel B35, diesel, dan listrik hingga tahun 2050	12
Gambar 13.	TCO tanpa pajak dan subsidi bus biodiesel B35, solar, dan listrik, selama 10 tahun penggunaan	12
Gambar 14.	Proyeksi TCO bus diesel dan listrik saat ini (2024) dan 2030	13
Gambar 15.	Intensitas energi final berbagai ukuran truk biodiesel B35, diesel, dan listrik	15
Gambar 16.	Proyeksi emisi GRK WTW dari model truk diesel kecil, biodiesel B35, baterai listrik, dan truk listrik sel bahan bakar hingga tahun 2050	15
Gambar 17.	Proyeksi emisi GRK WTW dari model truk diesel besar, biodiesel B35, baterai listrik, dan truk listrik sel bahan bakar hingga tahun 2050	16
Gambar 18.	TCO tanpa pajak dan subsidi 10 tahun beroperasi	16
Gambar 19.	Proyeksi TCO truk diesel kecil, truk bertenaga baterai, dan truk bertenaga sel bahan bakar hingga tahun 2050	17
Gambar 20.	Proyeksi TCO truk besar berbahan bakar diesel, baterai listrik, dan sel bahan bakar listrik hingga tahun 2050	17
Gambar 21.	Total investasi awal pengguna dan biaya O&M untuk mencapai 2 juta unit BEV dibandingkan dengan ICEV pada tahun 2023–2030	18

2. SEKTOR PEMANASAN PROSES INDUSTRI

Gambar 22.	Pemanasan proses dan penggerak mesin secara umum menyumbang sebagian besar emisi terkait energi di sektor industri, seperti yang diamati dalam kasus AS berdasarkan survei ekstensif (Departemen Energi AS, 2022).	24
Gambar 23.	Contoh persyaratan suhu pemanasan proses yang diamati di beberapa perusahaan dalam sektor makanan dan minuman di Indonesia. (INDODEPP, 2023)	25
Gambar 24.	Perbandingan biaya panas rata-rata antara pilihan teknologi untuk tingkat biaya saat ini	30
Gambar 25.	Emisi dari pilihan teknologi pemanasan proses per unit panas yang dihasilkan.	33
Gambar 26.	Dampak biaya biomassa terhadap LCOH dengan harga pasar	34
Gambar 27.	Dampak biaya gas alam terhadap LCOH	34
Gambar 28.	Dampak biaya CO ₂ pada LCOH	35

3. SEKTOR BANGUNAN PERUMAHAN

Gambar 29. Konsumsi Energi Bangunan di Indonesia	40
Gambar 30. Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) Bangunan	41
Gambar 31. Biaya siklus hidup (LCC) pencahayaan berdasarkan skenario (Tanpa SKEM vs. SKEM (biaya riil))	44
Gambar 32. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) dari SKEM untuk pencahayaan	45
Gambar 33. Biaya siklus hidup (LCC) AC berdasarkan skenario (Tanpa SKEM vs. SKEM (biaya riil))	47
Gambar 34. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca dari AC SKEM	47
Gambar 35. Biaya siklus hidup (LCC) televisi berdasarkan skenario Tanpa SKEM dan SKEM (biaya riil)	49
Gambar 36. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca melalui SKEM televisi	49
Gambar 37. Biaya Siklus Hidup (LCC) Kulkas Berdasarkan Skenario Tanpa SKEM dan SKEM (Biaya riil)	51
Gambar 38. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca dari SKEM kulkas	51
Gambar 39. Biaya siklus hidup (LCC) penanak nasi berdasarkan skenario Tanpa SKEM dan SKEM (biaya riil)	53
Gambar 40. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca dari penanak nasi SKEM	53
Gambar 41. Biaya siklus hidup (LCC) kompor induksi dengan skenario Tanpa SKEM dan SKEM (biaya riil)	55
Gambar 42. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca dari SKEM kompor induksi	55
Gambar 43. Biaya siklus hidup (LCC) pemanas air berdasarkan skenario Tanpa SKEM dan SKEM (biaya riil)	57
Gambar 44. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca dari pemanas air SKEM	57

DAFTAR TABEL

1. TRANSPORT SECTOR

Tabel 1. Konsumsi energi dan emisi berbagai kategori mobil berbahan bakar fosil	3
Tabel 2. Konsumsi energi dan emisi berbagai kategori mobil listrik	3
Tabel 3. TCO berbagai kategori mobil berbahan bakar fosil yang dibeli pada tahun 2024, selama 10 tahun kepemilikan	5
Tabel 4. TCO berbagai kategori mobil listrik yang dibeli pada tahun 2024, selama 10 tahun kepemilikan	5
Tabel 5. Konsumsi energi dan emisi kendaraan roda dua berbahan bakar fosil berdasarkan ukuran	9
Tabel 6. Konsumsi energi dan emisi model skuter listrik (e-skuter)	9
Tabel 7. TCO berbagai kategori kendaraan roda dua berbahan bakar fosil yang dibeli pada tahun 2024 untuk 10 tahun kepemilikan	10
Tabel 8. Konsumsi energi dan emisi GRK WTW dari bus ICE yang menggunakan bahan bakar biodiesel B35 dan solar	11
Tabel 9. Konsumsi energi dan emisi bus listrik	11
Tabel 10. TCO bus ICE yang menggunakan biodiesel B35 dan solar yang dibeli pada tahun 2024, selama 10 tahun kepemilikan	13
Tabel 11. TCO bus listrik yang dibeli pada tahun 2024, selama 10 tahun kepemilikan	13
Tabel 12. Konsumsi energi dan emisi berbagai ukuran truk diesel	14
Tabel 13. Konsumsi energi dan emisi truk listrik bertenaga baterai	14
Tabel 14. Konsumsi energi dan emisi truk listrik sel bahan bakar	14
Tabel 15. TCO saat ini dari berbagai truk diesel, truk listrik bertenaga baterai, dan truk listrik sel bahan bakar	16
Tabel 16. Biaya dan pendapatan untuk stasiun pengisian kendaraan listrik komersial 25 kW	19
Tabel 17. Total biaya investasi awal untuk infrastruktur pengisian daya hingga tahun 2030	19

DAFTAR TABEL

2. SEKTOR PEMANASAN PROSES INDUSTRI

Tabel 18.	Ringkasan data keuangan dan teknis untuk pilihan teknologi pemanas di sektor industri	28
Tabel 19.	Ringkasan harga bahan bakar untuk pilihan teknologi pemanas di sektor industri. Harga yang dicetak tebal digunakan untuk estimasi utama LCOH. Harga didasarkan pada Nilai Pemanasan Rendah (Low Heating Value) bahan bakar.	31
Tabel 20.	Perbandingan daya listrik antara LED, CFL dan pijar berdasarkan tingkat pencahayaan yang sama	42

3. SEKTOR BANGUNAN PERUMAHAN

Tabel 21.	Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi pencahayaan	43
Tabel 22.	Asumsi Pencahayaan LED SKEM	44
Tabel 23.	Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi AC	46
Tabel 24.	Asumsi SKEM AC inverter	47
Tabel 25.	Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi TV	48
Tabel 26.	Asumsi SKEM televisi LED	49
Tabel 27.	Data biaya dan emisi GRK dari teknologi utama lemari es	50
Tabel 28.	Asumsi kulkas inverter SKEM	50
Tabel 30.	Asumsi resistansi listrik penanak nasi SKEM	52
Tabel 31.	Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi kompor memasak	54
Tabel 32.	Asumsi SKEM kompor induksi	55
Tabel 33.	Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi pemanas air	56
Tabel 34.	Asumsi pemanas air listrik SKEM	57

DAFTAR SINGKATAN

BET	<i>Battery electric truck/</i> Truk listrik bertenaga baterai
BEV	<i>Battery electric vehicle/</i> Kendaraan bermotor listrik berbasis baterai
CNG	<i>Compressed Natural Gas/</i> Gas Alam Terkompresi
COP	<i>Coefficient of Permormance/</i> Koefisien Kinerja
CRT TV	<i>Cathode ray tube television/</i> Televisi tabung sinar katode
DEA	Danish Energy Agency
DIY	Daerah Istimewa Yogyakarta
DKI	Daerah Khusus Ibukota
DLUC	<i>Direct land-use change/</i> Perubahan penggunaan lahan langsung
E2W	<i>Electric two-wheeler/</i> Kendaraan roda dua listrik
ERIA	<i>Economic Research Institute for ASEAN and East Asia</i>
EV	<i>Electric vehicle/</i> Kendaraan listrik
FCET	<i>Fuel cell electric truck/</i> Truk listrik bertenaga sel bahan bakar
GRK	Gas rumah kaca
GVW	<i>Gross vehicle weight/</i> Berat kotor kendaraan
HP	<i>Heat Pump/</i> Pompa Kalor
HEV	<i>Hybrid electric vehicle/</i> Kendaraan listrik hibrida
ICCT	<i>International Council on Clean Transportation</i>
ICE	<i>Internal combustion engine/</i> Mesin pembakaran internal
ICE2W	<i>Internal combustion engine two-wheeler/</i> Kendaraan roda dua bermesin pembakaran internal
ICEV	<i>Internal combustion engine vehicle/</i> Kendaraan bermesin pembakaran internal
KEN	Kebijakan Energi Nasional/National Energy Policy
KRL	Kereta Rel Listrik/Electric rail train
LCC	<i>Life Cycle Cost/</i> Biaya Siklus Hidup
LCOH	<i>Levelized Cost of Heating/</i> Biaya Pemanasan yang Diratakan
LNG	<i>Liquid Natural Gas/</i> Gas Alam Cair
LPG	<i>Liquified Petroleum Gas/</i> Gas Minyak Cair
LRT	<i>Light rail transit/</i> Angkutan kereta api ringan
MPV	<i>Multi-purpose vehicle/</i> Kendaraan serbaguna
O&M	Operations and maintenance/ Operasi dan pemeliharaan
PLN	Perusahaan Listrik Negara
PV	Photovoltaics/ Fotovoltaik
Samsat	Sistem Administrasi Manunggal Satu Atap
SKEM	Standar Kinerja Energi Minimum
SUV	<i>Sport utility vehicle/</i> Kendaraan utilitas sport
TCO	<i>Total cost of ownership/</i> Total biaya kepemilikan
UK	United Kingdom
WTT	<i>Well-to-tank/</i> Sumur sampai tangki
WTW	<i>Well-to-wheels/</i> Sumur sampai roda

KATA PENGANTAR

Sebagai bagian dari komitmen Indonesia untuk mencapai Net Zero Emissions (NZE) pada tahun 2060, Pemerintah Indonesia telah bertekad untuk mengembangkan peta jalan yang komprehensif dan terukur. Peta jalan NZE akan menjadi panduan penting dalam mengarahkan upaya transisi ke energi yang lebih bersih, lebih berkelanjutan, dan sejalan dengan target pengurangan emisi gas rumah kaca nasional. Pengembangan peta jalan NZE akan memerlukan pemodelan yang cermat, pendekatan yang tepat, dan pembuatan kebijakan yang baik agar hasilnya relevan dan dapat diterapkan. Untuk mencapai tujuan ini diperlukan data dan informasi yang terverifikasi, yang melibatkan masukan dari berbagai pemangku kepentingan.

Katalog Teknologi Sektor Permintaan Energi telah disusun sebagai sumber data yang komprehensif, mencakup aspek-aspek seperti efisiensi energi, dampak emisi, konsumsi energi, dan analisis biaya dari berbagai teknologi dekarbonisasi di sisi permintaan. Katalog ini diharapkan menjadi sumber daya yang berharga bagi berbagai pemangku kepentingan. Pemerintah dapat memanfaatkan data ini untuk merumuskan kebijakan dan regulasi yang relevan yang mendukung transisi energi, sehingga mempromosikan masa depan energi yang berkelanjutan. Investor dan pelaku industri dapat mengidentifikasi peluang investasi dalam sumber daya ini, membantu mereka mengadopsi teknologi yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Selain itu, akademisi dan lembaga penelitian dapat menggunakan katalog ini sebagai landasan dasar untuk studi dan penelitian lebih lanjut di bidang energi dan ilmu lingkungan.

Sebagai penutup, katalog ini bertujuan untuk mewujudkan sektor permintaan energi Indonesia (*demand side sector*) yang lebih bersih dan berkelanjutan. Kami menghargai kerja sama semua pemangku kepentingan, terutama Danish Energy Agency, yang telah memberikan kontribusi data, masukan, dan dukungan dalam penyusunan laporan ini. Semoga laporan ini menjadi landasan untuk mempercepat langkah Indonesia dalam mencapai komitmen NZE dan mewujudkan masa depan energi yang lebih maju dan berkelanjutan.

Dr. Ir. Hendra Iswahyudi
*Direktur, Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan
dan Konservasi Energi*



Indonesia berada pada momen penting dalam upayanya untuk memerangi perubahan iklim dan transisi menuju masa depan yang berkelanjutan dengan komitmen untuk mencapai emisi nol bersih pada tahun 2060. Jalan ke depan membutuhkan keputusan cerdas di semua sektor. Denmark, melalui Program Kemitraan Energi Indonesia-Denmark (INDODEEP), berupaya mendukung Indonesia dalam hal ini, setelah menjalani transisi energi selama 50 tahun. Denmark telah belajar banyak tentang cara mendekarbonisasi sektor-sektor utama seperti sektor kelistrikan dengan memanfaatkan sumber daya energi angin yang kita miliki. Namun, dekarbonisasi sektor kelistrikan saja tidak cukup. Oleh karena itu, selama ini kita juga telah belajar cara memanfaatkan teknologi hemat energi untuk mendekarbonisasi sektor industri, transportasi, dan bangunan kita dengan tujuan politik yang mengikat untuk mencapai netralitas iklim pada tahun 2050.

Sektor industri, bangunan, dan transportasi juga merupakan penyumbang utama emisi gas rumah kaca Indonesia, yang menjadikannya pusat upaya dekarbonisasi di Indonesia. Prioritas ini sejalan dengan perkiraan peningkatan tiga kali lipat permintaan listrik Indonesia pada tahun 2040, yang menciptakan peluang untuk dekarbonisasi berbagai sektor yang sulit dikurangi.

Oleh karena itu, laporan ini bertujuan untuk mengidentifikasi teknologi yang saat ini tersedia di pasar Indonesia, yaitu teknologi konvensional dan aplikasi untuk mobilitas, proses pemanasan, dan peralatan bangunan secara khusus, serta menganalisis data teknoekonomi dari teknologi ini dibandingkan dengan opsi dekarbonisasi nonkonvensional untuk memenuhi penggunaan akhir energi yang sama. Dengan memahami bagaimana teknologi ini bekerja secara teknoekonomi, pengambilan keputusan yang tepat tentang kerangka regulasi yang diperlukan untuk mewujudkan target Net-Zero pada tahun 2060 dapat dicapai. Inovasi dan investasi dalam teknologi yang lebih bersih akan menjadi penting dan Indonesia dapat menjadi contoh pertumbuhan berkelanjutan di Asia Tenggara, yang menunjukkan bahwa pembangunan ekonomi dan dekarbonisasi dapat berjalan beriringan.

Ke depannya, program INDODEEP tetap berkomitmen untuk mendukung pemerintah Indonesia dalam perjalanan transformasinya melalui berbagi pengetahuan yang berkelanjutan. Bersama-sama, kita dapat mencapai target dekarbonisasi masing-masing dan memastikan kualitas hidup yang lebih baik bagi generasi mendatang.

Mr. Ole Emmik Sørensen
Direktur Kerjasama Global, Danish Energy Agency





PENDAHULUAN

Laporan ini menyediakan data teknologi yang komprehensif, termasuk efisiensi, dampak emisi gas rumah kaca (GRK), konsumsi energi, dan analisis biaya untuk berbagai teknologi konvensional dan nonkonvensional (dekarbonisasi) di seluruh sektor permintaan energi tradisional, yaitu industri, transportasi, dan bangunan tempat tinggal. Data tersebut dibagikan untuk tujuan utama menetapkan dasar yang seragam, diterima secara umum, dan terkini untuk kegiatan perencanaan energi, seperti prospek masa depan, evaluasi keamanan pasokan dan dampak lingkungan, evaluasi perubahan iklim. Cakupan laporan ini diperluas hingga mencakup berbagai analisis tekno-ekonomi untuk mendukung pengambilan keputusan di Indonesia mengingat Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) berupaya mencapai emisi nol bersih pada tahun 2060 di sektor energi.

Data yang disajikan di sini dimaksudkan untuk memfasilitasi keterlibatan dan berbagi data di antara berbagai kementerian, pemerintah, akademisi, dan pemangku kepentingan lainnya. Lebih jauh lagi, data yang dikumpulkan dapat digunakan untuk memperbarui data masukan/dasar, menyempurnakan detail teknologi, dan menilai dampak pergeseran teknologi, transisi bahan bakar, dan kebijakan efisiensi energi yang potensial. Tinjauan pakar lokal telah diminta untuk memverifikasi data.

Untuk mencapai emisi nol bersih, diperlukan pendekatan yang seimbang, yang memadukan beragam pilihan teknologi, kerangka regulasi yang efektif, kemampuan infrastruktur, serta keahlian dan kolaborasi yang luas di seluruh pasar dan antarpemerintah. Oleh karena itu, laporan ini merupakan alat yang dapat digunakan untuk mengevaluasi interkoneksi antara teknologi konvensional dan non-konvensional yang diperlukan guna mengakselerasi transisi energi.

Di masa mendatang, pembaruan dokumen ini dapat dilakukan saat informasi baru tersedia.





RINGKASAN EKSEKUTIF

Indonesia merupakan negara terbesar ke-4 di dunia dengan tingkat pertumbuhan PDB sekitar 5% pada tahun 2023, yang menjadikan ekonomi Indonesia terbesar di Asia Tenggara pada tahun 2023 dan ekonomi terbesar ke-7 di dunia (Bank Dunia, 2023) (IEA, 2022). Negara ini diberkahi dengan populasi lebih dari 270 juta orang sehingga muncul kebutuhan besar akan berbagai sumber energi untuk memenuhi permintaan energi yang terus meningkat. Indonesia, telah mengalami peningkatan konsumsi listrik yang meningkat dua kali lipat dari 129 TWh pada tahun 2008 menjadi lebih dari 256 TWh pada tahun 2018 (CLASP, 2020) dengan 75% konsumsi listrik terkonsentrasi di pulau utamanya, Jawa, yang berpenduduk padat. Dua dekade lalu, negara ini mengalami perubahan dari negara pengekspor minyak menjadi negara pengimpor minyak pada tahun 2003. Sementara antara tahun 2017 dan 2022, batu bara dan gas alam mewakili sekitar 25% dari total ekspor barang bersih. Emisi di sektor energi juga mengalami peningkatan lebih dari dua kali lipat dalam dua dekade terakhir menjadikan Indonesia sebagai penghasil emisi CO₂ terbesar ke-9, namun emisi per kapitanya masih berada di rata-rata global (2 ton per kapita) (IEA, 2022).

Sebagai bagian dari kemitraan jangka panjang antara Indonesia dan Denmark di level pemerintah ke pemerintah, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM), melalui Direktorat Jenderal Energi Baru Terbarukan dan Konservasi Energi (EBTKE) bermitra dengan Danish Energy Agency (DEA), sebuah badan di bawah Kementerian Energi, Iklim dan Utilitas di Denmark, sebagai bagian dari Program Kemitraan Energi Indonesia - Denmark (INDODEPP) untuk mengembangkan badan kerja ini. Program ini adalah upaya untuk mendukung target ambisius Pemerintah Indonesia mencapai nol bersih di sektor energi pada tahun 2060. Data dan analisis teknologi yang disediakan di sini dimaksudkan untuk mendukung para pengambil keputusan untuk menilai tren utama untuk teknologi utama yang diidentifikasi; konvensional dan tidak konvensional untuk sektor pengguna akhir industri, transportasi dan bangunan perumahan saat mereka mengembangkan instrumen peraturan yang meningkatkan kemampuan pemerintah untuk memenuhi target ambisius untuk mencapai emisi nol bersih di sektor energi pada tahun 2060.

Analisis dilakukan untuk menilai bagaimana teknologi yang diidentifikasi bekerja secara tekno-ekonomi, membandingkan opsi teknologi dekarbonisasi dengan teknologi konvensional. Kemudian, teknologi representatif dipilih untuk analisis untuk sektor transportasi jalan, pemanasan proses industri, dan bangunan tempat tinggal dengan penekanan pada elektrifikasi masing-masing sektor penggunaan akhir ini. Selanjutnya, Total Biaya Kepemilikan (TCO) dilakukan untuk berbagai kelas dan kategori kendaraan di segmen transportasi jalan untuk menganalisis bagaimana total biaya kepemilikan kendaraan bermesin pembakaran internal (bertenaga bensin atau solar) dibandingkan dengan kendaraan listrik. Untuk pemanasan proses industri; Biaya Pemanasan yang Diratakan (LCoH) dilakukan untuk peralatan pemanasan proses utama dalam industri, yang memungkinkan perbandingan total biaya pembangkitan panas dari teknologi penyediaan panas ini selama masa operasionalnya. Terakhir, Biaya Siklus Hidup (LCC) dilakukan untuk peralatan rumah tangga untuk mengevaluasi total biaya kepemilikan dan pengoperasian peralatan rumah tangga selama masa pakainya untuk memahami dampak keputusan pembelian terhadap lingkungan dan ekonomi.

Analisis tersebut memungkinkan pembuat keputusan untuk mengidentifikasi kesenjangan potensial dan di mana terdapat kebutuhan, misalnya, insentif ekonomi seperti subsidi, hibah, keringanan pajak, potongan harga, dll., yang diperlukan untuk mendukung teknologi tertentu, atau bagaimana kinerjanya secara teknis serta emisi CO₂ yang terkait dengan setiap teknologi dalam upaya untuk memahami kontribusi atau kurangnya kontribusi dalam mendukung tujuan mencapai nol bersih pada tahun 2060 di sektor energi.

Temuan berdasarkan sektor pengguna akhir dan bab dirangkum di bawah ini:

1. SEKTOR TRANSPORTASI JALAN

Analisis transportasi mengevaluasi Total Biaya Kepemilikan (TCO), efisiensi, dan emisi gas rumah kaca (GRK) untuk berbagai model kendaraan arketipe representatif di berbagai kategori. Berikut ini adalah analisis berdasarkan kategori transportasi jalan:

KENDARAAN RODA DUA

- **Kendaraan listrik roda dua (E2W) jauh lebih hemat energi** dan memiliki emisi per km hampir 73% lebih sedikit daripada model mesin pembakaran internal konvensional (ICE2W).
- **Emisi E2W menurun hingga hampir nol menjelang tahun 2050 dan tetap lebih rendah daripada ICE2W**, dengan asumsi peningkatan campuran energi terbarukan dalam jaringan listrik.
- **E2W sudah lebih kompetitif dari segi biaya daripada ICE2W berukuran serupa**, dengan TCO 15% lebih rendah, terutama karena biaya energinya yang lebih rendah. Perbedaannya meningkat menjadi sekitar 25% pada tahun 2050.

KENDARAAN PENUMPANG

- Pada tahun 2024, kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (BEV) merupakan penghasil emisi gas rumah kaca terendah di semua kategori mobil, sementara model bermesin pembakaran internal dan hibrida listrik merupakan penghasil emisi tertinggi tergantung pada kategori.
- Emisi gas rumah kaca WTW dari BEV diperkirakan menurun seiring dengan meningkatnya pangsa energi terbarukan dalam jaringan dan seiring dengan peningkatan penghematan bahan bakarnya.
- Tanpa adanya kebijakan fiskal yang diperkenalkan, satu dari dua model BEV di setiap kategori mobil kecil dan menengah telah mencapai paritas biaya dengan masing-masing model ICE pada tahun 2024.
- Sementara itu, model BEV besar pada tahun 2024 belum mencapai paritas biaya dan karenanya memerlukan dukungan kebijakan agar menjadi kompetitif.
- Kedua model BEV kecil yang dianalisis mencapai paritas biaya dengan ICEV kecil hanya pada tahun 2030.
- Depresiasi merupakan kontributor signifikan terhadap tingginya TCO BEV saat ini di semua kategori.

BUS

- **Bus listrik memiliki emisi GRK WTW terendah pada tahun 2024** karena efisiensinya yang tinggi. Dengan asumsi faktor emisi jaringan listrik yang menurun, emisi bus listrik akan turun secara signifikan pada tahun 2050.
- **Bus biodiesel menghasilkan emisi GRK WTW tertinggi** (lebih banyak daripada bus diesel) karena emisi biodiesel dari sumur ke tangki dan perubahan penggunaan lahan langsung yang tinggi.
- **Meskipun biaya energinya jauh lebih rendah, TCO bus listrik masih 5% lebih tinggi daripada bus diesel pada tahun 2024** karena harga belinya yang jauh lebih tinggi.
- **Karena harga turun, bus listrik akan lebih kompetitif dari segi biaya daripada bus diesel** sekitar tahun 2030.

TRUK

- **Truk Listrik Bertenaga Baterai (BET) memiliki intensitas energi final terendah** (MJ/ton-100 km) dalam kategori besar dan kecil.
- **Truk diesel dan biodiesel merupakan jenis yang paling tidak hemat energi dalam kategori kecil**, sedangkan Truk Listrik Sel Bahan Bakar merupakan yang paling tidak hemat energi dalam kategori besar.

- Dengan mempertimbangkan emisi WTT dan Perubahan Penggunaan Lahan, truk biodiesel (B35) menghasilkan emisi WTW tertinggi dalam kategori besar dan kecil.
- BET besar mencapai paritas biaya dengan BET diesel sekitar tahun 2030, sedangkan pada kategori kecil, BET hanya mencapai paritas biaya sekitar tahun 2040 berdasarkan model representatif
- FCET besar akan mencapai paritas biaya dengan truk diesel pada tahun 2030 sementara FCET kecil hanya akan mencapainya sekitar tahun 2040, namun ini dengan asumsi penurunan produksi hidrogen sebesar 50% pada tahun 2030 dibandingkan dengan biaya saat ini.
- FCET dan BET merupakan alternatif yang menjanjikan dalam hal potensi pengurangan emisi dan biaya Namun, terdapat ketidakpastian yang kuat seputar:
 - o Keandalan produksi hidrogen hijau bertenaga surya PV
 - o Perhitungan TCO FCET tidak mencakup biaya infrastruktur distribusi, yang pengembangannya bergantung pada skala ekonomi, biaya transportasi, dll.
 - o Proyeksi harga BET dan FCET di masa mendatang yang digunakan diambil dari kasus Eropa
 - o Penerimaan BET sangat bergantung pada pengembangan infrastruktur pengisian daya

2. SEKTOR PEMANASAN PROSES INDUSTRI

Dalam industri, Biaya Pemanasan yang Diratakan (LCOH) digunakan sebagai ukuran untuk membandingkan berbagai teknologi berdasarkan total biaya pembangkitan panas, dengan mempertimbangkan operasi tipikal selama masa pakainya. Beberapa tren yang dapat diamati adalah sebagai berikut:

Pompa kalor merupakan salah satu alat dengan biaya pemanasan terendah setelah boiler batubara dan biomassa. Hal ini terutama disebabkan oleh efisiensinya yang tinggi sehingga mengimbangi biaya investasi awal yang tertinggi.

- **Pompa kalor suhu rendah merupakan opsi yang layak secara komersial.** Lebih jauh, LCOH untuk pompa kalor diperkirakan turun 10-15% dari harga saat ini menjelang tahun 2050 seiring dengan perkembangan teknologi.
- *Boiler* batu-bara menghadirkan biaya terendah per unit panas yang dihasilkan jika mempertimbangkan harga bahan bakar untuk batu-bara berkualitas rendah dan tidak adanya biaya karbon. Jika mempertimbangkan harga batu-bara berkualitas lebih tinggi atau biaya karbon sedang (15 USD/ton CO₂), biaya naik di atas biaya pompa panas dan boiler biomassa.
- *Boiler* listrik harganya dua kali lipat lebih mahal daripada boiler batu-bara dan pompa panas suhu rendah, karena biaya bahan bakar (harga listrik) yang tinggi sehingga tidak kompetitif hanya dari segi biaya. Namun, tetap penting untuk mencapai target dekarbonisasi.
- Boiler berbahan bakar minyak dan gas merupakan sumber panas yang paling mahal karena biaya bahan bakarnya yang sangat tinggi. Meskipun biaya investasinya rendah, boiler ini lebih mahal untuk dioperasikan dalam jangka panjang dan diperkirakan tidak banyak berkembang di masa mendatang karena teknologinya sudah sangat matang.
- *Boiler* biomassa dan gas dipengaruhi oleh ketidakpastian yang tinggi terhadap harga bahan bakarnya, sehingga memengaruhi total biayanya.
- Ada potensi signifikan untuk mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi energi dengan teknologi saat ini, terutama untuk pemanasan suhu rendah dan menengah di mana elektrifikasi dengan pompa panas merupakan pilihan yang relevan.
- Namun elektrifikasi suhu yang lebih tinggi (air panas dan uap di atas 90 °C) masih menimbulkan biaya yang lebih tinggi daripada sebagian besar alternatif tetapi diharapkan memiliki perkembangan positif dan akan menjadi alat utama untuk melakukan dekarbonisasi seiring perkembangan pembangkitan listrik menuju emisi nol bersih.
- Secara umum, biaya bahan bakar merupakan kontributor terbesar pada analisis LCOH dan oleh karena itu penting untuk dievaluasi karena misalnya harga biomassa dapat memiliki kisaran yang sangat luas dari sekitar Rp 600/kg untuk limbah pertanian (misalnya sekam padi) hingga sekitar Rp 2.800/kg untuk pelet kayu di pasar internasional (tingkat tinggi pada akhir tahun 2022 untuk ekspor ke Korea Selatan dan Jepang).

3. SEKTOR BANGUNAN PERUMAHAN

Pada bangunan tempat tinggal, analisis Biaya Siklus Hidup (*Life Cycle Cost/LCC*) untuk peralatan rumah tangga dilakukan untuk menilai total biaya yang terkait dengan kepemilikan dan pengoperasian peralatan tersebut sepanjang masa pakainya dan analisis tersebut menyoroti poin-poin utama berikut:

- Bangunan perumahan menyumbang lebih dari 75% konsumsi energi dalam bangunan, oleh karena itu, memastikan peningkatan efisiensi peralatan listrik dan memasak menjadi penting, dengan Standar Kinerja Energi Minimum (SKEM) menjadi strategi utama.
- Listrik sudah menjadi sumber energi dominan yang berarti lebih banyak emisi berada di hulu dalam bauran pembangkitan listrik, sehingga penghijauan bauran listrik tetap menjadi prioritas utama untuk mengurangi emisi.
- Biaya siklus hidup berbagai peralatan rumah tangga yang dianalisis dalam studi ini, yaitu penanak nasi, lemari es, televisi, AC, kompor, lampu, dan pemanas air, menurun menjelang tahun 2060 dalam skenario dengan revisi SKEM berkelanjutan karena penghematan energi dari peningkatan efisiensi energi.
- Biaya pencahayaan diperkirakan turun hingga 65% dalam skenario SKEM vs. Tanpa SKEM karena penghematan energi dari pengoperasian lampu. Meskipun biaya awal untuk LED dua kali lipat biaya lampu pijar per unit, karena masa pakainya 16 kali lebih lama dan mengonsumsi energi 8 kali lebih sedikit untuk menyediakan pencahayaan yang sama.
- Elektrifikasi masih berperan dalam memasak, karena LPG tetap menjadi sumber energi utama, tetapi memasak dengan listrik lebih efisien, berkisar antara 75-90% tergantung pada teknologinya, sedangkan kompor LPG memiliki efisiensi 55%. Total biaya tahunan juga jauh lebih rendah untuk kompor listrik.
- Biaya pengurangan emisi menurun menjelang tahun 2060 untuk semua peralatan rumah tangga, dengan asumsi tujuan mencapai Net Zero pada tahun 2060 dan perubahan bauran listrik. Banyak peralatan yang memiliki biaya pengurangan emisi “negatif” karena biaya yang dikeluarkan lebih rendah serta emisi yang berkurang saat ini.
- SKEM merupakan perangkat utama untuk mendorong penetrasi peralatan yang lebih efisien di pasar, tetapi penerapannya harus dipertimbangkan secara cermat untuk memastikan kemampuan produsen dalam negeri untuk mematuhi dan meminimalkan potensi dampak negatif pada rantai pasokan lokal.

Sebagai kesimpulan, laporan ini menyoroti potensi signifikan teknologi yang tersedia untuk mendekarbonisasi subsektor penggunaan akhir energi yang telah diidentifikasi di atas. Dengan menganalisis biaya, efisiensi, dan pengurangan emisi CO₂ yang terkait dengan opsi-opsi ini, laporan ini menggarisbawahi kebutuhan penting untuk pengambilan keputusan strategis dan peningkatan kesadaran masyarakat. Percepatan penerapan solusi energi bersih akan berkontribusi pada pencapaian tujuan iklim Indonesia sekaligus mendorong masa depan energi yang berkelanjutan. Perencanaan strategis dan penerapan teknologi yang disesuaikan sangat penting untuk menyeimbangkan tujuan ekonomi dan lingkungan dalam transisi Indonesia menuju masa depan energi yang berkelanjutan.



PENDAHULUAN

Laporan ini memberikan informasi tentang teknologi, ekonomi, dan lingkungan untuk sejumlah teknologi yang teridentifikasi dalam sektor pengguna akhir industri, transportasi, dan bangunan tempat tinggal di Indonesia, khususnya yang membahas tentang pemanasan proses, jalan raya, dan subsektor tempat tinggal. Data yang dikumpulkan dapat digunakan sebagai masukan untuk kegiatan perencanaan energi, seperti prospek masa depan, evaluasi perubahan iklim, dan analisis teknis dan ekonomi, misalnya tentang kondisi kerangka kerja untuk pengembangan dan penerapan kelas teknologi tertentu.

Cakupan dokumen ini mencakup data dan analisis untuk memberikan wawasan bagi para perencana energi. Lebih jauh, analisis dilakukan untuk memungkinkan para pembuat kebijakan, regulator, dan pembuat keputusan lainnya untuk membandingkan kinerja teknologi secara adil. Dengan tujuan untuk kegiatan perencanaan energi, seperti prospek masa depan, evaluasi keamanan pasokan dan dampak lingkungan, evaluasi perubahan iklim, serta analisis teknis dan ekonomi, misalnya pada kondisi kerangka kerja untuk pengembangan dan penerapan kelas teknologi tertentu.

Teknologi representatif dianalisis di setiap sektor penggunaan akhir secara adil. Di sini, Biaya Pemanasan yang Diratakan (LCOH) dilakukan untuk pemanasan proses dalam industri, Total Biaya Kepemilikan (TCO) dilakukan untuk berbagai kelas dan kategori kendaraan di segmen transportasi jalan raya, dan Biaya Siklus Hidup (LCC) dilakukan untuk peralatan rumah tangga guna mengevaluasi total biaya kepemilikan dan pengoperasian peralatan rumah tangga selama masa pakainya untuk memahami dampak keputusan pembelian terhadap lingkungan dan ekonomi.



Bab 1 Menilai data tekno-ekonomi sektor transportasi dengan fokus khusus pada kategori transportasi jalan raya, Menilai kendaraan roda dua, mobil penumpang, bus, dan teknologi truk dengan membandingkan kendaraan bermesin pembakaran internal (ICEV) konvensional dengan kendaraan listrik dan dalam kasus truk, baik truk bertenaga baterai maupun truk bertenaga sel bahan bakar telah dianalisis. TCO digunakan untuk menggambarkan representasi yang lebih akurat dari komitmen finansial karena berkaitan dengan kepemilikan berbagai kelas kendaraan berdasarkan jenis teknologi, penilaian biaya perawatan, depresiasi, dan nilai jual kembali.



Bab 2 Memberikan gambaran umum tentang pemanasan proses industri yang menyumbang porsi terbesar kebutuhan energi industri.

Di sini berbagai peralatan pembangkit panas seperti boiler (berbahan bakar batu bara, gas, biomassa atau minyak), dan pompa panas, dibandingkan menggunakan metrik utama, LCOH, untuk mengevaluasi kinerja teknologi ini dengan menganalisis daya saing ekonomi selama masa pakai teknisnya. Dengan demikian, para pembuat keputusan lebih siap untuk mengidentifikasi teknologi yang paling hemat biaya, teknologi yang menawarkan potensi pengurangan emisi paling besar dan tergantung pada tujuan kementerian, kemudian mengidentifikasi kesenjangan dalam kerangka kebijakan yang diperlukan untuk mengembangkan teknologi yang dipilih lebih lanjut. Ini dapat berkisar dari tarif, subsidi, dan insentif lain yang diperlukan untuk memastikan tujuan dan target efisiensi energi terwujud. Lebih jauh lagi, untuk menempatkan risiko yang dihadapi oleh industri misalnya biaya modal atau biaya operasional yang diperlukan untuk memenuhi target yang diinginkan. Memastikan bahwa regulator terlibat dengan pasar untuk mengembangkan jalur yang optimal secara tekno-ekonomi.



Bab 3 Menilai sektor rumah tangga, di mana terdapat kebutuhan untuk keputusan konsumen yang terinformasi untuk memungkinkan konsumen memilih peralatan yang menghasilkan biaya yang lebih rendah selama masa pakai peralatan.

Dalam beberapa kasus, dukungan kebijakan diperlukan untuk memastikan perangkat yang diidentifikasi diberi insentif agar dapat bersaing secara ekonomis dengan alternatif yang kurang efisien dan terkadang lebih murah yang mungkin dipilih konsumen karena alasan daya beli. Analisis yang dilakukan dalam laporan ini menunjukkan bahwa untuk mencapai nol bersih pada tahun 2060, konsumsi energi berbagai peralatan harus dijaga seminimal mungkin, sehingga seiring dengan terus meningkatnya tingkat penetrasi, peran SKEM menjadi semakin penting.

Dalam semua kasus, emisi GRK dari teknologi konvensional dan nonkonvensional serta ringkasan per bab disajikan. Data dalam laporan diperoleh dari berbagai sumber publik dan saran para ahli. Asumsi dan proyeksi para ahli digunakan dalam kasus-kasus di mana data sulit diperoleh. Konsistensi dipertahankan dalam satu bab, namun bab-bab tersebut disusun dan disajikan dengan cara yang paling sesuai untuk menunjukkan informasi per bab. Investor mungkin memiliki pandangan yang berbeda tentang daya tarik ekonomi dan preferensi yang berbeda. Asumsi diterapkan saat menghitung ekspektasi untuk tren ekonomi masa depan, serta pada penetrasi teknologi tertentu, yang dapat mengakibatkan perkiraan perbedaan. Namun, ada tingkat kepercayaan yang tinggi pada data tahun dasar yang diterapkan. Sangat penting untuk dicatat bahwa dunia nyata bersifat ambigu sehingga data dapat bervariasi dari satu sumber ke sumber lainnya, sehingga dalam semua kasus data yang selaras dengan beberapa sumber lain digunakan sebagai referensi. Jika terdapat ketidakpastian, hal ini telah dikomunikasikan untuk memastikan kualitas, ketersediaan, dan kegunaan data. Oleh karena itu, dianjurkan agar data baru dapat dibagikan kepada penulis untuk pembaruan di masa mendatang.



Dalam semua kasus, emisi GRK dari teknologi konvensional dan nonkonvensional serta ringkasan per bab disajikan. Data dalam dokumen ini diperoleh dari berbagai sumber publik dan saran para ahli.





Sektor Transportasi Jalan





1. Sektor Transportasi Jalan

Di antara sektor lainnya, transportasi menyumbang 25% dari total emisi GRK terkait energi Indonesia pada tahun 2021¹, saat ini sektor ini tengah mengalami peningkatan pasca dampak pandemi COVID-19 pada tahun 2020. Angka emisi yang sangat besar ini disebabkan oleh tingginya porsi konsumsi bahan bakar fosil (86,66%) dalam bauran energi transportasi tahun 2021.²

JALAN

Langkah-langkah Teknologi Dekarbonisasi / Data Teknologi

Pemanfaatan listrik rendah karbon pada transportasi jalan ditetapkan sebagai salah satu pilar utama strategi rendah karbon di sektor energi, bersama dengan tiga upaya lainnya: penerapan langkah-langkah efisiensi energi; peralihan bahan bakar dari batubara ke gas dan energi terbarukan di sektor industri; dan peningkatan energi terbarukan di sektor kelistrikan, transportasi, dan industri. Pemerintah Indonesia juga telah mendorong percepatan adopsi kendaraan bermotor listrik berbasis baterai (EV) untuk transportasi jalan raya melalui Peraturan Presiden No. 79/2023, yang telah diubah dengan Peraturan Presiden 79/2023, dengan beberapa peraturan turunan yang diterapkan oleh berbagai lembaga pemerintah (Kementerian Keuangan, Kementerian Perhubungan, Bank Indonesia, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, Kementerian Perindustrian, Kepolisian Republik Indonesia, dll.).

1.1 Mobil Penumpang

Pada tahun 2022, jumlah mobil penumpang di Indonesia mencapai sekitar 17,18 juta unit. Penjualan mobil listrik bertenaga baterai dan hibrida hanya mencakup 1,3% dan 0,6% dari total penjualan mobil penumpang pada tahun 2022 (796.563 unit)³. Angka ini masih jauh dari target Pemerintah Indonesia untuk mencapai 100% penjualan kendaraan listrik pada tahun 2040.

Tabel di bawah ini membandingkan konsumsi energi dan emisi *well-to-wheels* (WTW) dari berbagai kategori *internal combustion engine vehicle* (ICEV), *hybrid electric vehicle* (HEV) dan *battery electric vehicle* (BEV). Emisi WTW mobil berbahan bakar fosil dihitung sebagai total WTT (*well-to-tank*) dan emisi knalpot. Di sisi lain, emisi WTW model BEV dihitung berdasarkan emisi WTW siklus hidup jaringan listrik termasuk kerugian transmisi dan distribusi. Setiap kategori diwakili oleh satu model kendaraan, kecuali BEV kecil dan menengah di mana dua model dipilih untuk masing-masing untuk memberikan variasi dalam biaya dan kinerja bagi konsumen. Jarak tempuh tahunan 10.000 km diasumsikan untuk semua kategori mobil. Data penghematan bahan bakar dikumpulkan dari berbagai sumber, seperti situs web ulasan otomotif dan klaim pabrikan. Nilai penghematan bahan bakar yang diperoleh dari klaim pabrikan disesuaikan dengan faktor koreksi, untuk mencerminkan pola mengemudi di dunia nyata.

¹ Transparansi Iklim. (2022). Laporan Transparansi Iklim 2022: Indonesia

² Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2022). Buku Pegangan Statistik Energi dan Ekonomi Indonesia 2021

³ <https://www.gaikindo.or.id/data-industri-otomotif-indonesia/>

Tabel 1. Konsumsi energi dan emisi berbagai kategori mobil berbahan bakar fosil

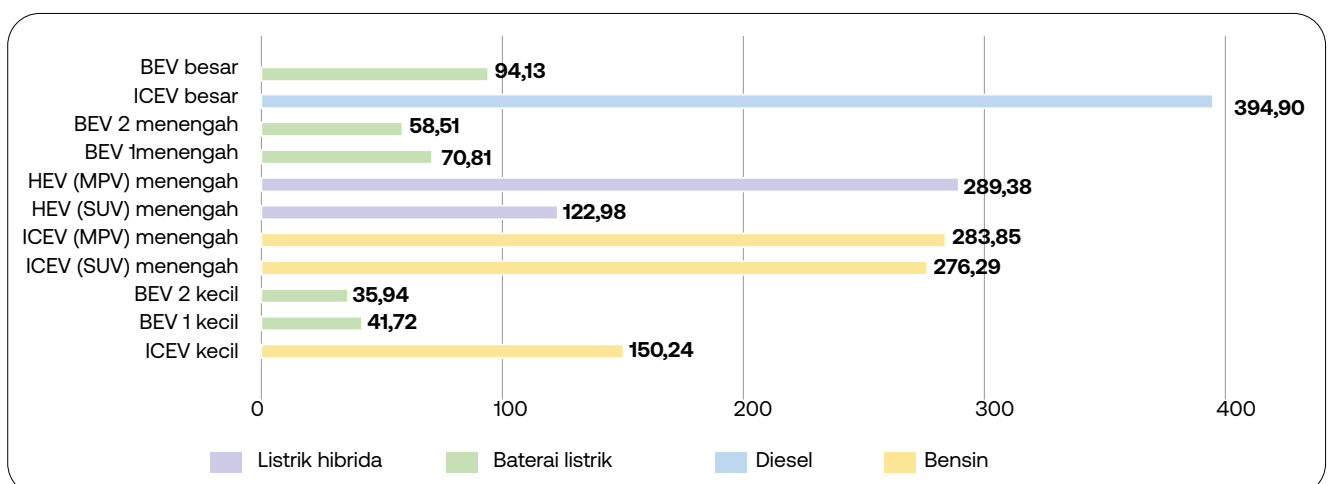
Bahan bakar	Kategori	Kapasitas mesin (liter)	Konsumsi energi		Emisi GRK WTW			
			Ekonomi bahan bakar di jalan raya (km/l)	Konsumsi bahan bakar tahunan (liter)	Emisi WTT (g CO ₂ e/km)	Emisi gas buang (g CO ₂ e/km)	Total emisi WTW (g CO ₂ e/km)	Emisi WTW tahunan (kg CO ₂ e)
Bensin	ICEV kecil	1,2	23,7	421	29,90	109,07	138,97	1.390
	ICEV menengah (SUV)	2,0	12,9	775	54,98	200,58	255,56	2.556
	ICEV menengah (MPV)	1,5	12,6	796	56,49	206,08	262,56	2.626
	HEV menengah (SUV)	1,5	29,0	345	24,47	89,28	113,76	1.138
	HEV menengah (MPV)	1,5	12,3	812	57,59	210,09	267,68	2.677
Diesel	ICEV besar (SUV)	2,7	10,1	995	86,48	293,93	380,42	3.804

Tabel 2. Konsumsi energi dan emisi berbagai kategori mobil listrik

Kategori	Daya mesin maksimum (kW)	Jangkauan baterai maksimum (km)	Konsumsi Energi		Emisi GRK WTW	
			Konsumsi listrik di jalan raya (kWh/km)	Konsumsi listrik tahunan (kWh)	Emisi WTW (g CO ₂ e)	Emisi WTW tahunan (kg CO ₂ e)
BEV 1 kecil	30	300	0,111	1.113	86,08	861
BEV 2 kecil	25	180	0,096	958	74,15	742
BEV 1 menengah	110	384	0,189	146,09	146,09	1.461
BEV 2 menengah	132	403	0,156	1.560	120,72	1.207
BEV besar	283	497	0,251	2.510	194,22	1.942

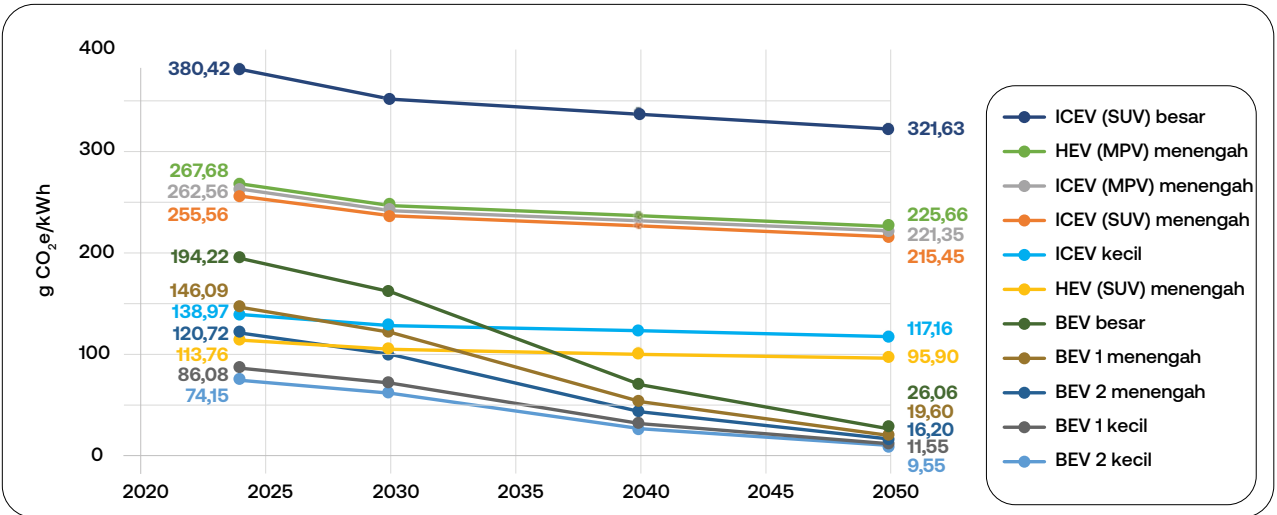
Elektrifikasi transportasi jalan juga berarti peningkatan efisiensi energi. Gambar 1 menunjukkan bahwa BEV memiliki konsumsi energi yang jauh lebih rendah daripada semua HEV dan ICEV di setiap kategori untuk jarak tempuh yang sama. Elektrifikasi juga akan berkontribusi pada pengurangan impor bahan bakar. Jika diasumsikan jarak tempuh tahunan 10.000 km, setiap ICEV yang digantikan oleh BEV diharapkan dapat menghindari impor bahan bakar sebesar 421–995 liter per tahun (lihat **Tabel 1**).

Gambar 1. Intensitas energi final berbagai kategori mobil



Pada akhirnya, elektrifikasi transportasi jalan diharapkan dapat mengurangi emisi GRK. Emisi WTW per km dari mobil ICE dibandingkan dengan emisi pembangkit listrik dari mobil EV. Emisi WTW diasumsikan sebagai total WTT (*well-to-tank*) dan emisi knalpot. Emisi dapat dilihat pada Gambar 2. Mengingat faktor emisi jaringan PLN saat ini yang tinggi (774 g CO₂e/kWh⁴), pada tahun 2024 SUV ICE besar menghasilkan emisi tertinggi per km sebesar 380 g CO₂e/km. Model hibrida menengah, dalam kasus ini, memiliki emisi per km yang jauh berbeda. MPV hibrida (268 g CO₂e/km) menghasilkan emisi yang lebih tinggi daripada SUV ICE dan MPV menengah (256 and 262 g CO₂e/km), sementara SUV hibrida (114 g CO₂e/km) menghasilkan emisi lebih sedikit daripada ICEV kecil (139 g CO₂e/km) dan BEV besar dan menengah. Model mobil dengan emisi terendah saat ini adalah BEV kecil dengan 74 g CO₂e.

Gambar 2. Proyeksi emisi GRK WTW berbagai model mobil berbahan bakar fosil dan listrik hingga tahun 2050

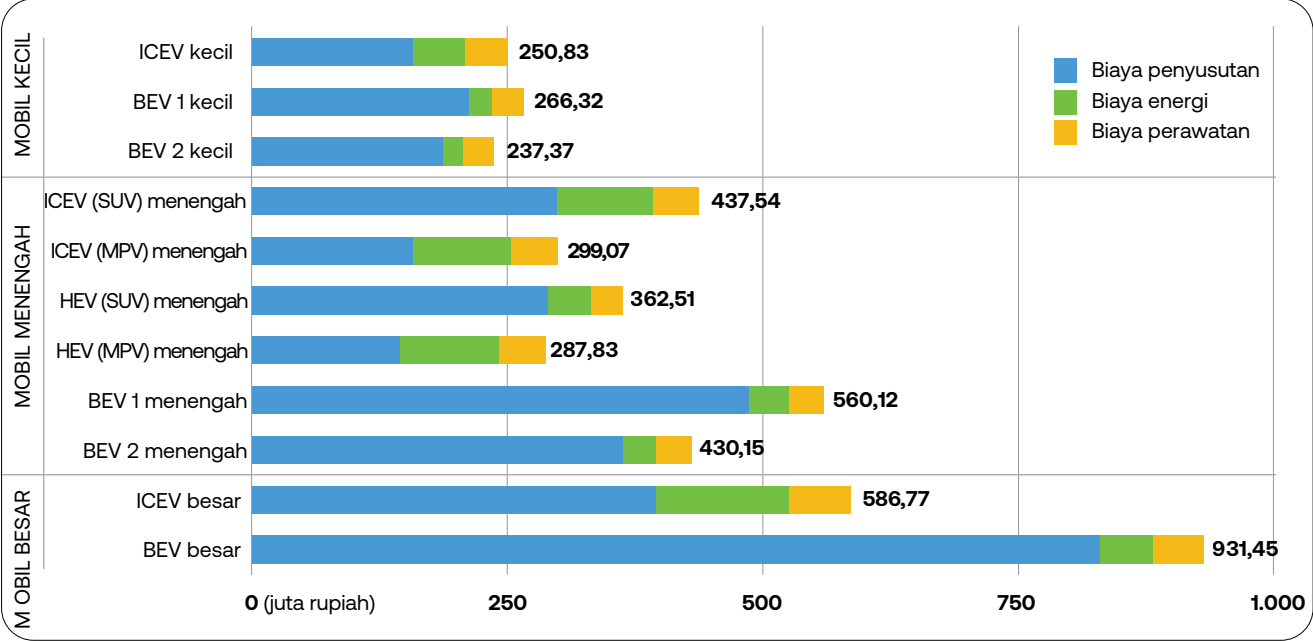


Seiring dengan peningkatan emisi sistem tenaga dan efisiensi mesin dari waktu ke waktu, emisi knalpot kendaraan diharapkan akan menurun di masa mendatang. Dengan asumsi emisi WTT konstan, total emisi WTW diproyeksikan hingga tahun 2050. Dalam perhitungan ini, peningkatan ekonomi bahan bakar sebesar 9% pada tahun 2050 diasumsikan untuk BEV, sementara 20% diasumsikan untuk HEV dan ICEV. Hasilnya menunjukkan bahwa ICEV besar akan tetap menjadi penghasil emisi teratas pada tahun 2050 dengan 321,63 g CO₂e/km pada tahun 2050, diikuti oleh model menengah yang berkisar antara 215,45–225,66 g CO₂e/km. Karena asumsi penurunan faktor emisi siklus hidup jaringan listrik menjadi 114 g CO₂e/kWh⁵, semua model BEV akan mengalami penurunan emisi yang signifikan, mengalahkan emisi SUV hibrida menengah (95 g CO₂e/km). Emisi dari BEV pada tahun 2050 akan berkisar dari 10 g CO₂e/km (BEV kecil 2) hingga 26 g CO₂e/km (BEV besar).



⁴ Meira, Z. & Bieker, G. (2023). Comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars and two-wheelers in Indonesia. ICCT.
⁵ Idem

Gambar 3. Total biaya operasional tanpa pajak dan subsidi berbagai kategori mobil yang dibeli pada tahun 2024, selama 10 tahun penggunaan



Tabel 3. TCO berbagai kategori mobil berbahan bakar fosil yang dibeli pada tahun 2024, selama 10 tahun kepemilikan

Bahan bakar	Kategori	Harga rata-rata off-the-road (Rp juta)	TCO (juta rupiah)			
			Biaya penyusutan	Biaya energi	Biaya pemeliharaan	Total
Bensin	ICEV kecil	177	157,53	50,99	42,31	250,83
	ICEV menengah (SUV)	364	298,48	93,77	45,30	437,55
	ICEV menengah (MPV)	192	157,44	96,34	45,30	299,08
	HEV menengah (SUV)	353.4	289,80	41,74	30,98	362,51
	HEV menengah (MPV)	176	144,32	98,21	45,30	287,83
Diesel	ICEV besar (SUV)	482	395,24	130,85	60,69	586,78

Tabel 4. TCO berbagai kategori mobil listrik yang dibeli pada tahun 2024, selama 10 tahun kepemilikan

Kategori	Harga rata-rata off-the-road (Rp juta)	TCO (juta rupiah)			
		Biaya penyusutan	Biaya energi	Biaya pemeliharaan	Total
BEV kecil 1	200	212,17	23,18	30,98	266,33
BEV kecil 2	171	186,43	19,96	30,98	237,37
BEV menengah 1	565	486,17	39,33	34,62	560,12
BEV menengah 2	411	363,03	32,50	34,62	430,15
BEV besar	994	829,37	52,29	49,79	931,45

Biaya akan menjadi salah satu faktor penting yang dapat memengaruhi keberhasilan kebijakan elektrifikasi di sektor transportasi. Saat ini, dari sudut pandang pengguna, mengganti ICEV dengan BEV belum menguntungkan. Rata-rata, harga BEV saat ini 2–3 kali lebih mahal daripada ICEV. Namun, dalam hal biaya energi, BEV jauh lebih ekonomis dengan harga bahan bakar dan listrik saat ini. Untuk memperkirakan keseluruhan biaya yang dibayarkan oleh konsumen selama masa pakai kendaraan, total biaya kepemilikan (TCO) dihitung untuk setiap kategori.

Biaya akan menjadi salah satu faktor penting yang dapat memengaruhi keberhasilan kebijakan elektrifikasi di sektor transportasi. Saat ini, dari sudut pandang pengguna, mengganti ICEV dengan BEV belum menguntungkan. Rata-rata, harga BEV saat ini 2–3 kali lebih mahal daripada ICEV. Namun, dalam hal biaya energi, BEV jauh lebih ekonomis dengan harga bahan bakar dan listrik saat ini. Untuk memperkirakan keseluruhan biaya yang dibayarkan oleh konsumen selama masa pakai kendaraan, total biaya kepemilikan (TCO) dihitung untuk setiap kategori.

TCO 2024 ditunjukkan pada **Tabel 3** dan **Tabel 4** di atas. Tanpa memperhitungkan pajak dan biaya, terlihat bahwa TCO HEV menengah sudah lebih rendah daripada kendaraan bermesin bakar konvensional di setiap kategori SUV dan MPV. BEV menengah 2 juga menunjukkan TCO yang lebih rendah dibandingkan dengan SUV bermesin bakar konvensional. Dalam kategori kecil, TCO BEV 2 5,4% lebih rendah daripada kendaraan bermesin bakar konvensional, sementara BEV 1 masih kurang kompetitif dari segi biaya.

Seiring dengan penurunan biaya baterai, TCO BEV juga diperkirakan akan turun di masa mendatang. Proyeksi TCO dilakukan di sini untuk kategori mobil kecil dan menengah, dengan membandingkan daya saing biaya BEV dan ICEV hingga tahun 2050. Semua biaya didiskontokan ke Rupiah (IDR) 2024. Harga konstan diasumsikan untuk ICEV, sementara harga BEV diproyeksikan menggunakan tingkat penurunan 7% untuk biaya paket baterai per kWh hingga tahun 2040 dan 4% setelahnya. Harga BEV dihitung sebagai total komponen biayanya: biaya paket baterai, powertrain dan elektronik, dan biaya langsung lainnya. Kapasitas baterai (kWh) BEV diasumsikan meningkat hingga 195% dari kapasitas saat ini. Harga energi diasumsikan meningkat. Harga bahan bakar fosil diasumsikan meningkat 1% per tahun, sementara tren proyeksi harga listrik mengikuti skenario biaya Rendah Karbon dalam RUPTL 2021–2030. Konsumsi energi BEV dan ICEV diasumsikan meningkat hingga 9% dan 20% pada tahun 2050.

Gambar 4 dan **Gambar 5** di bawah ini menunjukkan perbandingan proyeksi TCO BEV dan ICEV untuk model mobil kecil dan menengah. Seperti dijelaskan di atas, small BEV 2⁶ telah mencapai paritas biaya dengan ICEV kecil⁷ pada tahun 2024. Pada tahun 2030, BEV Kecil 1⁸ juga akan mencapai paritas biaya dengan ICE, dengan TCO masing-masing sebesar Rp 247 juta dan Rp 248,6 juta. Pada kategori menengah, TCO medium BEV 2⁹ akan terus menurun mencapai Rp 350,4 juta, yang 20,5% lebih rendah dari TCO ICEV Menengah (Rp 440,9 juta) pada tahun 2050. Di sisi lain, medium BEV 1¹⁰ akan tetap kurang kompetitif dari segi biaya dibandingkan dengan ICE pada tahun 2050.



Di semua kategori ini, biaya penyusutan ICEV masih lebih rendah daripada BEV, yang diimbangi oleh biaya energi dan pemeliharaan BEV yang lebih rendah.



⁶ Diwakili oleh DFSK Seres E1

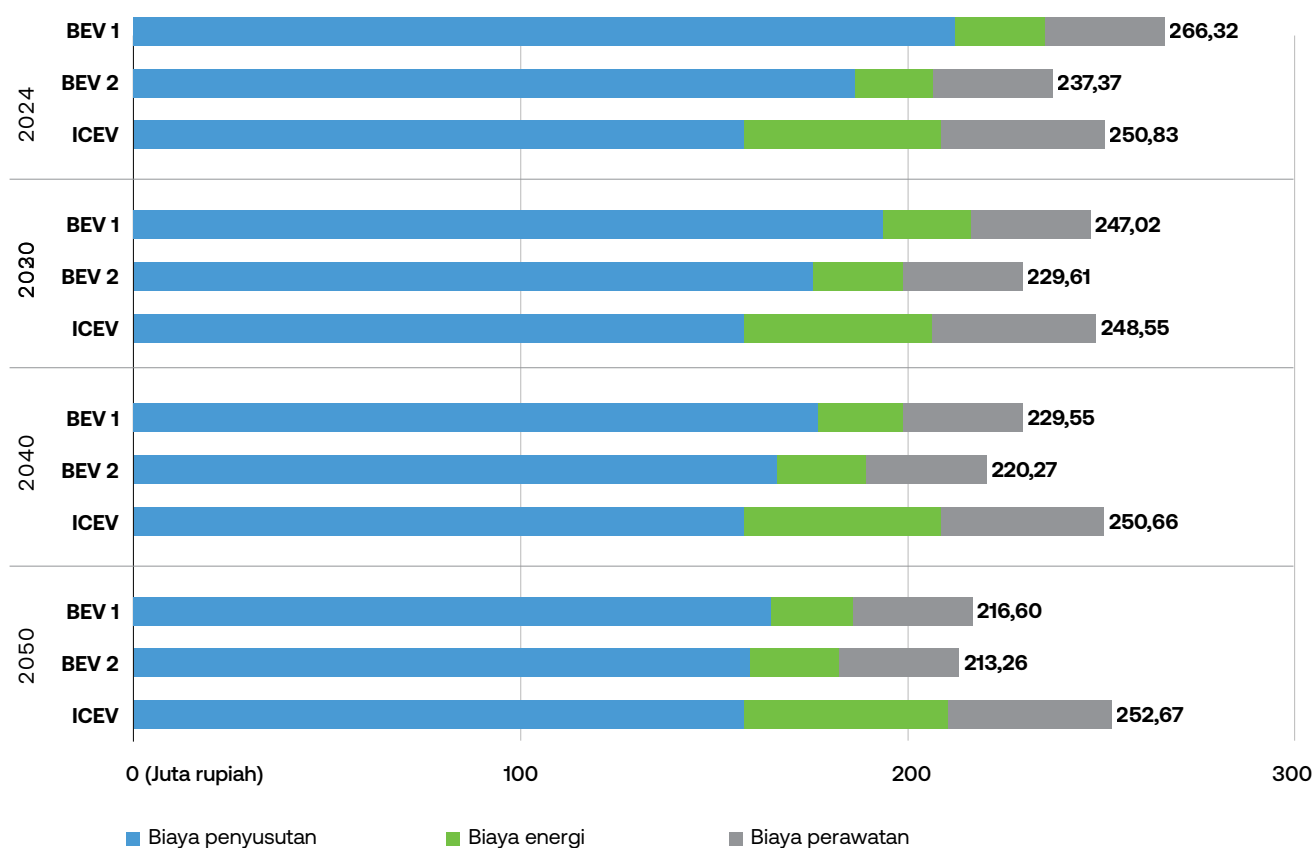
⁷ Diwakili oleh Honda Brio RS CVT

⁸ Diwakili oleh Wuling Air ev - Long

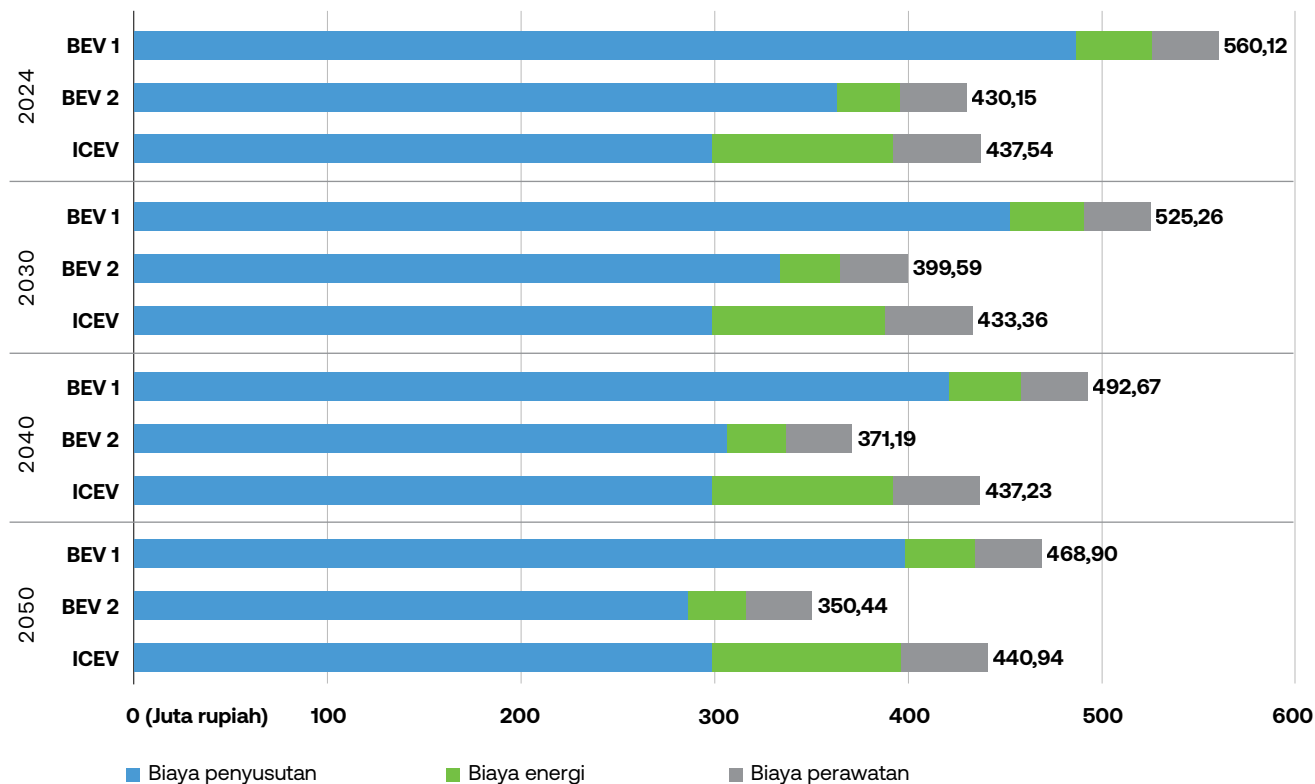
⁹ Diwakili oleh MG ZS EV

¹⁰ Diwakili oleh Hyundai Ioniq Signature Standard

Gambar 4. Proyeksi total biaya kepemilikan tahunan BEV kecil dan ICEV hingga tahun 2050



Gambar 5. Proyeksi total biaya kepemilikan tahunan kendaraan BEV dan ICEV menengah hingga tahun 2050



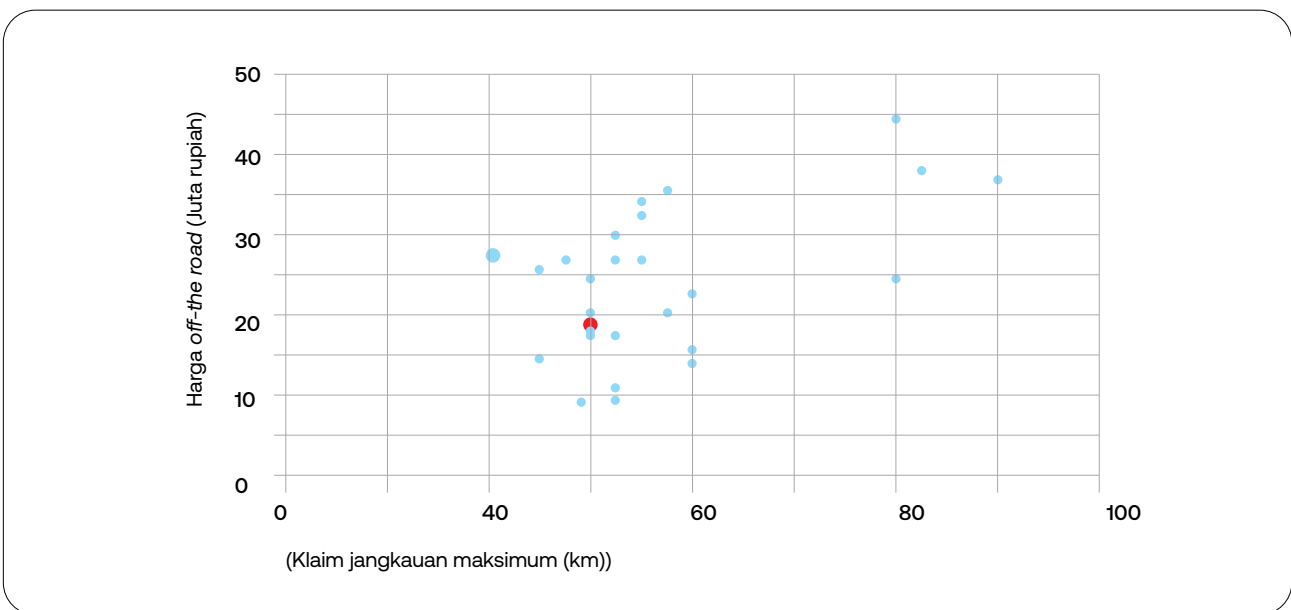
1.2 Kendaraan roda dua

Sebagai jenis kendaraan paling populer di Indonesia, dengan total 132,4 juta unit tercatat pada tahun 2023¹¹, kendaraan roda dua bermesin pembakaran dalam (ICE2W) telah memberikan kontribusi besar terhadap emisi GRK Indonesia. Pada tahun 2018, ICE2W mencakup 41% konsumsi bahan bakar di sektor transportasi atau sekitar 160 juta BOE bensin¹², yang setara dengan 64,9 juta ton CO₂e emisi GRK atau 10,9% dari total estimasi emisi GRK sektor energi pada tahun 2018 (596 juta ton CO₂e¹³).

Transisi dari kendaraan bermesin pembakaran dalam (ICE) ke kendaraan roda dua bertenaga baterai (E2W) telah terjadi secara perlahan di Indonesia selama beberapa tahun terakhir. Sejak 2019, hanya ada 75 ribu unit E2W yang terjual di Indonesia¹⁴. Pada tahun 2023 saja, penjualan E2W hanya mencapai 41,8 ribu unit. Jumlah tersebut sangat kecil jika dibandingkan dengan penjualan ICE2W pada tahun yang sama, yaitu 6,2 juta unit¹⁵. Peningkatan penggunaan E2W ini didukung oleh perusahaan-perusahaan angkutan daring di Indonesia yang telah menggunakan beberapa armada merek lokal, yang beberapa di antaranya dilengkapi dengan baterai yang dapat diganti.

Dengan metode yang sama dengan mobil-mobil di atas, emisi GRK WTW dari model ICE2W dan E2W dibandingkan dalam analisis ini. Diasumsikan jarak tempuh tahunan 8.000 km dalam analisis ini.

Gambar 6. Harga dan jangkauan maksimum model E2W di pasar Indonesia. Titik merah menunjukkan model e-skuter kecil yang representatif.



Analisis ini membandingkan model ICE dan e-skuter kecil. Satu model representatif dipilih untuk masing-masing pihak. Viar Q1 dipilih sebagai model e-skuter representatif dan **Gambar 6** menunjukkan posisinya relatif terhadap model lain di pasar Indonesia. Di sisi lain, skuter ICE diwakili oleh Honda Beat. Kedua model ini sebenarnya tidak sebanding dalam hal performa, yaitu tenaga mesin maksimum, tetapi keduanya termasuk di antara dua model paling populer di setiap kategori.

¹¹ BPS. (2024). Stok Kendaraan Bermotor Berdasarkan Provinsi dan Jenis. <https://www.bps.go.id/id/statistics-TABEL/3/VJ3NGRGa3dkRk5MTIU1bVNFOTVVbmQyVURSTVFUMDK-jMw=:jum-lah-kendaraan-bermotor-menurut-provinsi-dan-jenis-kendaraan---unit---2022.html?year=2023>

¹² Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional. (2019). Outlook Energi Indonesia 2019.

¹³ Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2021). Strategi Jangka Panjang Indonesia untuk Rendah Karbon dan Ketahanan Iklim 2050 (Indonesia LTS-LCCR 2050).

¹⁴ Aismoli. (2024). Statistik. <https://aismoli.or.id/statistic?type=yearly>

¹⁵ AISI. (2024). Distribusi Statistik. <https://www.aisi.or.id/statistic/>

Tabel 5. Konsumsi energi dan emisi kendaraan roda dua berbahan bakar fosil berdasarkan ukuran

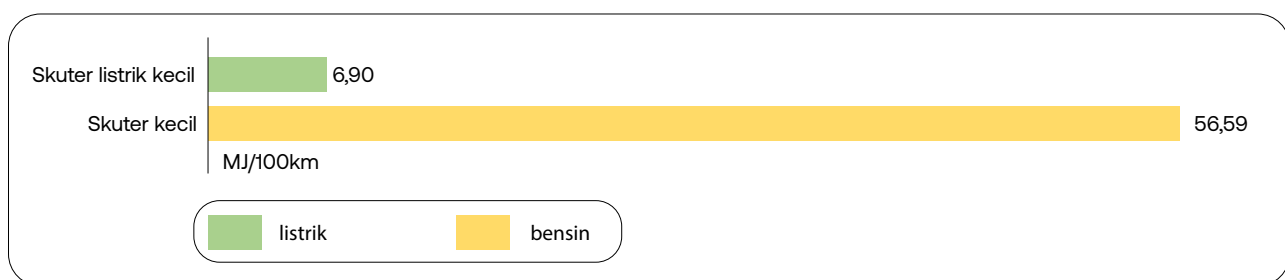
Kategori	Kapasitas mesin (cc)	Konsumsi energi		Emisi GRK WTW			
		Ekonomi bahan bakar di jalan raya (km/l)	Konsumsi bahan bakar tahunan (liter)	Emisi WTT (g CO ₂ e/km)	Emisi gas buang (g CO ₂ e/km)	Total Emisi WTW (g CO ₂ e/km)	Emisi WTW tahunan (kg CO ₂ e)
Skuter kecil	110	63,0	127	11,26	41,08	52,35	419

Data konsumsi energi dan emisi model ICE2W dan E2W masing-masing ditunjukkan pada Tabel 5 dan Tabel 6. Diperlihatkan bahwa jika jarak tempuh tahunan diasumsikan 8.000 km, setiap ICE2W yang diganti dengan E2W dapat menghindari impor bahan bakar sekitar 127 liter per tahun.

Tabel 6. Konsumsi energi dan emisi model skuter listrik (e-skuter)

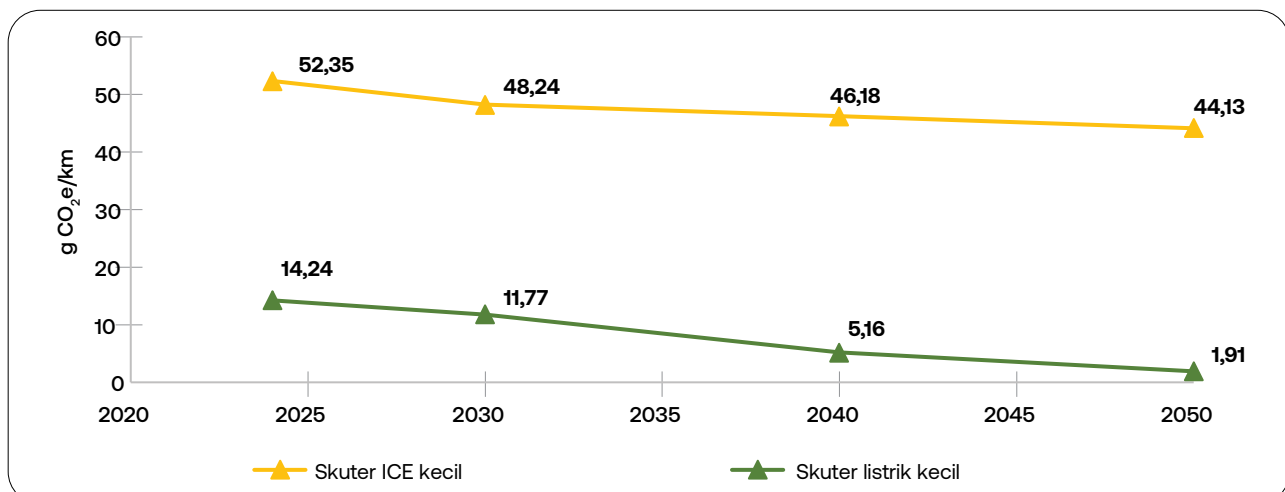
Kategori	Jangkauan baterai maksimum (km)	Konsumsi energi		Emisi GRK WTW	
		Konsumsi listrik di jalan raya (kWh/km)	Konsumsi listrik tahunan (kWh)	Emisi WTW (g CO ₂ e)	Emisi WTW tahunan (kg CO ₂ e)
Skuter listrik kecil	60	0,0184	147	14,24	114

Gambar 7. Intensitas energi final berbagai kategori kendaraan roda dua



Emisi GRK WTW dari model e-skuter (14,24 g CO₂e/km) saat ini sudah lebih rendah daripada model ICE (52,35 g CO₂e/km). Meskipun skuter listrik memiliki efisiensi energi 8 kali lebih baik daripada skuter berbahan bakar fosil (**Gambar 7**), emisi GRK WTW per km-nya hanya sekitar 3,7 kali lebih rendah daripada model ICE. Hal ini disebabkan oleh faktor emisi yang tinggi dari jaringan listrik, yang didominasi oleh pembangkit listrik tenaga batu bara. Pada tahun 2050, peningkatan penghematan bahan bakar dan faktor emisi jaringan listrik diharapkan dapat mengurangi emisi e-skuter menjadi hanya 1,91 g CO₂e/km, sementara peningkatan penghematan bahan bakar skuter ICE mengurangi emisinya menjadi 44,13 g CO₂e/km.

Gambar 8. Proyeksi emisi GRK WTW berbagai model kendaraan roda dua berbahan bakar fosil dan listrik hingga tahun 2050



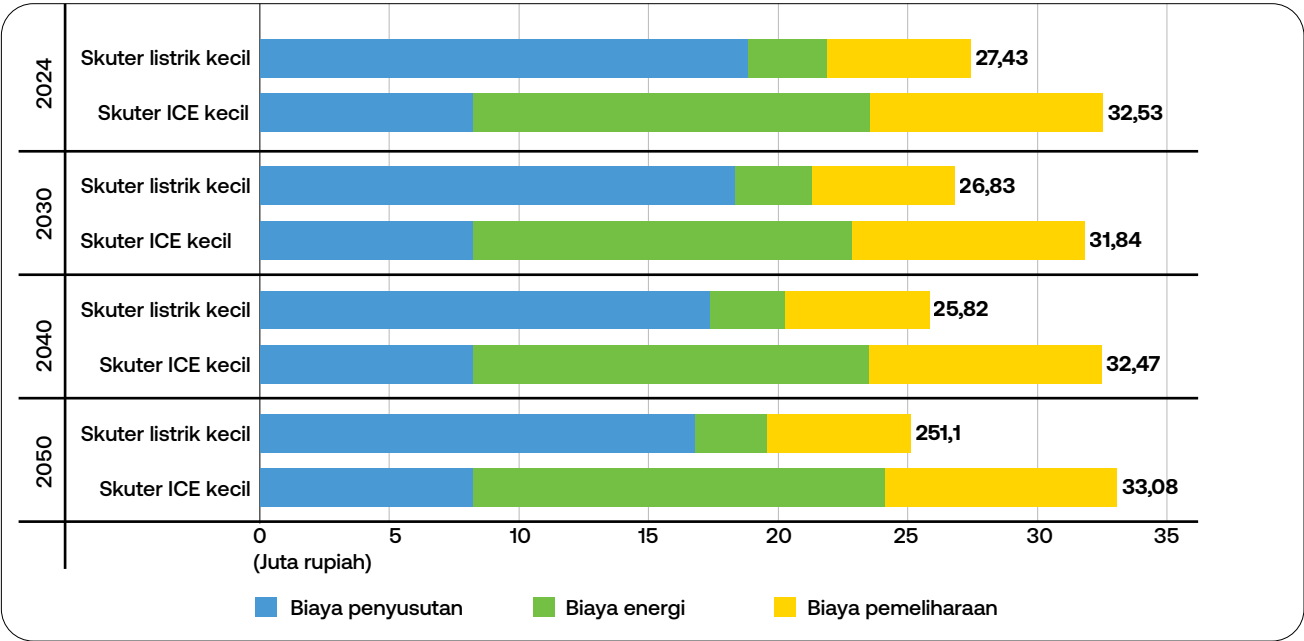
Komponen harga dan TCO model ICE2W dan E2W pada tahun 2024 ditunjukkan pada **Tabel 7**. Dalam contoh ini, biaya penyusutan e-skuter jauh lebih tinggi daripada model ICE. Dari segi biaya energi, e-skuter hanya membutuhkan Rp 3,07 juta selama 10 tahun kepemilikan atau 20% dari biaya bahan bakar skuter ICE kecil. Secara total, TCO e-skuter pada tahun 2024 sudah 15,7% lebih rendah daripada ICE.

Tabel 7. TCO berbagai kategori kendaraan roda dua berbahan bakar fosil yang dibeli pada tahun 2024 untuk 10 tahun kepemilikan

Kategori	Harga rata-rata off-the-road (Rp juta)	TCO (juta rupiah)			
		Biaya penyusutan	Biaya energi	Biaya pemeliharaan	Total
Skuter kecil	13	8,19	15,37	8,98	32,53
Skuter listrik kecil	18,9	18,81	3,07	5,56	27,43

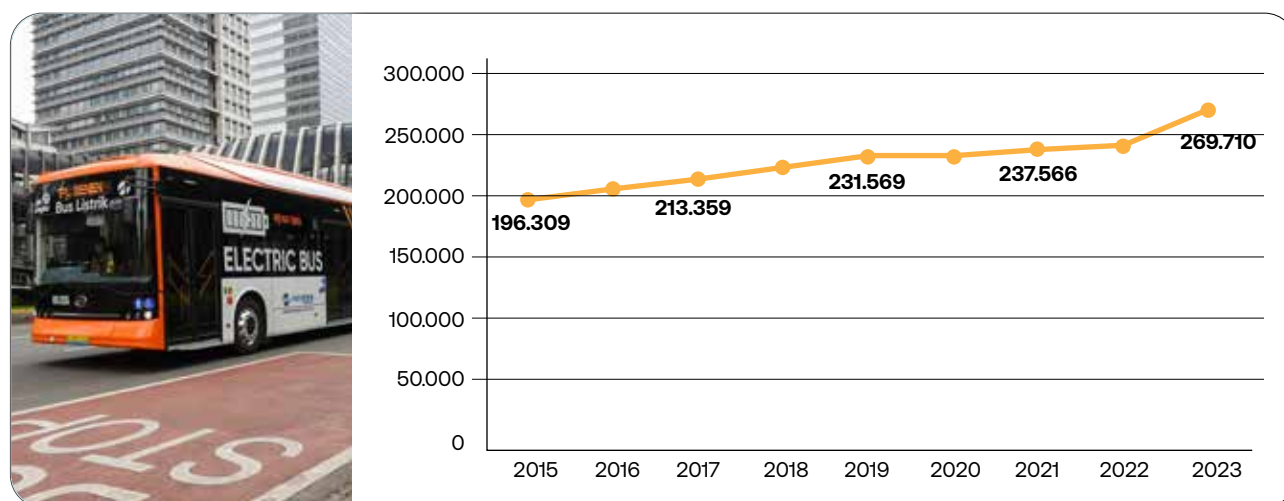
Dengan semua biaya didiskonkan ke nilai rupiah tahun 2024, TCO kendaraan roda dua diproyeksikan hingga tahun 2050. TCO e-skuter yang saat ini rendah diperkirakan akan terus menurun di masa mendatang. Harganya akan turun dari Rp18,9 juta pada tahun 2024 menjadi Rp 16,8 juta pada tahun 2050. Di sisi lain, harga skuter ICE diasumsikan konstan dalam analisis ini. Hal ini akan memperlebar kesenjangan TCO pada tahun 2050, dengan TCO e-skuter 24,8% lebih rendah daripada ICE.

Gambar 9. Proyeksi total biaya kepemilikan E2W dan ICE2W hingga tahun 2050



1.3 BUS

Gambar 10. Jumlah stok bus di Indonesia (2015–2023)¹⁶



Karena jangkauannya yang terbatas, bus listrik telah dioptimalkan untuk penggunaan transportasi umum perkotaan. Penggunaan bus listrik telah terjadi di Jakarta. TransJakarta mulai mengadopsi bus listrik pada tahun 2022 dengan 30 unit¹⁷. Pada tahun 2024, TransJakarta telah memiliki 100 armada bus listrik, dan akan menambah 200 lagi pada akhir tahun¹⁸. Secara nasional, hanya 124 bus listrik yang digunakan dalam sistem transportasi umum perkotaan di tiga kota¹⁹. Di sisi lain, Kementerian Perhubungan telah menetapkan target ambisius untuk melistriki 90% dari semua armada angkutan umum perkotaan pada tahun 2030 dan 100% pada tahun 2040.

Dengan metode yang mirip dengan mobil-mobil di atas, emisi GRK WTW dari model bus diesel dan listrik dibandingkan dalam analisis ini. Tabel di bawah ini menunjukkan konsumsi energi dan emisi bus diesel 12 meter dan contoh armada bus listrik TransJakarta, dengan asumsi jarak tempuh 192 km/hari atau jarak tempuh tahunan 70.080 km. Emisi GRK WTW dari bus biodiesel juga mempertimbangkan emisi perubahan tata guna lahan langsung (DLUC) di samping emisi WTT dan emisi knalpot.

Tabel 8. Konsumsi energi dan emisi GRK WTW dari bus ICE yang menggunakan bahan bakar biodiesel B35 dan solar

Bahan bakar	Panjang (m)	Energy consumption		WTW GHG emissions			
		Ekonomi bahan bakar di jalan raya (km/l)	Konsumsi bahan bakar tahunan (liter)	Emisi WTT (g CO ₂ e/km)	Emisi gas buang (g CO ₂ e/km)	Total Emisi WTW (g CO ₂ e/km)	Emisi WTW tahunan (kg CO ₂ e)
Biodiesel (B35)	12	3,37	20.795	781,97	569,77	1.351,74	94.730
Diesel	12	3,37	20.795	257,91	876,57	1.134,48	79.504

Tabel 9. Konsumsi energi dan emisi bus listrik

Bahan bakar	Jangkauan (m)	Jangkauan baterai maksimum (km)	Energy consumption		WTW GHG emissions	
			Konsumsi listrik di jalan raya (kWh/km)	Konsumsi listrik tahunan (kWh)	Emisi WTW (g CO ₂ e/km)	Emisi WTW tahunan (kg CO ₂ e)
Listrik	12	300	1,2	84.096	929,51	65.070

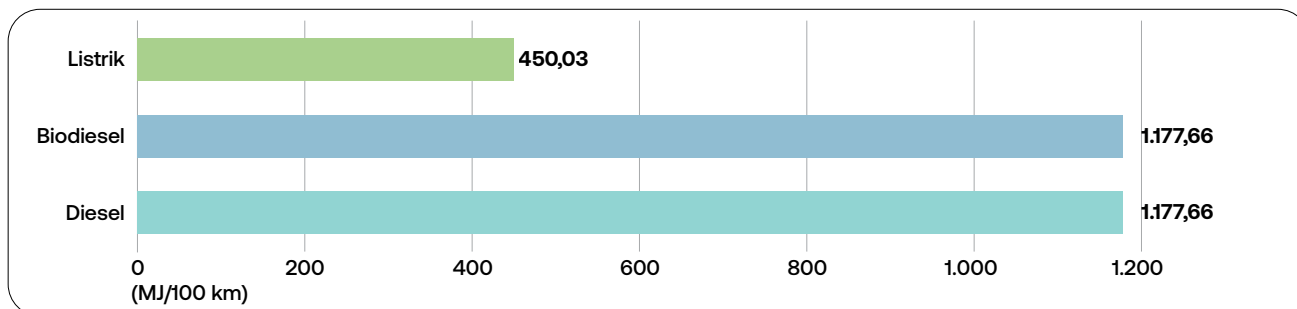
¹⁶ BPS. (2024). Stok Kendaraan Bermotor Berdasarkan Provinsi dan Jenis. <https://www.bps.go.id/id/statistics-TABEL/3/Vj3NNGRa3dkRk5MTIU1bVNFOTVVbmQyVURSTVFUMDK-jMw==/jumlah-kendaraan-bermotor-menurut-provinsi-dan-jenis-kendaraan-unit---2022.html?year=2023>

¹⁷ Antara. (2022). 30 bus listrik mulai bergulir di Jakarta. <https://en.antaranews.com/news/218977/30-electric-buses-start-rolling-in-jakarta>

¹⁸ Antara. (2024). TransJakarta sebut sebanyak 200 bus listrik segera masuk koridor. <https://id.antaranews.com/berita/217869/jakarta-targetkan-elektifikasi-50-persen-armada-transjakarta-pada-tahun-2025>

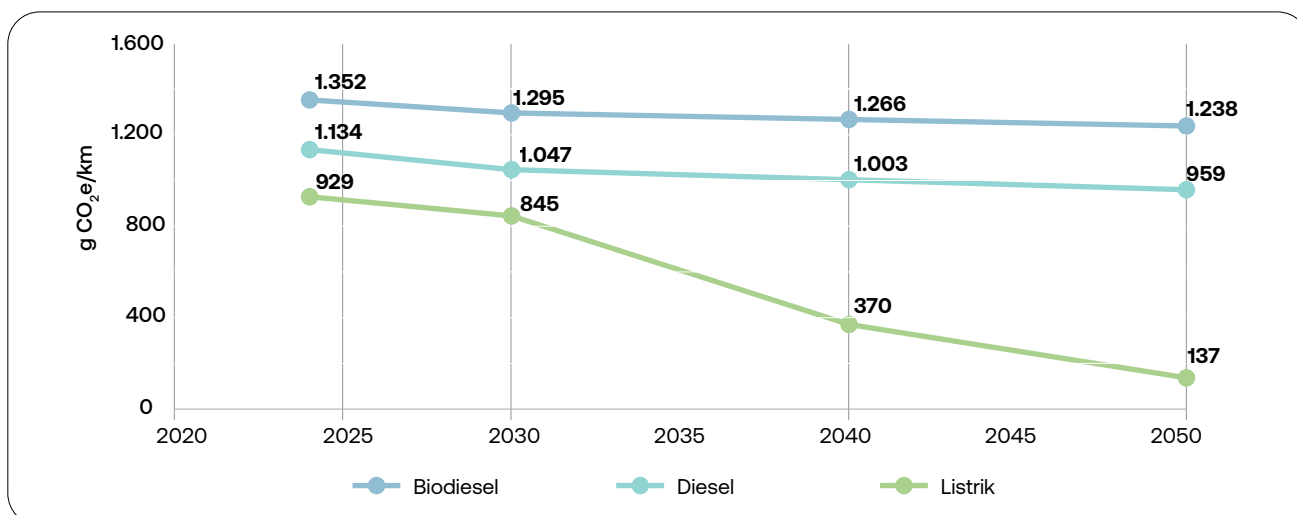
¹⁹ ITDP. (2024). Membangun Momentum Elektrifikasi Transportasi di Indonesia. <https://itdp.org/2024/07/15/membangun-momentum-elektifikasi-transportasi-di-indonesia/>

Gambar 11. Intensitas energi final bus biodiesel B35, diesel dan listrik



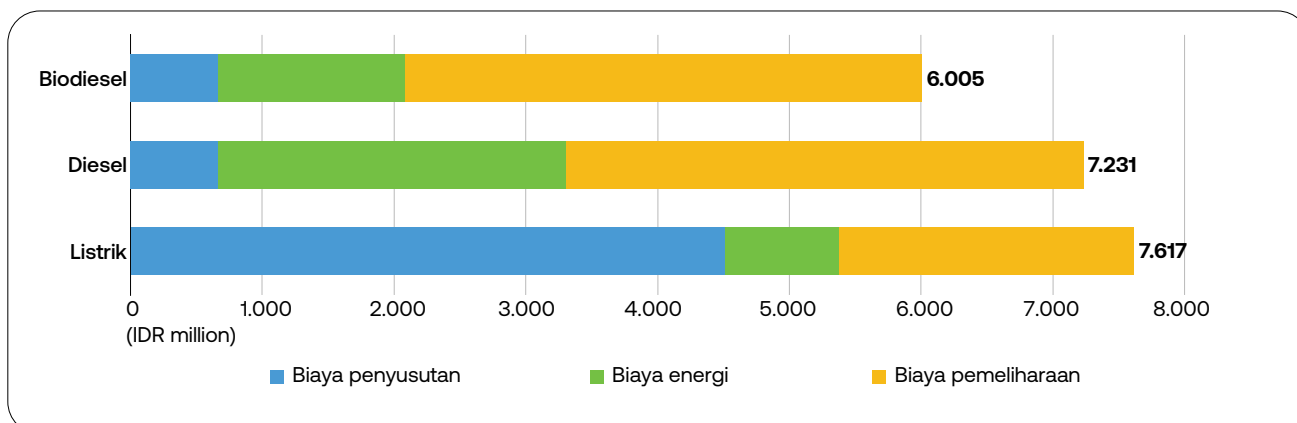
Bus listrik hampir 3 kali lebih hemat energi daripada bus diesel dengan ukuran yang sama (**Gambar 12**). Bus berbahan bakar diesel dan biodiesel memiliki intensitas energi akhir yang sama. Meskipun emisi gas buangnya lebih rendah, emisi tinggi dari DLUC menjadikan bus berbahan bakar biodiesel B35 sebagai penghasil emisi WTW tertinggi dengan 1.351,74 g CO₂e/km dibandingkan dengan dua model lainnya pada tahun 2024. Diikuti oleh bus berbahan bakar diesel (1.134,48 g CO₂e/km) dan bus listrik (928,51 g CO₂e/km) sebagai penghasil emisi terendah.

Gambar 12. Proyeksi emisi GRK WTW model bus biodiesel B35, diesel, dan listrik hingga tahun 2050



Biodiesel dan bus diesel akan tetap menjadi dua penghasil emisi tertinggi pada tahun 2050 dengan masing-masing 1.237,78 g CO₂e/km dan 959,16 g CO₂e/km. Bus listrik akan mengalami penurunan emisi WTW yang signifikan dengan 137,02 g CO₂e/km pada tahun 2050.

Gambar 13. TCO tanpa pajak dan subsidi bus biodiesel B35, solar, dan listrik, selama 10 tahun penggunaan



Saat ini, pada tahun 2024, harga bus listrik (Rp 5 miliar) hampir 6 kali lipat lebih mahal daripada bus diesel (Rp 876 juta). Jika perusahaan memutuskan untuk berinvestasi pada bus depo charger (150 kW), diperlukan biaya awal tambahan sebesar Rp 703,33 juta untuk satu armada bus listrik. Biaya penyusutan bus listrik pada tahun 2024 (terdiri dari harga beli, biaya depo charger, dan pengurangan nilai jual kembali) hampir 7 kali lipat lebih mahal daripada bus diesel. Sebagai gantinya, bus listrik memiliki biaya energi yang jauh lebih rendah (Rp 871,23 juta) dibandingkan dengan bus diesel (Rp 2,64 miliar) selama 10 tahun kepemilikan. Biaya perawatan bus TransJakarta saat ini adalah 0,2 USD/km atau sekitar Rp 3.194/km, yang jauh lebih rendah daripada bus diesel dengan Rp 5.600/km. Secara total, TCO bus listrik 5% dan 27% lebih tinggi daripada bus diesel dan biodiesel pada tahun 2024.

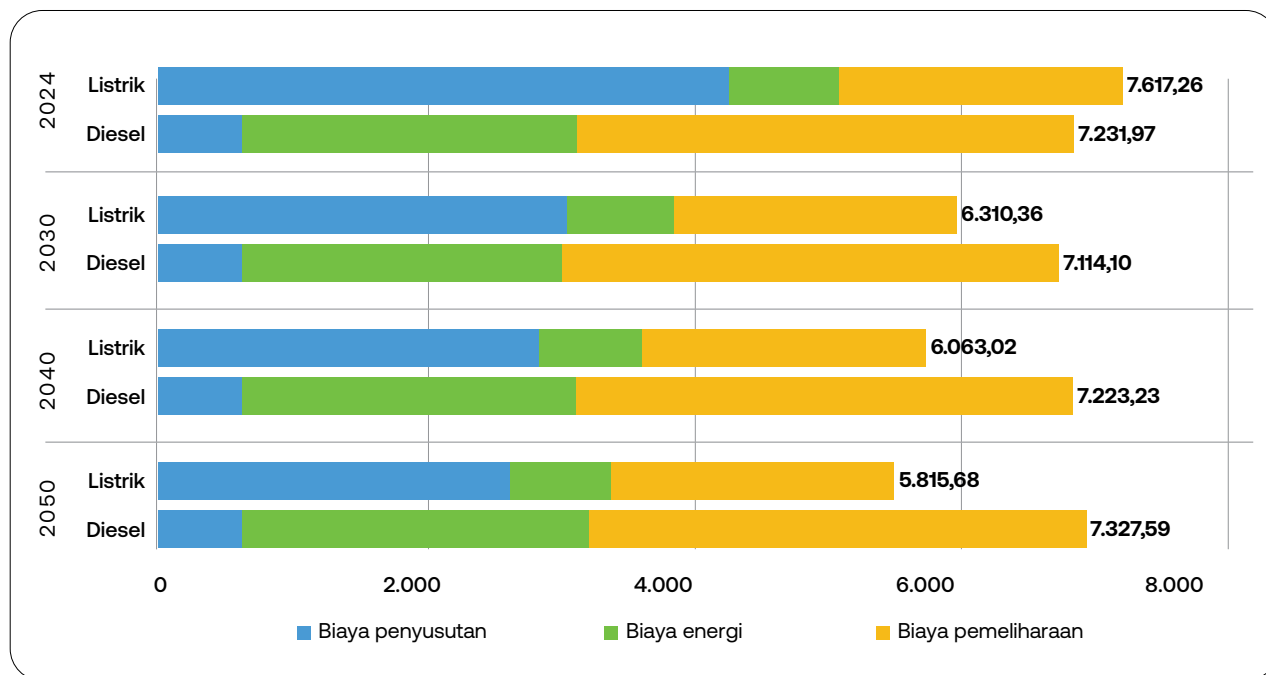
Tabel 10. TCO bus ICE yang menggunakan biodiesel B35 dan solar yang dibeli pada tahun 2024, selama 10 tahun kepemilikan

Bahan bakar	Harga Off-the-road (Rp juta)	TCO (Rp juta)			
		Biaya penyusutan	Biaya energi	Biaya pemeliharaan	Total
Biodiesel (B35)	876	666,50	1.414,08	3.924,48	6.005,05
Diesel	876	666,50	2.640,99	3.924,48	7.231,97

Tabel 11. TCO bus listrik yang dibeli pada tahun 2024, selama 10 tahun kepemilikan

Bahan bakar	Harga Off-the-road (Rp juta)	Biaya dimuka stasiun pengisian daya (Rp juta)	TCO (Rp juta)			
			Biaya penyusutan	Biaya energi	Biaya pemeliharaan	Total
Listrik	5.000	703,33	4.507,53	871,23	2.238,49	7.617,26

Gambar 14. Proyeksi TCO bus diesel dan listrik saat ini (2024) dan 2030



Dengan semua biaya didiskontokan ke nilai rupiah tahun 2024, TCO bus diproyeksikan hingga tahun 2050. Dengan asumsi harga yang menurun, biaya infrastruktur pengisi daya, dan peningkatan efisiensi energi, bus listrik akan mencapai paritas TCO-nya pada tahun 2030. Lebih lanjut, proyeksi tahun 2050 menunjukkan bahwa bus listrik bisa jauh lebih murah mencapai Rp 2,92 miliar. Hal ini mengurangi biayanya menjadi Rp 2,78 miliar, yang masih 4,2 kali lebih tinggi daripada bus diesel. Namun, TCO bus listrik (Rp 5,82 miliar) akan menjadi 20,6% lebih rendah daripada bus diesel (Rp 7,33 miliar), karena biaya energinya yang jauh lebih rendah (Rp 792,8 juta) dibandingkan dengan solar (Rp 2,74 miliar).

1.4 TRUK

Dekarbonisasi transportasi barang di jalan raya diharapkan dapat mengurangi permintaan kendaraan diesel. Dalam hal ini, truk listrik bertenaga baterai (BET) dan truk berbahan bakar listrik-sel (FCET) disarankan untuk menggantikan truk diesel.

Analisis teknoekonomi dilakukan untuk membandingkan berbagai ukuran truk diesel, BET, dan FCET. Truk diesel didasarkan pada tiga model berbeda yang tersedia di pasar Indonesia (truk kecil: Mitsubishi Fuso Canter FE 74 HDS, truk sedang: Mitsubishi Fighter X FM 65 240PS, truk besar: Hino FM 340 TH). BET dan FCET keduanya terdiri dari ukuran kecil dan besar. Model BET kecil didasarkan pada Mitsubishi Fuso eCanter, pendatang baru di pasar Indonesia, sedangkan model FCET kecil diambil dari studi ICCT untuk China²⁰. Baik model BET maupun FCET besar didasarkan pada laporan DEA²¹ untuk kasus Eropa.

Pertama, konsumsi energi dan emisi ditunjukkan, dengan asumsi jarak tempuh tahunan 100.000 km untuk semua model truk. Seperti yang dilakukan sebelumnya di bagian bus, emisi GRK WTW truk biodiesel mempertimbangkan emisi perubahan tata guna lahan langsung (DLUC) di samping emisi WTT dan emisi knalpot. FCET diasumsikan menggunakan bahan bakar hidrogen hijau, yang dihasilkan dari elektroliser PV surya, yang menghasilkan emisi WTW yang sangat rendah.

Tabel 12. Konsumsi energi dan emisi berbagai ukuran truk diesel

Kategori	Bahan bakar	Spesifikasi		Konsumsi energi		WTW GHG emissions ^(a)			
		GVW (ton)	Muatan maks. (ton)	Ekonomi bahan bakar di jalan raya (km/l)	Konsumsi bahan bakar tahunan (liter)	Emisi WTT & DLUC (g CO ₂ e/ton-km)	Emisi gas buang (g CO ₂ e/ton-km)	Emisi Total WTW (g CO ₂ e/ton-km)	Emisi WTW tahunan (kg CO ₂ e)
Kecil	Biodiesel B35	5–10	5,68	5,33	18.750	164,70	120,01	284,71	85.413
	Diesel	5–10	5,68	5,33	18.750	54,32	184,63	238,95	71.685
Besar	Biodiesel B35	>24	37,61	1,20	83.333	123,37	89,89	213,27	379.613
	Diesel	>24	37,61	1,20	83.333	40,69	138,30	178,99	318.599

FCET kecil dan besar diasumsikan membawa muatan masing-masing 3 dan 17,8 ton.

Tabel 13. Konsumsi energi dan emisi truk listrik bertenaga baterai

Kategori	Specifications			Konsumsi energi		WTW GHG emissions	
	GVW (ton)	Muatan maks. (ton)	Jangkauan baterai maksimum (km)	Ekonomi bahan bakar di jalan raya (kWh/km)	Konsumsi listrik tahunan (kWh)	Emisi WTW (g CO ₂ e/ton-km) ^(a)	Emisi WTW tahunan (kg CO ₂ e)
Kecil	6	3	140	0,741	74.107	191,14	57.341
Besar	28	17,8	313	1,147	114.659	49,84	88.719

FCET kecil dan besar diasumsikan membawa muatan masing-masing 3 dan 17,8 ton.

Tabel 14. Konsumsi energi dan emisi truk listrik sel bahan bakar

Kategori	Spesifikasi			Konsumsi energi		WTW GHG emissions	
	GVW (ton)	Muatan maks. (ton)	Jangkauan baterai maksimum (km)	Ekonomi bahan bakar di jalan raya (kWh/km)	Konsumsi listrik tahunan (kWh)	Emisi WTW (g CO ₂ e/ton-km) ^(a)	Emisi WTW tahunan (kg CO ₂ e)
Kecil	8,6	9,4	18	0,3806	3.806	24,10	7.231
Large	28	18.4	34	0.0654	6.542	6.98	12,429

FCET kecil dan besar diasumsikan membawa muatan masing-masing 3 dan 17,8 ton..

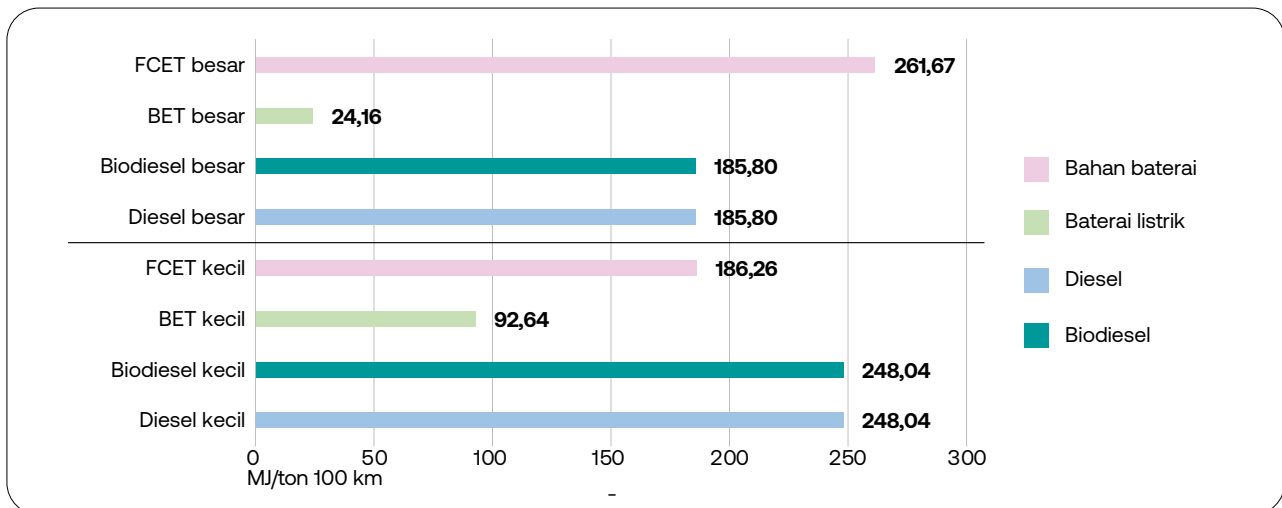
²⁰ ICCT. (2021). Total biaya kepemilikan truk berat di Tiongkok: truk bertenaga baterai, bertenaga sel bahan bakar, dan bertenaga diesel.

²¹ DEA. (2023). Data teknologi – Transportasi barang dan penumpang komersial

Intensitas energi akhir truk-truk tersebut dibandingkan satu sama lain, yang menunjukkan konsumsi energi dalam satuan MJ per ton muatan dan jarak tempuh 100 km. Dalam analisis ini, truk-truk kecil dan besar diasumsikan membawa muatan masing-masing 3 ton dan 17,8 ton.

Hasilnya menunjukkan bahwa truk diesel menjadi lebih hemat energi seiring bertambahnya ukuran. Di antara truk kecil, model BET memiliki intensitas energi final terendah (92,64 MJ/ton-100 km) diikuti oleh model diesel (186,26 MJ/ton-100 km) dan model diesel (248,04 MJ/ton-100 km). Di sisi lain, dalam kategori besar, FCET adalah model yang paling tidak hemat energi (261,67 MJ/ton-100 km), dengan BET menjadi yang paling hemat energi (24,16 MJ/ton-100 km).

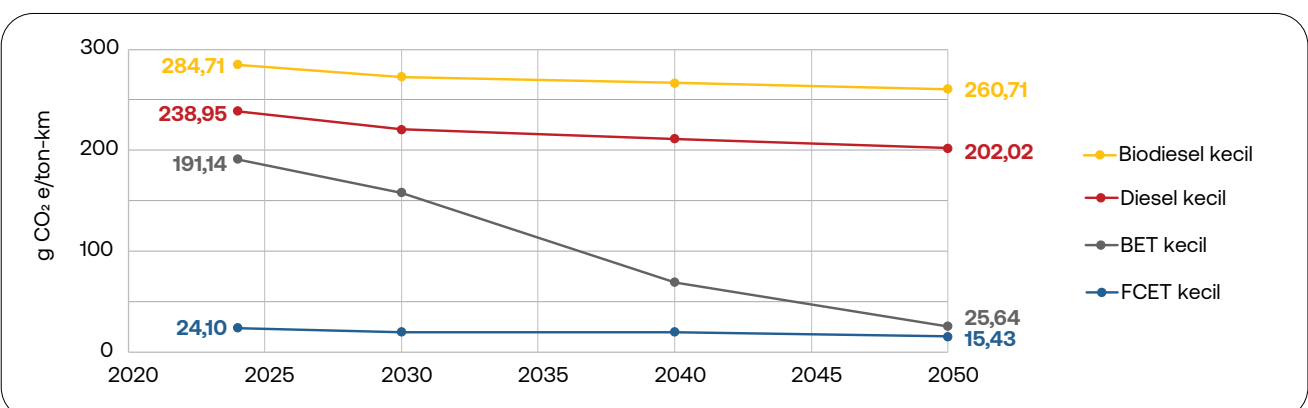
Gambar 15. Intensitas energi final berbagai ukuran truk biodiesel B35, diesel, dan listrik



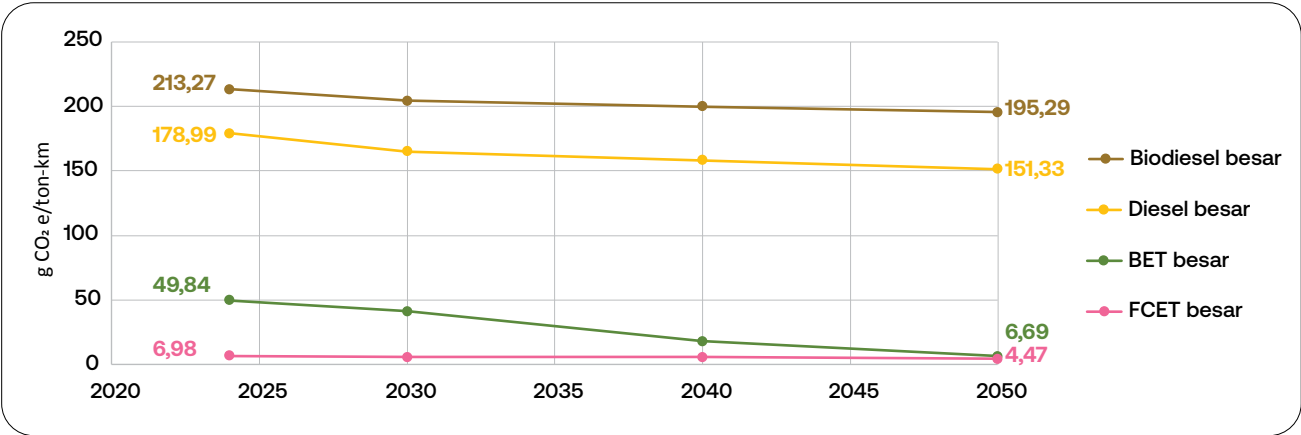
Seperti yang terlihat sebelumnya pada sektor bus, bahan bakar biodiesel B35 menghasilkan intensitas emisi WTW yang lebih tinggi dibandingkan dengan bahan bakar diesel fosil karena emisi DLUC-nya yang tinggi. Saat ini pada tahun 2024, elektrifikasi masih belum efektif dalam mengurangi emisi truk kecil. Pada kategori kecil dan besar, FCET menghasilkan intensitas emisi WTW terendah pada tahun 2024 dengan 24,10 dan 6,98 g CO₂e/ton-km. Intensitas emisi tertinggi dihasilkan oleh truk biodiesel dengan 284,71 and 213,27 g CO₂e/ton-km masing-masing pada model kecil dan besar.

BET menghasilkan intensitas emisi terendah kedua pada tahun 2024 dengan masing-masing 191,14 and 24,10 g CO₂e/ton-km pada model kecil dan besar. Dengan asumsi peningkatan efisiensi energi dan penurunan faktor emisi jaringan listrik di masa mendatang, intensitas emisi WTW BET akan turun secara signifikan menjadi 25,64 and 15,43 g CO₂e/ton-km. Hasil ini sangat bergantung pada peningkatan bauran energi terbarukan di jaringan listrik Indonesia.

Gambar 16. Proyeksi emisi GRK WTW dari model truk diesel kecil, biodiesel B35, baterai listrik, dan truk listrik sel bahan bakar hingga tahun 2050

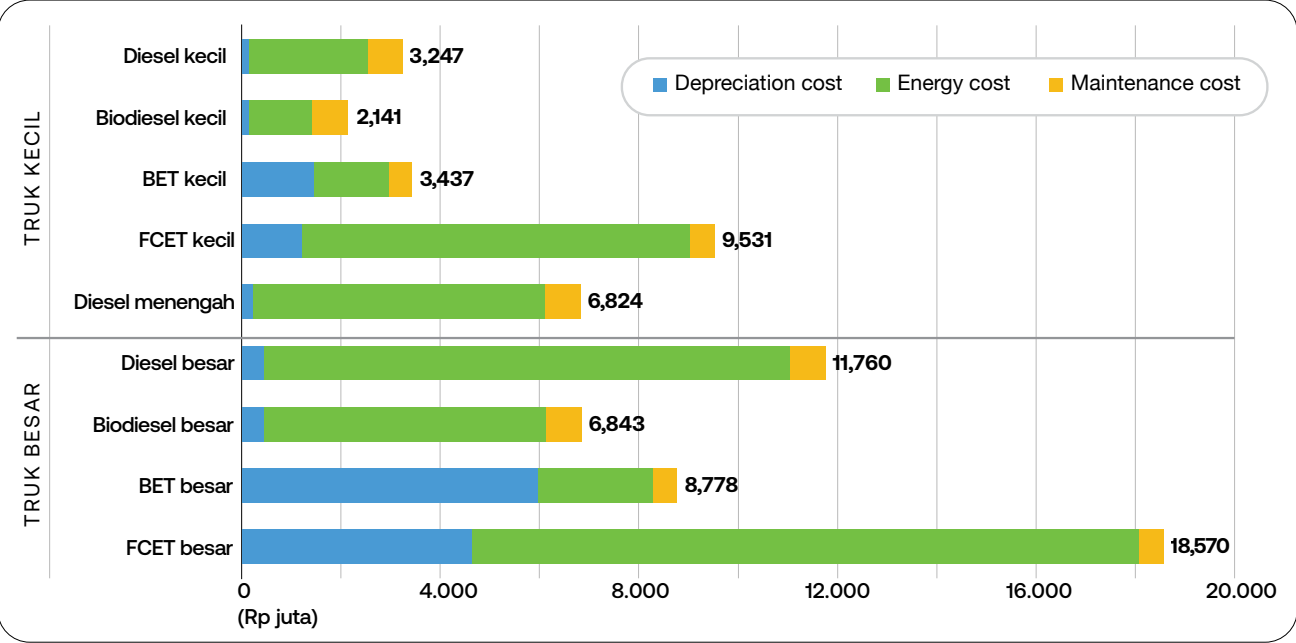


Gambar 17. Proyeksi emisi GRK WTW dari model truk diesel besar, biodiesel B35, baterai listrik, dan truk listrik sel bahan bakar hingga tahun 2050



Total biaya kepemilikan truk yang dibeli pada tahun 2024 dibandingkan dengan berbagai teknologi. Dalam kategori kecil, BET masih sedikit lebih mahal daripada truk diesel. Dalam kategori besar, BET telah mencapai paritas TCO-nya dengan diesel dan biodiesel. Dalam kedua kategori tersebut, FCET masih jauh lebih mahal daripada teknologi lainnya.

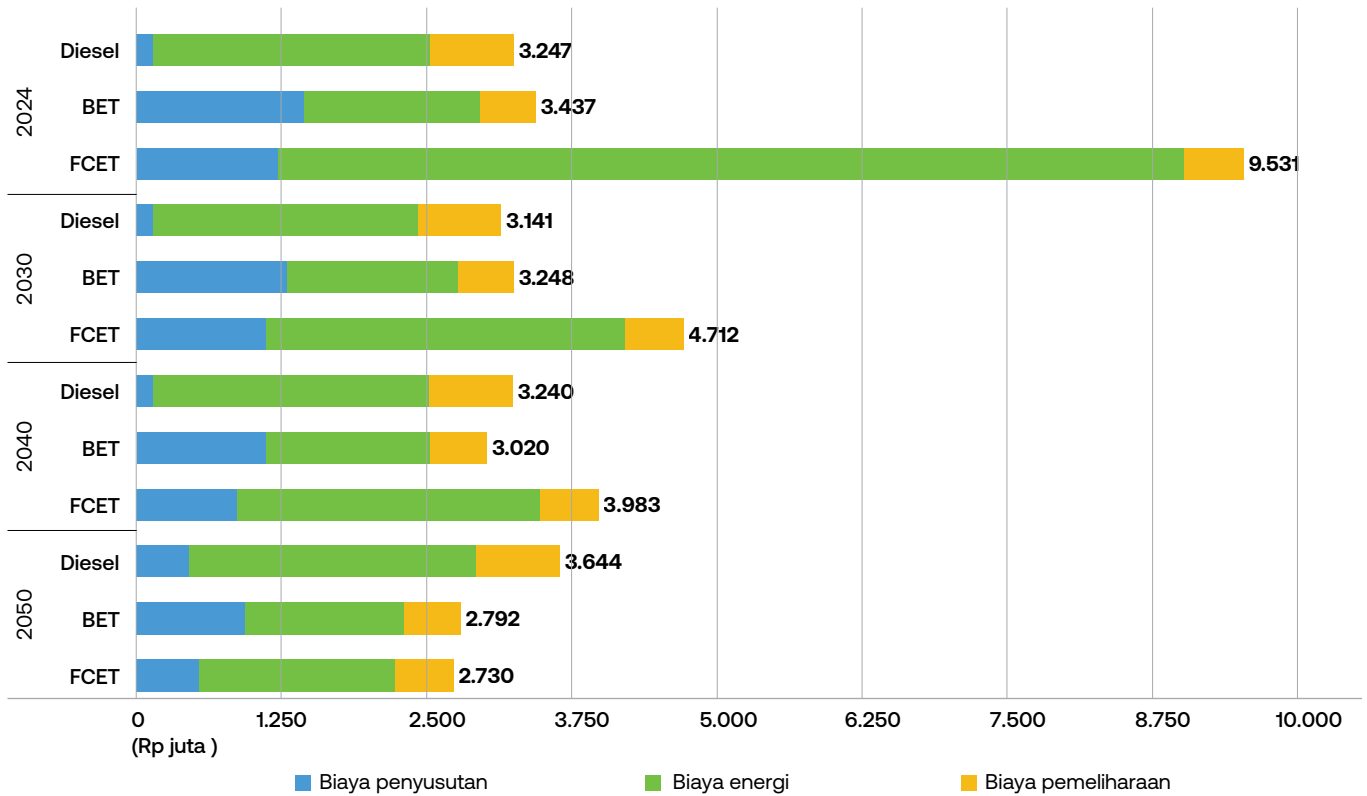
Gambar 18. TCO tanpa pajak dan subsidi 10 tahun beroperasi



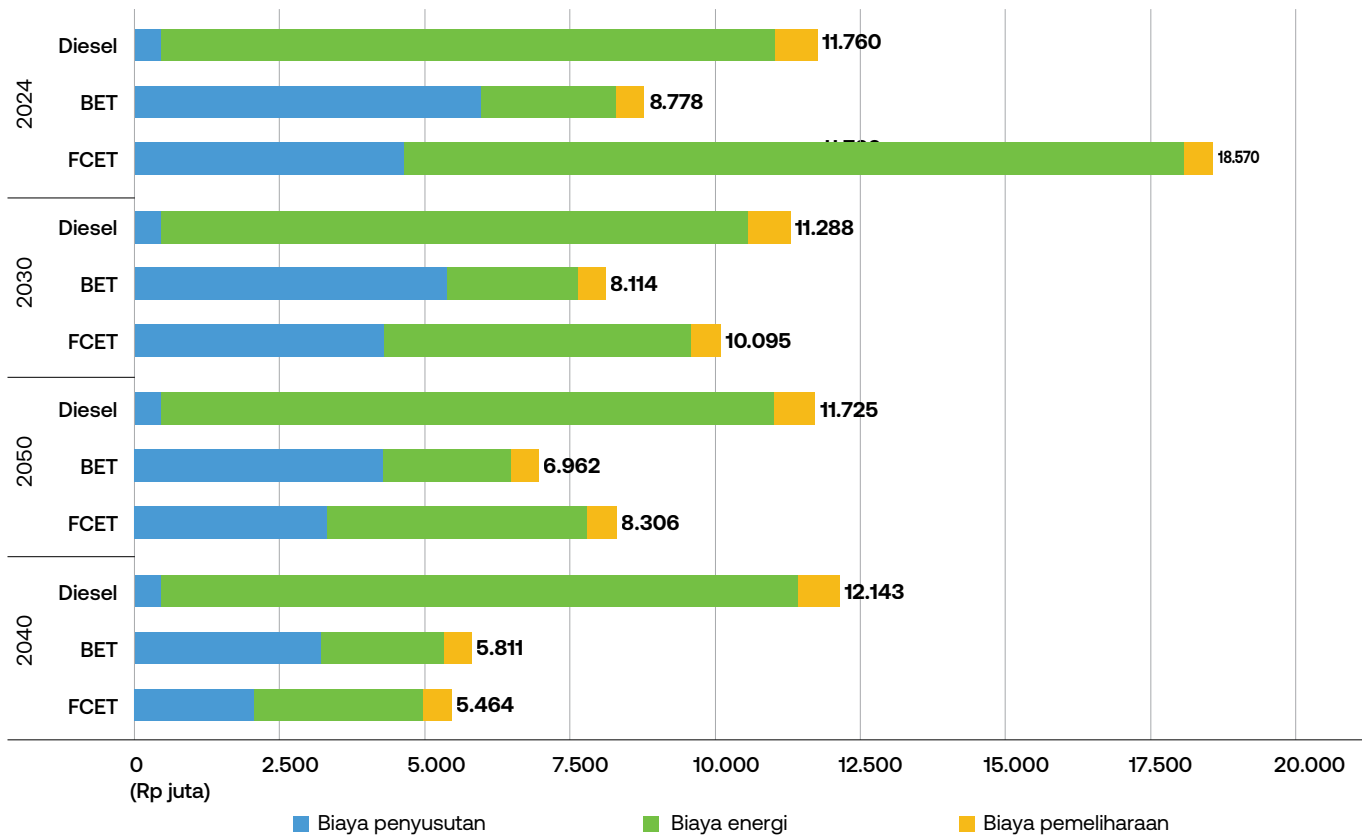
Tabel 15. TCO saat ini dari berbagai truk diesel, truk listrik bertenaga baterai, dan truk listrik sel bahan bakar

Kategori	Teknologi	Harga Off-the-road (Rp juta)	Biaya dimuka stasiun pengisian daya (Rp juta)	TCO (Juta Rp)			
				Biaya penyusutan	Biaya energi	Biaya pemeliharaan	Total
Kecil	Biodiesel B35	192		146,08	1.275,00	720,66	2.141,75
	Diesel	192		146,08	2.381,25	720,66	3.248,00
	BET	974	703,33	1.444,39	1.509,97	493,40	3.437,76
	FCET	1.597,37		1.215,35	7.810,95	505,57	9.531,87
Besar	Biodiesel B35	600		456,50	5.666,67	720,66	6.843,84
	Diesel	600		456,50	10.583,33	720,66	11.760,50
	BET	6.907,10	703,33	5.958,54	2.336,23	483,40	8.778,17
	FCET	6.908,61		4.640,07	13.425,29	505,57	18.570,93

Gambar 19. Proyeksi TCO truk diesel kecil, truk bertenaga baterai, dan truk bertenaga sel bahan bakar hingga tahun 2050



Gambar 20. Proyeksi TCO truk besar berbahan bakar diesel, baterai listrik, dan sel bahan bakar listrik hingga tahun 2050



Dengan semua biaya didiskontokan ke nilai rupiah tahun 2024, TCO truk diproyeksikan hingga tahun 2050. Asumsinya adalah harga truk diesel yang konstan. Harga BET dan FCET diasumsikan mengikuti tren penurunan harga dari studi ICCT di Tiongkok. Pada tahun 2050, harga BET dan FCET diperkirakan turun sebesar 49,7% dan 37,8% dari harga saat ini. Untuk FCET, menurut studi ERIA²², biaya produksi hidrogen hijau menggunakan elektroliser PV surya di Indonesia akan turun sebesar 66,3% pada tahun 2050. Namun, ini tidak termasuk biaya distribusi dan infrastruktur pendukung lainnya.

Pada kategori kecil, BET akan mencapai paritas TCO dengan truk diesel pada tahun 2040, sementara FCET akan menyusul pada tahun 2050. Pada kategori besar, FCET akan mencapai paritas TCO dengan truk diesel pada tahun 2030, menyusul BET yang telah mencapainya lebih awal pada tahun 2024. Namun, hasil yang menguntungkan bagi FCET ini sangat bergantung pada harga hidrogen di Indonesia, terutama pengembangan infrastruktur distribusinya. Selain itu, FCET belum mencapai kelayakan pasar, khususnya di Indonesia. Di sisi lain, BET telah memasuki pasar Indonesia dengan infrastruktur pengisian daya yang sudah tersedia. Dekarbonisasi dapat dimulai dengan menetapkan target untuk penyerapan BET untuk industri tertentu, dilengkapi dengan insentif seperti pembebasan pajak.

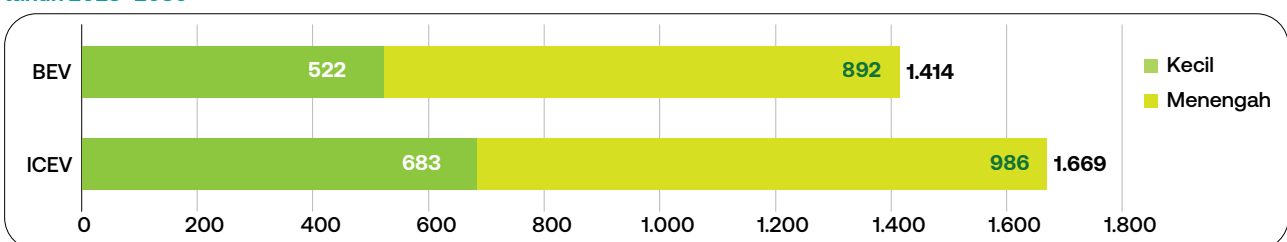
BIAYA KONSUMEN UNTUK MENCAIPI TARGET NASIONAL PENJUALAN BEV

Berdasarkan Peta Jalan NZE, Pemerintah Indonesia telah menetapkan target untuk mencapai 2 juta unit BEV pada tahun 2030. Total penjualan BEV selama periode 2019–2023 hanya sebesar 28.188 unit²³. Artinya, masih tersisa 1,97 juta unit BEV untuk mencapai target 2030 atau rata-rata 184,9 ribu unit per tahun mulai tahun 2024 hingga 2030.

Dengan asumsi penjualan tahunan terdiri dari 50% mobil kecil dan 50% mobil menengah, total biaya konsumen dihitung untuk mencapai 2 juta unit BEV pada tahun 2030. Biaya dihitung dengan menambahkan biaya di muka (harga pembelian dan, untuk BEV, biaya pemasangan pengisi daya) dan biaya pengoperasian dan pemeliharaan dari tahun pembelian kendaraan hingga tahun 2030. Pengurangan biaya yang diproyeksikan pada bagian sebelumnya juga dipertimbangkan.

Secara total, BEV kecil akan menelan biaya Rp 522 triliun, sedangkan BEV sedang akan membutuhkan Rp 892 triliun pada tahun 2030. Perhitungan serupa juga dilakukan untuk mencapai jumlah penjualan ICEV yang sama pada tahun 2030. Hasilnya menunjukkan bahwa ICEV kecil akan menelan biaya Rp 683 triliun, sedangkan ICEV sedang akan membutuhkan Rp 986 triliun. Secara total, biaya untuk mobil BEV (Rp1.415 triliun) lebih rendah 15,2% daripada ICEV (Rp1.669 triliun).

Gambar 21. Total investasi awal pengguna dan biaya O&M untuk mencapai 2 juta unit BEV dibandingkan dengan ICEV pada tahun 2023–2030



INFRASTRUKTUR PENGISIAN DAYA

Tabel 16 di bawah ini menunjukkan model keuangan stasiun pengisian daya kendaraan listrik komersial berkapasitas 25 kW, yang menghitung biaya, pendapatan, dan laba dari operasi tahunannya. Biaya awal unit dan pemasangan yang ditunjukkan di sini adalah harga yang dipublikasikan oleh PLN untuk membuka waralaba pengisian daya kendaraan listrik pada tahun 2022. Bagian lain dari biaya awal adalah biaya tanah untuk area seluas 42 m² di Jakarta. Total biaya awal adalah Rp 1,4 miliar atau Rp 88,58 juta per tahun selama 30 tahun beroperasi.

²² Rusli, R.D., Purwanto, A.J., Setyawati, C.E.N., Elsy, V., Bhaskara, R.W., & Pranindita, N. (2024), 'Ekonomi Hidrogen untuk Industri Asia Tenggara' di Purwanto, A.J. dan R.D.Rusli (eds.) *Permintaan dan Pasokan Hidrogen di Sektor Industri ASEAN*. Jakarta: ERIA, hal.132-145.

²³ Gaikindo. (2024). Data Industri Mobil Indonesia. <https://www.gaikindo.or.id/indonesian-automobile-industry-data/>

Biaya listrik dihitung untuk melayani pengisian daya selama satu tahun untuk 10 unit E2W dan 20 unit BEV. Total konsumsi pengisian daya tahunan adalah 459,7 MWh dengan biaya Rp 513,37 juta, sedangkan biaya operasional & pemeliharaan diasumsikan sebesar 10% dari biaya listrik. Harga jual kembali listrik adalah Rp 2.466,78/kWh yang menghasilkan pendapatan Rp 2,1 miliar per tahun. Perkiraan laba tahunan akan menjadi Rp 480,74 juta.

Tabel 16. Biaya dan pendapatan untuk stasiun pengisian kendaraan listrik komersial 25 kW

1. BIAYA DI MUKA			
Biaya awal untuk unit dan pemasangan (25 kW)	389.000.000	Rp	Waralaba PLN
Biaya pengisi daya tahunan	33,774,952	Rp	Pemakaian 15 tahun
Harga tanah(42 m ² - DKI Jakarta)	1.008.000.000	Rp	<u>Rp 24 juta per m² - harga median DKI Jakarta</u>
Biaya tanah tahunan	54.806.302	Rp	30-tahun
Total biaya awal	1.397.000.000	Rp	
Total biaya awal tahunan	88.581.254	Rp	
2. BIAYA LISTRIK			
Mobil			
Jumlah mobil EV dilayani per	20	unit	1:20 ratio
Jarak tempuh tahunan per mobil EV	10.000	km	ICCT (2023)
Hemat bahan bakar	0,1113	kWh/km	Wuling Air ev
Konsumsi listrik tahunan mobil EV	22.250	kWh	
Total konsumsi pengisian daya tahunan untuk 1 pengisi daya	459.720	kWh	
Pengisi daya listrik harga beli dari PLN	1.116,71	Rp/kWh	
Total biaya listrik tahunan untuk 1 pengisi daya	496.935.950	Rp	
Total biaya O&M variabel tahunan lainnya	49.693.595	Rp	10% biaya listrik per tahun
3. REVENUE			
Harga jual listrik	2.466,78	Rp/kWh	
Total pendapatan tahunan	1.097.717.100	Rp	
4. PROFIT			
Total keuntungan tahunan	462.506.301	Rp	

Untuk mendukung peningkatan jumlah kendaraan listrik, infrastruktur pengisian daya harus dikembangkan jauh lebih cepat dari laju saat ini. Dengan asumsi satu stasiun pengisian daya melayani 20 mobil listrik, total 100.000 stasiun pengisian daya perlu dibangun pada tahun 2030. Ini setara dengan 16.666 per tahun selama periode 2025 hingga 2030. Total biaya investasi yang dibutuhkan adalah Rp139,7 triliun.

Tabel 17. Total biaya investasi awal untuk infrastruktur pengisian daya hingga tahun 2030

Target unit mobil BEV tahun 2030	2 juta
Asumsi rasio mobil BEV dengan stasiun pengisian daya	20 : 1
Jumlah stasiun pengisian daya yang perlu dibangun per tahun hingga tahun 2030	16.666
<u>Total Investasi di muka sampai 20230</u>	Rp.139.7 trillun

1.5 Ringkasan

Analisis transportasi mengevaluasi Total Biaya Kepemilikan (TCO), efisiensi, dan emisi gas rumah kaca (WTW GHG) untuk berbagai model kendaraan di berbagai kategori. Berikut ini adalah analisis berdasarkan kategori transportasi jalan:



- **Efektivitas pengurangan emisi di sektor transportasi sangat bergantung** pada integrasi energi terbarukan ke dalam jaringan listrik dan infrastruktur pengisian daya listrik.



- **Terkait kendaraan roda dua, kendaraan roda dua listrik (E2W) secara signifikan lebih hemat energi dan memiliki emisi hampir 73%** lebih sedikit per km daripada model mesin pembakaran internal konvensional (ICE2W).



- **E2W sudah lebih kompetitif dari segi biaya daripada ICE2W berukuran serupa**, dengan TCO 15% lebih rendah, terutama karena biaya energinya yang lebih rendah. Perbedaannya meningkat menjadi sekitar 25% pada tahun 2050.



- **Dengan demikian, tanpa dukungan kebijakan, kendaraan roda dua listrik sudah kompetitif dari segi biaya** dan seiring dengan menurunnya biaya paket baterai, penurunan harga pembelian diperkirakan akan terjadi.



- **Pada kategori mobil penumpang, kendaraan listrik bertenaga baterai (BEV) merupakan penghasil emisi gas rumah kaca terendah**, sementara model bermesin pembakaran internal dan hibrida listrik menghasilkan lebih tinggi emisi, tergantung pada kategorinya.



- **Tanpa adanya kebijakan fiskal yang diperkenalkan, satu dari dua model BEV di setiap kategori mobil kecil dan menengah telah mencapai keseimbangan biaya dengan kendaraan ICE pada tahun 2024.** Sementara itu, model BEV besar hingga tahun 2024 belum mencapai keseimbangan biaya, karena itu dibutuhkan dukungan kebijakan agar dapat bersaing.



- **Sementara untuk bus, meskipun biaya energinya jauh lebih rendah, TCO bus listrik masih 5% lebih tinggi daripada bus diesel pada tahun 2024** karena harga belinya yang jauh lebih tinggi.



- **Bus biodiesel menghasilkan emisi gas rumah kaca (GHG) tertinggi (WTW) (lebih tinggi dari bus diesel)** karena emisi biodiesel yang tinggi dari sumur ke tangki dan emisi perubahan penggunaan lahan langsung.



- **Pada kategori truk, jika mempertimbangkan emisi well-to-wheel dan perubahan tata guna lahan, truk biodiesel (B35) menghasilkan emisi WTW tertinggi** baik pada kategori besar maupun kecil.



- **BET besar mencapai keseimbangan biaya dengan kendaraan diesel sekitar tahun 2030, sementara dalam kategori kecil, BET hanya mencapai keseimbangan biaya sekitar tahun 2040** berdasarkan model representatif.



- **Truk listrik sel bahan bakar dan truk listrik baterai merupakan alternatif yang menjanjikan dalam hal potensi pengurangan emisi dan biaya, namun terdapat ketidakpastian yang kuat** seputar:
 - Keandalan produksi hidrogen bertenaga RE
 - Perhitungan TCO FCET tidak mencakup biaya infrastruktur distribusi (pengembangan bergantung pada skala ekonomi, biaya transportasi, dll.)
 - Proyeksi harga BET dan FCET di masa mendatang yang digunakan diambil dari kasus Eropa
 - Penerimaan BET sangat bergantung pada pengembangan infrastruktur pengisian daya

“

Untuk mendukung peningkatan populasi BEV, infrastruktur pengisian daya harus dikembangkan jauh lebih cepat daripada laju saat ini.

”





Sektor Proses Pemanasan Industri



2. Sektor Proses Pemanasan Industri

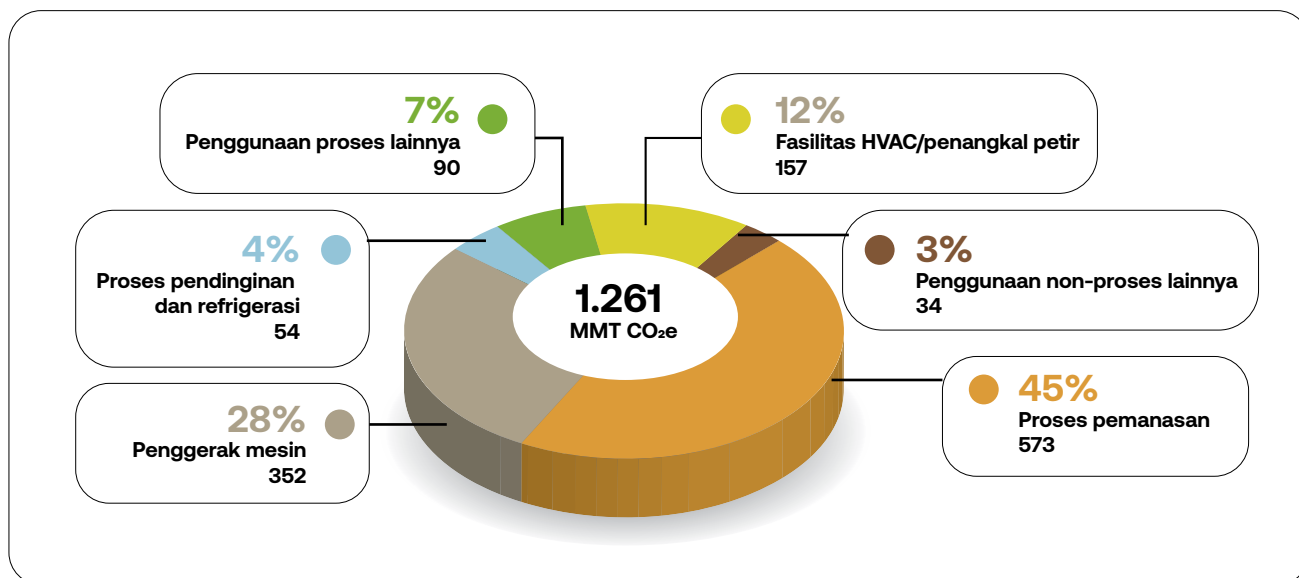
Sektor industri menyumbang 45% dari total konsumsi energi final di Indonesia pada tahun 2023. Konsumsi energi saat ini didominasi oleh bahan bakar fosil, dengan batubara, gas alam, dan bahan bakar minyak (termasuk LPG) masing-masing mengambil sekitar 57%, 21%, dan 5%, dan konsumsi yang tersisa ditutupi oleh biomassa industri (4%) dan listrik (12%) (Kementerian ESDM, 2024).

Sektor industri diharapkan menjadi elemen kunci dalam pertumbuhan ekonomi Indonesia, dan permintaan energi karenanya diperkirakan akan meningkat secara signifikan baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang, di mana upaya dekarbonisasi penting untuk memenuhi target yang dicanangkan untuk mencapai emisi nol bersih pada tahun 2060.

Konsumsi energi dalam industri terutama melayani dua kebutuhan utama:

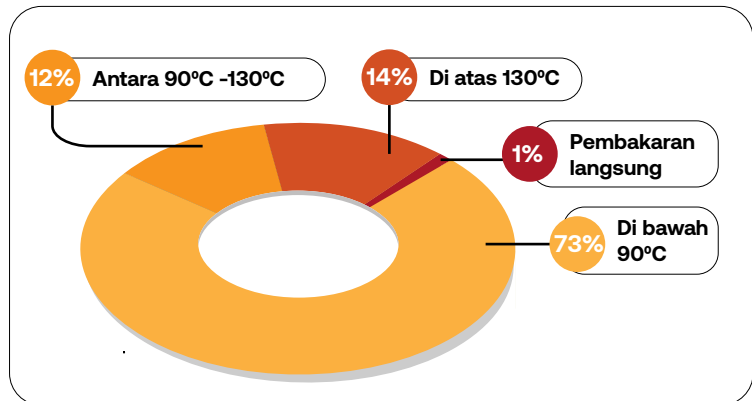
- Proses pemanasan:** terbagi antara pemanasan langsung dan pemanasan tidak langsung. Proses pemanasan langsung di sebagian besar sektor sangat bergantung pada bahan bakar fosil, terutama untuk operasi suhu tinggi di atas 500°C, di mana alternatif rendah karbon masih terbatas. Sebaliknya, pemanasan tidak langsung, yang juga sebagian besar berbasis bahan bakar fosil, menawarkan potensi elektrifikasi yang lebih besar, terutama jika sumber energi terbarukan diintegrasikan ke dalam pasokan listrik (Rightor et.al, 2022). Sebagai contoh, Gambar 2 menunjukkan bagaimana sebagian besar permintaan energi di sektor makanan dan minuman dapat dipenuhi oleh pemanasan tidak langsung di bawah 130 °C, berdasarkan serangkaian audit energi.
- Penggerak mesin:** listrik digunakan untuk menggerakkan penggerak mesin, yaitu sistem yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk menggerakkan mesin dan peralatan. Penggerak mesin biasanya terdiri dari motor, sistem kontrol, dan komponen mekanik terkait untuk mengatur kecepatan, torsi, dan arah gerakan. Penggerak mesin terutama berupa motor listrik, pompa, dan kipas (EIA, 2013).

Gambar 22 :Pemanasan proses dan penggerak mesin secara umum menyumbang sebagian besar emisi terkait energi di sektor industri, seperti yang diamati dalam kasus AS berdasarkan survei ekstensif (Departemen Energi AS, 2022).



Laporan ini berfokus pada pemanasan proses untuk menunjukkan potensi elektrifikasi sektor industri dalam upaya mengurangi ketergantungan bahan bakar fosil. Oleh karena itu, bagian ini mengkaji bagaimana berbagai teknologi dalam sektor ini berinteraksi dan mengevaluasinya dibandingkan dengan opsi elektrifikasi. Elektrifikasi akan memungkinkan industri memperoleh penghematan biaya karena harga listrik menurun dengan integrasi lebih banyak energi terbarukan ke dalam jaringan dan pada potensi pajak CO₂ yang dapat dihindari di masa mendatang. Pada saatnya, perubahan ini juga menghasilkan pengurangan CO₂, yang meningkatkan potensi industri untuk mitigasi GRK (McKinsey, 2024). Hal ini meningkatkan peluang bagi para pembuat kebijakan untuk mendukung rencana penerapan teknologi listrik.

Gambar 23. Contoh persyaratan suhu pemanasan proses yang diamati di beberapa perusahaan dalam sektor makanan dan minuman di Indonesia. (INDODEPP, 2023)



2.1 Proses Pemanasan: Deskripsi Teknologi Dekarbonisasi

Laporan ini memberikan gambaran umum berbagai teknologi pemanas yang digunakan dalam aplikasi industri dan komersial, menyoroti prinsip operasional dan efisiensi energinya. Laporan ini mencakup pompa kalor, boiler listrik, boiler biomassa, boiler batu bara, boiler minyak, boiler gas alam, boiler kondensasi gas alam, dan boiler kondensasi biomassa. Setiap teknologi diperiksa dari segi deskripsi, efisiensi energi, dan emisi CO₂, yang menawarkan wawasan tentang efektivitasnya sebagai sumber panas dalam rentang suhu dan konteks operasional yang berbeda. Analisis komparatif ini berfungsi sebagai sumber untuk memahami opsi yang tersedia untuk mencapai solusi pemanasan proses yang efisien dan berkelanjutan.

Terdapat peluang untuk melakukan elektrifikasi proses pemanasan dalam rentang suhu yang lebih rendah, di bawah 100°C dan sebagian besar proses suhu sedang antara 100°C hingga 500°C, terutama di subsektor seperti kimia, petrokimia, makanan dan minuman, tembakau, manufaktur mesin dan transportasi serta industri lainnya (pertanian, pertambangan dan konstruksi) (Hasanbeigi et.al, 2021). Kebutuhan akan suhu panas yang lebih tinggi untuk sektor-sektor seperti produksi semen dan baja akan jauh lebih sulit untuk digantikan dengan listrik dengan teknologi yang tersedia saat ini dan oleh karena itu terus bergantung pada pembakaran bahan bakar fosil, yang kemudian menyebabkan emisi gas rumah kaca yang signifikan. Transisi ke alternatif rendah karbon, seperti sumber panas berbasis listrik atau energi terbarukan, dapat membantu mengurangi emisi ini sambil mendukung permintaan energi industri (Gross dan Mai, 2021). Untuk menilai biaya produksi panas di berbagai teknologi, kami melakukan analisis Biaya Pemanasan yang Diratakan (LCOH), untuk menganalisis biaya rata-rata pembangkitan panas per unit panas yang dipasok. Untuk memastikan kejelasan dalam membandingkan teknologi ini, tabel berikut menyediakan deskripsi dan data teknis, termasuk informasi biaya dan efisiensi jika tersedia. Analisis LCOH kemudian disajikan dalam bagian berikutnya.

Deskripsi teknologi dan data telah dikumpulkan dengan menggabungkan informasi dari sumber internasional dan domestik seperti katalog teknologi Denmark untuk proses panas industri (Danish Energy Agency, 2024), penelitian pustaka, dan konsultasi pemangku kepentingan melalui lokakarya terorganisir dan wawancara individu. Pemangku kepentingan meliputi para ahli dalam efisiensi energi di sektor industri dan pengetahuan dari audit energi yang dilakukan, serta asosiasi industri, lembaga pemikir, dan akademisi. Oleh karena itu, data yang dihasilkan merupakan perkiraan status teknologi pemanasan proses yang diharapkan di Indonesia yang dibentuk oleh pandangan luas di berbagai masukan. Prioritas telah diberikan kepada masukan dari para ahli Indonesia, dan jika tidak ada data yang jelas tersedia khusus untuk Indonesia, (Danish Energy Agency, 2024) telah digunakan sebagai referensi. Hal Ini juga mencakup teknologi yang tidak umum digunakan di Indonesia (seperti pompa panas dan boiler kondensasi) dan tren pengembangan masa depan yang diharapkan.

Pompa kalor bertenaga kompresor

Deskripsi Teknologi	- Pompa kalor yang digerakkan kompresor mengambil kalor dari sumber kalor (kalor masukan) dan mengubahnya ke suhu yang lebih tinggi (kalor keluaran) menggunakan listrik. Dengan memanfaatkan energi yang tersedia di sumber kalor, kebutuhan listrik dibandingkan dengan keluaran kalor rendah, sehingga pompa kalor sangat efisien dibandingkan dengan boiler konvensional. - Pompa kalor memiliki efisiensi yang sangat tinggi dan tidak menghasilkan emisi langsung, tetapi juga lebih bergantung pada proses spesifik yang diintegrasikannya, dibandingkan dengan boiler konvensional. - Pompa kalor saat ini belum dianggap sebagai teknologi yang umum di Indonesia, tetapi telah terbukti dan tersedia secara komersial untuk pemanasan suhu rendah hingga 90 °C. Karena perkembangan yang signifikan dalam beberapa tahun terakhir, berbagai jenis pompa kalor kini tersedia untuk menghasilkan kalor hingga 150 °C. - Pompa kalor paling cocok untuk menghasilkan air panas, tetapi ada pilihan yang tersedia untuk menghasilkan uap juga, meskipun umumnya dengan efisiensi yang lebih rendah dan biaya yang lebih tinggi. • Pompa kalor juga dapat digunakan untuk pendinginan yang dihasilkan bersama dengan panas, sehingga menyediakan berbagai fungsi yang lebih luas dan potensi untuk mengurangi kebutuhan pendinginan dalam fasilitas industri. Hal ini sekali lagi bergantung pada proses industri tertentu dan tidak dibahas lebih lanjut dalam studi ini. - Pompa kalor diharapkan akan meningkat di masa mendatang sebagai fungsi dari teknologi yang semakin matang dan digunakan secara lebih luas yang mengarah pada efek pembelajaran dan pengurangan biaya, serta peningkatan kinerja teknis. - Uraian lebih lanjut dan ikhtisar teknologi pompa kalor yang tersedia dapat ditemukan di (Danish Energy Agency, 2024) dan (Sawe et. al, 2024).
Efisiensi energi	- Efisiensi pompa kalor dijelaskan dengan Koefisien Kinerja (COP) yang dinyatakan sebagai keluaran panas yang berguna dibagi dengan listrik yang digunakan. COP terutama didefinisikan oleh perbedaan antara sumber panas (tempat pompa panas mengekstraksi panas) dan penyerap panas (tempat panas disalurkan). Semakin rendah perbedaan suhu, semakin tinggi COP, dan sebaliknya. Perbedaan suhu sering disebut sebagai peningkatan suhu yang harus disalurkan pompa kalor. - COP pompa kalor biasanya berada dalam kisaran 3-4 saat menyalurkan panas suhu rendah (pasokan 70-80 °C) – yang dapat dianggap sama dengan efisiensi 300-400% dibandingkan dengan teknologi pemanas lainnya. - COP akan berkisar tergantung pada peningkatan suhu, dari sekitar 2,0 jika menyalurkan hingga 150 °C hingga di atas 5 untuk suhu di bawah 30 °C. Penyaluran panas aktual yang dapat dicapai tergantung pada suhu sumber panas. - Untuk tujuan studi ini, dipilih dua arketipe pompa kalor untuk aplikasi yang berbeda. - Suhu rendah: memanfaatkan sumber pada suhu 30 °C (misalnya, suhu rendah air atau udara sekitar) dan menyalurkan air panas pada suhu 80 °C, sehingga menghasilkan COP sebesar 3,83 - Suhu sedang: memanfaatkan sumber panas pada suhu 80 °C (misalnya panas buangan internal atau air pendingin lainnya) dan menyalurkan air panas hingga suhu 150 °C, sehingga menghasilkan COP sebesar 2,95. - Dalam kedua kasus tersebut, peningkatan teknologi diharapkan menghasilkan nilai COP pada tahun 2050 masing-masing sebesar 4,07 dan 3,20.

Boiler listrik

Deskripsi teknologi	Boiler listrik adalah bejana bertekanan yang mengandalkan elemen resistansi yang dipasang di dalam boiler untuk memanaskan air dan menghasilkan uap atau air panas rumah tangga. Boiler listrik tidak memiliki komponen kompleks bawaan dan karenanya sangat andal dan mudah dirawat. Dengan demikian, harga listrik merupakan bagian utama dari biaya operasional.
Efisiensi energi	Konversi energi listrik menjadi energi panas terjadi pada efisiensi hampir 99-100%.

Boiler biomassa

Technology description	- Boiler biomassa adalah teknologi energi terbarukan yang menggunakan bahan organik—seperti kayu, sisa pertanian, atau tanaman energi khusus—untuk menghasilkan panas atau uap untuk proses industri. Karena sifat bahan bakar dan pembakarannya, ada kebutuhan yang lebih tinggi untuk perawatan berkelanjutan dibandingkan dengan boiler berbahan bakar gas atau listrik. - Tidak seperti boiler bahan bakar fosil, sistem biomassa mengandalkan sumber bahan bakar karbon netral, dengan asumsi karbon dioksida yang dilepaskan selama pembakaran seimbang dengan karbon yang diserap selama pertumbuhan biomassa.
Efisiensi energi	Konversi ke energi termal terjadi pada efisiensi sekitar 82%-85%

Boiler batubara

Deskripsi teknologi	Boiler batu bara membakar batu bara di tungku untuk menghasilkan panas, menghasilkan uap atau air panas untuk pemanasan atau tenaga. Komponen utamanya meliputi tungku, penukar panas, dan sistem gas buang, yang mengatur pembakaran dan perpindahan panas. Sistem ini sering kali dilengkapi perangkat seperti <i>economizer</i> dan pemanas awal udara untuk meningkatkan efisiensi pada unit yang lebih besar.
Efisiensi energi	Konversi ke energi termal terjadi pada efisiensi hampir 86%-90%.

Boiler minyak

Deskripsi teknologi	Boiler minyak membakar minyak untuk menghasilkan panas, menghasilkan uap atau air panas untuk keperluan pemanasan. Komponen utamanya meliputi pembakar, penukar panas, dan sistem gas buang, yang menangani pembakaran dan perpindahan panas. Minyak dimasukkan ke dalam pembakar, di mana minyak tersebut diatomisasi dan dinyalakan. Panas yang dihasilkan dipindahkan ke air atau uap dalam penukar panas. Boiler minyak efisien tetapi dapat berdampak pada lingkungan karena emisi dan konsumsi minyak.
Efisiensi energi	Konversi ke energi termal terjadi pada efisiensi hampir 87%-90%

Natural Gas Boilers

Deskripsi teknologi	Boiler gas alam membakar gas alam untuk menghasilkan panas, menghasilkan uap atau air panas untuk pemanasan. Komponen utamanya meliputi pembakar, penukar panas, dan sistem gas buang, yang mengatur pembakaran dan perpindahan panas. Gas alam dinyalakan di pembakar, dan panas yang dihasilkan dipindahkan ke air atau uap. Boiler ini dikenal karena efisiensinya dan emisi yang lebih rendah dibandingkan dengan boiler berbahan bakar batu bara atau minyak. Boiler ini umumnya digunakan karena pengoperasiannya yang relatif bersih dan mudah digunakan.
Efisiensi energi	Konversi ke energi termal terjadi pada efisiensi 87%-90%

Boiler Kondensasi Gas Alam

Deskripsi teknologi	- Boiler gas kondensasi adalah sistem pemanas efisiensi tinggi yang mengekstraksi panas maksimum dari pembakaran dengan mengembunkan uap air yang ada dalam gas buang. Dengan demikian, boiler ini mencapai efisiensi lebih dari 100% (berdasarkan nilai kalor bahan bakar yang lebih rendah) dan biasanya memiliki dua penukar panas dan pembakar modulasi. Desainnya yang ringkas dan kemampuannya untuk menurunkan tagihan listrik menjadikannya pilihan yang ramah lingkungan untuk aplikasi industri. - Meskipun biaya pemasangan mungkin lebih tinggi (di pasar Eropa hanya sekitar 10%) daripada yang non-kondensasi, penghematan energi jangka panjang dan pengurangan emisi gas rumah kaca sering kali mengimbangi biaya ini. Perawatan rutin sangat penting karena kondensat asam yang dihasilkan
Efisiensi energi	Konversi ke energi termal terjadi pada efisiensi 101%-103%

Boiler Kondensasi Biomassa

Deskripsi teknologi	Boiler kondensasi biomassa adalah sistem pemanas efisiensi tinggi yang menggunakan bahan bakar biomassa terbarukan, seperti pelet atau serpihan kayu, untuk menghasilkan panas. Boiler ini beroperasi mirip dengan boiler kondensasi gas, menangkap panas dari proses pembakaran dan mengembunkan uap air dalam gas buang untuk mencapai efisiensi yang melebihi 100%. Meskipun biaya awalnya mungkin lebih tinggi daripada sistem tradisional (di pasar Eropa hanya sekitar 10%), penghematan jangka panjang dan manfaat keberlanjutan sering kali membenarkan investasi tersebut.
Efisiensi energi	- Efisiensi konversi sekitar 116% hingga 120%. - Namun, penting untuk mengklarifikasi bahwa efisiensi ini dapat sangat bervariasi tergantung pada jenis biomassa yang digunakan, karena bahan biomassa yang berbeda memiliki kadar air dan kepadatan energi yang berbeda. Nilai efisiensi yang disebutkan didasarkan pada nilai kalor bawah (LHV) serpihan kayu dengan kadar air 50%, yang memperhitungkan kandungan energi yang tersedia untuk pekerjaan yang bermanfaat.

TABEL 18 merangkum biaya, efisiensi dan kapasitas representatif dari teknologi yang dijelaskan, baik yang sedang dikembangkan maupun yang akan dikembangkan di masa mendatang yang digunakan untuk analisis LCOH.

TABEL 18. Ringkasan data keuangan dan teknis untuk pilihan teknologi pemanas di sektor industri

Variabel	Tahun	Pompa Kalor Suhu Sedang	Pompa Kalor Suhu Medium	Boiler Listrik	Boiler Biomass	Boiler batubara	Boiler Minyak	Boiler gas	Gas Cond.	Biomass Cond.
Investasi M\$2022 / MWth	2020	0,60	1,26	0,19	0,12	0,20	0,04	0,04	0,05	0,13
	2030	0,54	1,13	0,16	0,11	0,20	0,04	0,04	0,05	0,12
	2040	0,51	1,08	0,16	0,11	0,20	0,04	0,04	0,05	0,12
	2050	0,49	1,02	0,16	0,10	0,20	0,04	0,04	0,05	0,11
O&M Tetap 1000\$2022 /MWth/ year	2020	2,4	1,18	1,3	40,6	40,6	2,17	2,4	2,4	44,6
	2030	2,4	1,06	1,25	40,6	39,3	2,05	2,3	2,3	40,6
	2040	2,4	1,03	1,18	40,6	38,1	1,93	2,2	2,18	40,6
	2050	2,4	1,01	1,11	40,6	36,9	1,81	2,05	2,05	40,6
Variabel O&M \$2022 / MWth	2020	3,9	3,9	1,0	3,3	2,3	1,2	1,3	1,3	3,3
	2030	3,9	3,9	1,0	3,4	2,3	1,1	1,2	1,2	3,4
	2040	3,8	3,8	1,0	3,4	2,3	1,1	1,2	1,7	3,4
	2050	3,8	3,8	1,0	3,4	2,3	1,1	1,2	2,2	3,4
Efisiensi %	2020	383%	295%	98%	82%	86%	87%	87%	101%	116%
	2030	395%	305%	98%	82%	86%	87%	87%	103%	116%
	2040	403%	315%	98%	82%	86%	87%	87%	103%	116%
	2050	407%	320%	98%	82%	86%	87%	87%	103%	116%
Kapasitas MW		3	3	1,5	20	20	20	20	20	20

“

Sektor industri diharapkan menjadi elemen kunci dalam pertumbuhan ekonomi Indonesia, dan permintaan energi diperkirakan akan meningkat secara signifikan baik dalam jangka pendek maupun jangka panjang, sehingga upaya dekarbonisasi menjadi penting untuk memenuhi target yang dicanangkan untuk mencapai emisi nol bersih pada tahun 2060.

”

2.2 Analisis Biaya Panas yang Diratakan

Untuk membandingkan biaya berbagai teknologi pemanas, Biaya Panas yang Diratakan (LCOH) diterapkan karena memberikan ukuran komprehensif dari total biaya teknologi selama masa pakainya. Ini merupakan biaya rata-rata per unit panas yang dipasok. Perhitungan LCOH menggabungkan data keuangan dan teknis untuk setiap teknologi, termasuk asumsi tentang parameter operasional, biaya modal, dan harga bahan bakar. Komponen utama untuk perhitungan LCOH adalah:

Biaya Modal (Capital Costs -CAPEX):

- Investasi Awal: Ini termasuk biaya pembelian dan pemasangan teknologi pemanas, seperti peralatan, infrastruktur, dan modifikasi yang diperlukan pada sistem yang ada.
- Biaya Pembiayaan: Biaya yang terkait dengan perolehan modal, termasuk bunga dan pembayaran pinjaman, yang dipengaruhi oleh biaya modal (Weighted Average Cost of Capital, WACC).

Biaya Operasional dan Pemeliharaan (OPEX):

- O&M Tetap: Dinyatakan sebagai total biaya tahunan, yang tidak bergantung pada jumlah jam operasional. Mencakup biaya berkelanjutan untuk mengoperasikan teknologi, termasuk tenaga kerja, administrasi, dan pemeliharaan rutin.
- O&M Variabel: Dinyatakan sebagai biaya per unit panas yang dihasilkan. Mencakup biaya untuk perbaikan berkala, pemutakhiran, dan penggantian yang diperlukan untuk memastikan teknologi tetap berfungsi selama masa pakainya, yang bergantung pada jam operasional. Ini juga mencakup bahan pembantu seperti air, pelumas, atau aditif bahan bakar.

Biaya Bahan Bakar:

- Harga Bahan Bakar: Biaya bahan bakar yang digunakan untuk menghasilkan panas, yang dapat bervariasi berdasarkan kondisi pasar, jenis bahan bakar, dan harga regional.
- Konsumsi Bahan Bakar: Jumlah bahan bakar yang dibutuhkan untuk menghasilkan satu unit panas, yang memengaruhi biaya keseluruhan berdasarkan efisiensi bahan bakar.

Jam Operasional:

- Jumlah jam teknologi beroperasi setiap tahun, yang memengaruhi jumlah total panas yang dihasilkan dan distribusi biaya modal dan pengoperasian.

Masa pakai:

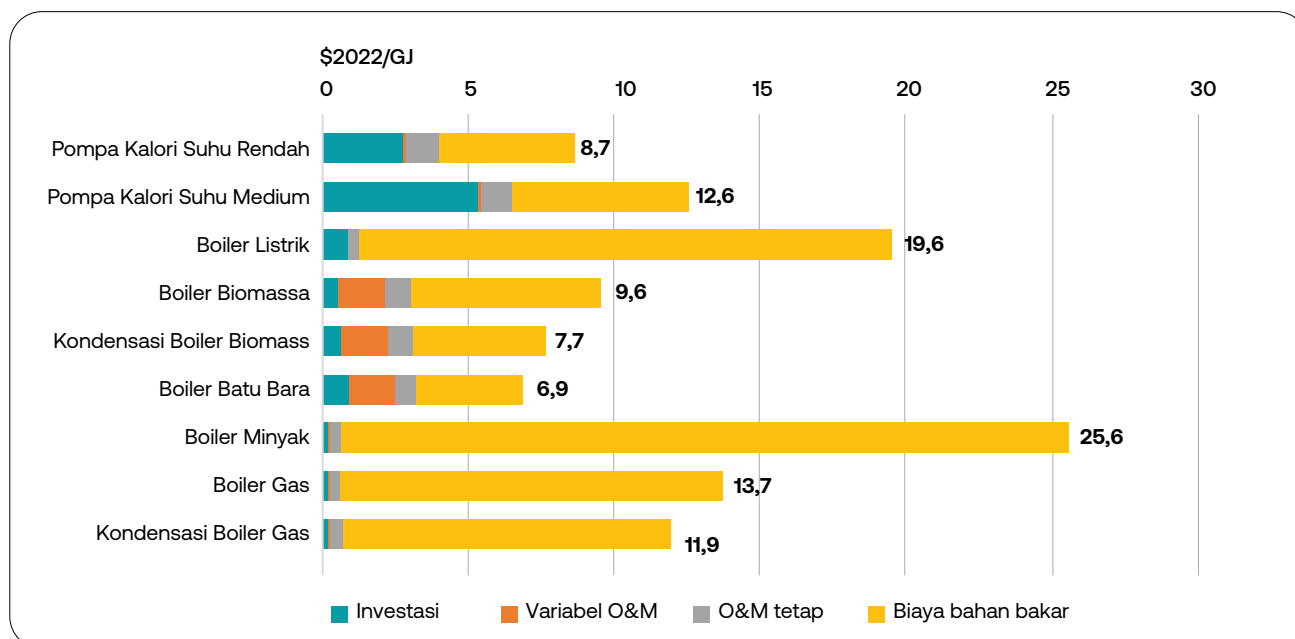
- Jumlah total tahun teknologi diharapkan beroperasi secara efektif, yang memengaruhi amortisasi biaya modal dari waktu ke waktu. Dapat didefinisikan sebagai masa pakai teknis maksimum, atau masa pakai ekonomis yang biasanya didasarkan pada periode penyusutan investasi.

CAPEX dan OPEX: Berdasarkan data yang diberikan pada Tabel 19.

- Umur Teknis: 20 tahun.
- Biaya Modal (WACC): 10% per tahun.
- Jam Operasional: 7.000 jam per tahun (di semua teknologi/peralatan yang dianalisis).
- Harga bahan bakar: Berdasarkan harga pasar rata-rata yang dibayarkan oleh sebagian besar konsumen industri per September 2024, yang tercantum dalam Tabel 20 dan dijelaskan di bagian berikutnya.

Perkiraan utama nilai LCOH untuk tingkat biaya saat ini dapat dilihat pada **Gambar 26**.

Gambar 24: Perbandingan biaya panas rata-rata antara pilihan teknologi untuk tingkat biaya saat ini



Boiler berbahan bakar batu bara memiliki LCOH terendah sebesar \$6,9/GJ, terutama karena rendahnya biaya batu bara. Boiler berbahan bakar gas, dengan harga \$13,7/GJ, dengan biaya bahan bakar sebagai faktor pendorong utama. Boiler berbahan bakar minyak adalah yang termahal sebesar \$25,6/GJ, dengan biaya bahan bakar yang mendominasi, sehingga kurang menarik.

Pompa kalor suhu rendah terlihat menawarkan biaya panas yang kompetitif sebesar \$8,7/GJ, terutama karena efisiensinya yang tinggi dan biaya O&M yang moderat. Namun, biaya investasi awal pompa kalor ini lebih tinggi. Penting untuk dicatat bahwa meskipun memiliki biaya investasi yang tinggi, pompa kalor suhu rendah sudah sama kompetitifnya dengan boiler batu bara dari perspektif LCOH. Pompa kalor suhu sedang harganya sedikit lebih mahal tetapi masih kompetitif dengan boiler gas konvensional. Di sisi lain, boiler listrik jauh lebih mahal, yakni \$19,6/GJ, sebagian besar disebabkan oleh tingginya biaya listrik, yang merupakan bagian utama dari biaya operasinya.

Boiler biomassa, dengan biaya panas rata-rata (LCOH) sebesar \$9,6/GJ, menghasilkan keseimbangan antara biaya bahan bakar dan biaya investasi. Penting untuk dicatat bahwa biaya boiler biomassa dapat sangat bervariasi tergantung pada jenis biomassa yang digunakan, sehingga memerlukan analisis sensitivitas.

Boiler kondensasi memiliki biaya yang jauh lebih rendah daripada boiler konvensional, yang menunjukkan bahwa biaya investasi tambahan lebih kecil dibandingkan dengan biaya bahan bakar yang lebih rendah. Namun, terdapat ketidakpastian yang tinggi mengenai biaya investasi dan potensi kinerja boiler kondensasi, karena boiler ini tidak umum digunakan di Indonesia, menurut para pemangku kepentingan. Nilai LCOH yang rendah bergantung pada biaya investasi tambahan yang memiliki ukuran relatif yang sama dengan yang terlihat di Eropa dan dijelaskan oleh (Danish Energy Agency, 2024).

Menjelang tahun 2050, LCOH pompa kalor diperkirakan akan turun sebesar 10–12%, mencapai 7,8 \$/GJ dan 11,0 \$/GJ untuk tipe suhu rendah dan sedang, sebagai hasil dari penurunan biaya dan peningkatan efisiensi, yang tidak diharapkan untuk teknologi lainnya. Perkembangan ini membuat biaya pompa kalor lebih rendah daripada boiler biomassa dan gas alam dalam jangka panjang, yang menunjukkan potensi penghematan yang dapat diperoleh melalui elektrifikasi.

Dalam analisis ini, diasumsikan harga listrik bersubsidi, hal ini memengaruhi daya saing teknologi listrik, sementara harga pasar gas alam memengaruhi profil biaya boiler gas. Konteks harga ini perlu diperhitungkan saat membandingkan teknologi ini.

2.3 Biaya Bahan Bakar

Harga bahan bakar merupakan masukan utama untuk estimasi LCOH dan harus dipertimbangkan secara cermat, tergantung pada tujuan penelitian. Harga bahan bakar yang digunakan dalam analisis ini mencerminkan tingkat harga saat ini untuk konsumen industri di Indonesia, yang belum tentu mencerminkan biaya sosial ekonomi bahan bakar secara keseluruhan. Berikut ini adalah ikhtisar data biaya bahan bakar yang telah digunakan dalam analisis ini.

Tabel 19. Ringkasan harga bahan bakar untuk pilihan teknologi pemanas di sektor industri. Harga yang dicetak tebal digunakan untuk estimasi utama LCOH. Harga didasarkan pada Nilai Pemanasan Rendah (Low Heating Value) bahan bakar.

BIOMASS	Harga [IDR2022/kg]	Kandungan energi [kcal/kg]	Harga [USD2022/GJ]
Pelet kayu	1.800	4.200	6,4
Cangkang Kelapa Sawit	1.650	3.825	6,4
Serpihan Kayu	1.450	4.075	5,3
Sekam Padi	610	3.200	2,8
GAS ALAM	Harga [USD2022/MMBtu]	Konversi [MMBtu _{LHV} /MWh _{LHV}]	Harga [USD2022/GJ]
Harga CNG yang ditetapkan	6	3,41	5,7
Harga pasar CNG	12	3,41	11,4
Harga LNG	18	3,41	17,1
DIESEL	Harga [IDR2022/L]	Kandungan energi [kWh/L]	Harga [USD2022/GJ]
Harga pasaran	13.400	10,70	21,7
BATUBARA	Harga [USD2022/ton]	kandungan energi [kcal/kg]	Harga [USD2022/GJ]
Referensi	125	6.322	4,7
HBA I	90	5.300	4,1
HBA II	55	4.100	3,2
HBA III	35	3.400	2,5
LISTRIK	Harga [Rp2022/kWh _{et}]	Konversi [GJ/MWh]	Harga [USD2022/GJ]
Tarif PLN (subsidi)	1.035	36	18,0
Tarif PLN (non-subsidi)	1.700	3,6	29,5

Batu Bara

Harga batu bara bervariasi berdasarkan kondisi pasar dan jenis batu bara biasanya dikategorikan berdasarkan nilai kalor serta sifat-sifat lain seperti kadar air, abu, dan sulfur. Di Indonesia, tersedia berbagai jenis batu bara. Analisis ini menggunakan harga resmi yang dipublikasikan dalam indeks Harga Batubara Acuan (HBA), yang digunakan untuk menentukan harga acuan batu bara berdasarkan kualitas dan kondisi pasar (Kementerian ESDM, 2024b). Analisis ini menggunakan harga per September 2024, tetapi indeks yang berbeda-beda tersebut stabil dan batu bara dengan nilai kalor rendah umumnya berfluktuasi lebih sedikit daripada jenis batu bara dengan nilai kalor tinggi yang diperdagangkan untuk ekspor.

Berbagai tingkatan ini digunakan tergantung pada kebutuhan energi dan pertimbangan biaya sektor industri, tetapi dalam konteks ini, diasumsikan bahwa jenis batubara HBAII dengan nilai kalor 4.100 kkal/kg adalah yang paling sering digunakan.

Gas Alam

Gas alam umumnya diangkut dan dikirim sebagai CNG (*Compressed Natural Gas*) atau LNG (*Liquefied Natural Gas*). CNG lebih murah dan utamanya diangkut melalui jaringan pipa, sehingga lebih cocok untuk penggunaan rumah tangga dan industri di wilayah yang memiliki jaringan pipa. LNG cenderung lebih mahal karena biaya tambahan yang terkait dengan proses pencairan, pengangkutan, dan regasifikasinya, dan harga pasar internasional untuk LNG cenderung berfluktuasi lebih tinggi.

Peraturan Presiden No. 121 Tahun 2020 mengubah peraturan sebelumnya tentang harga gas bumi di Indonesia yang menetapkan batas harga 6 USD/MMBtu untuk industri tertentu, termasuk pupuk, petrokimia, baja, keramik, dan lain-lain. Namun, hanya sebagian kecil industri yang benar-benar memenuhi syarat untuk harga yang ditetapkan.

Pelanggan yang menggunakan CNG dari jaringan listrik domestik membayar tarif yang ditetapkan oleh PGN tergantung pada ukuran sambungan dan penggunaan tahunan. Biaya untuk sebagian besar industri mendekati 12 USD/MMBtu, yang dianggap sebagai estimasi utama dalam analisis ini.

LNG merupakan pilihan bagi industri yang tidak memiliki akses ke jaringan gas utama, tetapi biayanya umumnya lebih tinggi dan sulit dinilai karena fluktuasi pasar. Harga pasar internasional untuk LNG di Asia telah mencapai serendah 6 USD/MMBtu pada September 2020 dan setinggi 24 USD/MMBtu pada Agustus 2022 (berdasarkan rata-rata bulanan untuk impor Jepang) (Bank Dunia, 2024). Untuk analisis ini, estimasi harga sebesar 18 USD/MMBtu digunakan berdasarkan harga rata-rata selama 2022-2024 serta memperhitungkan biaya regasifikasi.

Minyak

Oli Diesel Industri (Industrial Diesel Oil- IDO) digunakan secara luas di berbagai industri karena kinerjanya yang efektif pada mesin dan perkakas berat. IDO dicirikan sebagai bahan bakar diesel rendah sulfur, yang menghasilkan pembakaran yang lebih bersih. Hal ini menjadikannya pilihan yang lebih disukai di sektor-sektor seperti konstruksi, pertanian, dan manufaktur, yang mengutamakan efisiensi dan keandalan.

Hingga September 2024, harga bahan bakar solar termasuk IDO berada pada kisaran Rp13.250 per liter, meskipun ada fluktuasi berdasarkan perbedaan pasokan dan permintaan di setiap daerah (Pertamina, 2024).

Biomassa

Harga biomassa di Indonesia sangat bervariasi berdasarkan jenis biomassa, lokasi, dan faktor rantai pasokan. Sumber umum meliputi sisa-sisa pertanian (misalnya sekam padi, cangkang inti sawit) dan limbah kayu. Pelet kayu dan cangkang inti sawit (PKS) umumnya diperdagangkan secara internasional untuk ekspor, dan harga pasar tersedia, sedangkan sebagian besar jenis lainnya diperdagangkan di dalam negeri berdasarkan perjanjian bilateral. Transportasi dan ketersediaan musiman sangat memengaruhi biaya ini, yang sering kali membuat biomassa kurang dapat diandalkan dibandingkan dengan bahan bakar fosil.

Tren terkini menunjukkan peningkatan permintaan biomassa karena industri mencari solusi energi terbarukan, yang mendorong harga naik. Namun, rantai pasokan yang tidak konsisten tetap menjadi tantangan utama untuk mencapai harga yang stabil.

Harga yang diasumsikan didasarkan pada harga pasar terkini yang diharapkan dari pemasok lokal yang diperoleh sebagai bagian dari audit energi dan konsultasi ahli. Serpihan kayu diidentifikasi sebagai jenis biomassa yang paling umum digunakan untuk pemanasan proses dalam industri dan karenanya digunakan sebagai estimasi utama, tetapi analisis sensitivitas yang menyoroti dampak harga biomassa yang berbeda ditampilkan pada bagian berikutnya.

Listrik

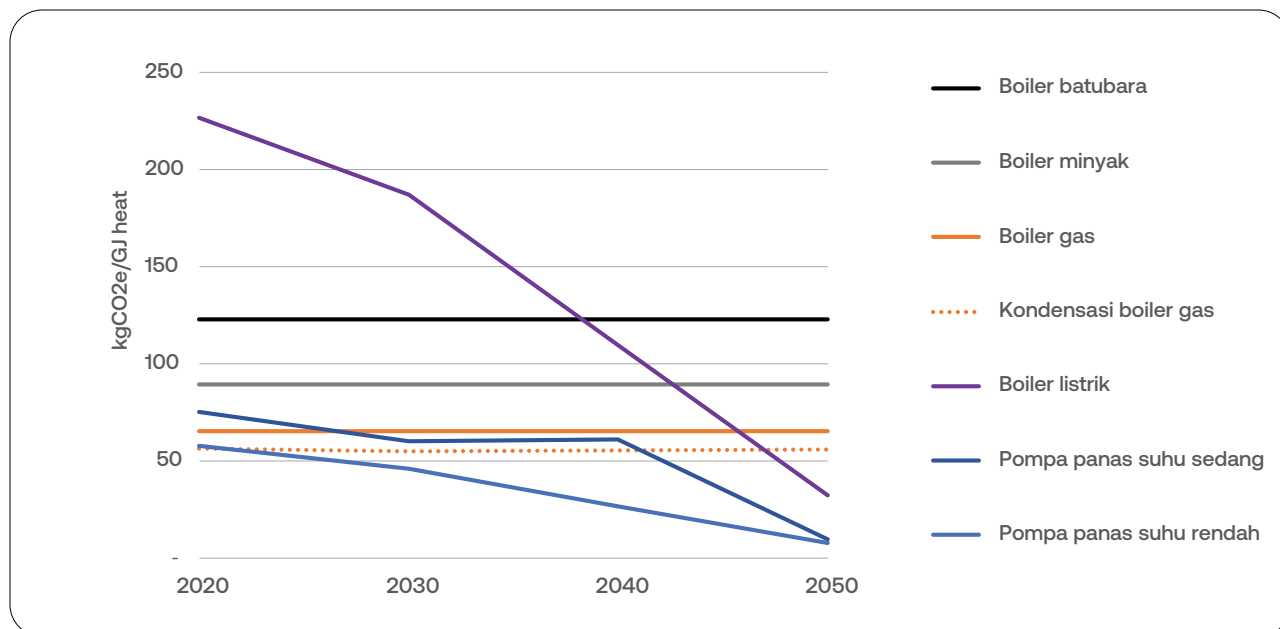
Sebagian besar pelanggan industri menerima tarif subsidi dari PLN, tergantung pada ukuran jaringan listrik. Tarif yang diberikan oleh PLN umumnya mencakup biaya pemakaian reguler, tetapi dapat juga mencakup biaya tambahan, seperti biaya yang timbul ketika penggunaan listrik melebihi 85% dari daya tersambung atau terkait dengan waktu penggunaan. Namun, dalam analisis ini, kami menggunakan tarif standar PLN dan tidak memasukkan biaya tambahan atau penyesuaian lainnya. Harga listrik tanpa subsidi didasarkan pada tarif resmi PLN untuk pelanggan industri serta tarif penuh tanpa subsidi yang mendekati biaya penuh pembangkitan listrik (PLN, 2024):

- Harga listrik bersubsidi Rp1.035/kWh
- Harga non subsidi Rp1.700/kWh

2.4 Proses Pemanasan: Data Emisi

Gambar 25 menunjukkan emisi CO₂-eq. per unit panas yang dihasilkan, yang ditentukan oleh efisiensi peralatan dan jenis bahan bakar yang digunakan.

Gambar 25. Emisi dari pilihan teknologi pemanasan proses per unit panas yang dihasilkan.



Analisis ini memperhitungkan faktor emisi dari pembakaran bahan bakar langsung dan emisi tidak langsung dari pembangkitan listrik, termasuk kerugian jaringan, untuk pompa panas dan boiler listrik. Asumsi emisi selaras dengan tujuan mencapai emisi nol bersih pada tahun 2060, dengan menggunakan asumsi pembangunan masa depan yang sama seperti pada bab transportasi (ICCT, 2023).

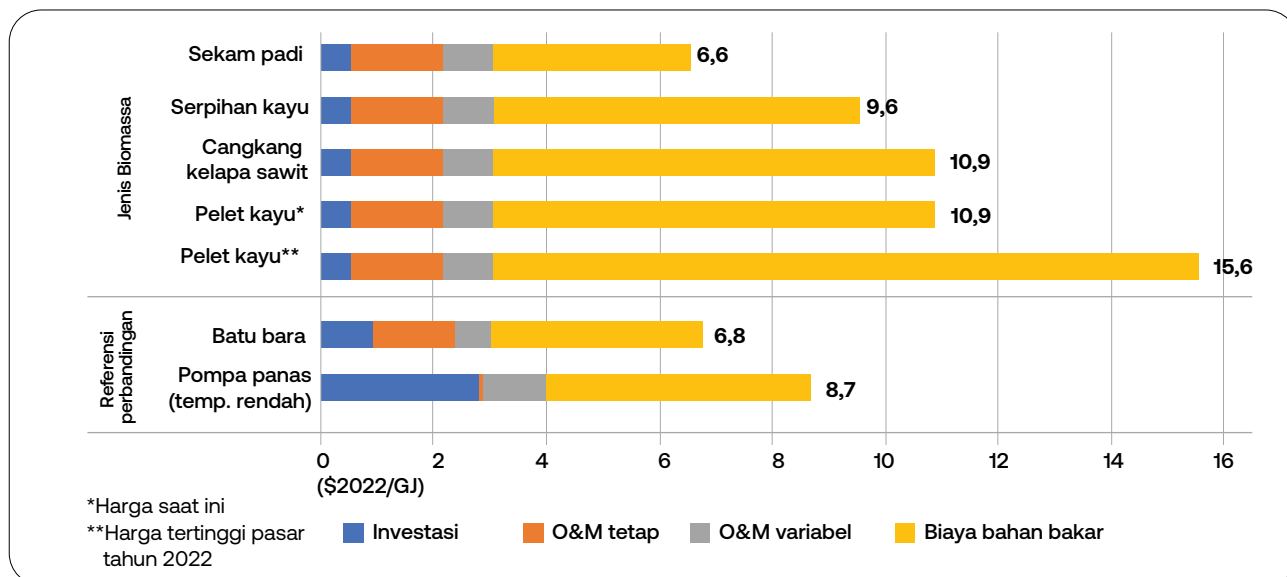
Untuk boiler konvensional, baik efisiensi maupun emisi tetap relatif konsisten karena kematangan teknologi dan sifat standar sumber bahan bakar. Sebaliknya, emisi dari teknologi pemanas listrik diperkirakan akan menurun seiring berjalannya waktu karena jaringan listrik sepenuhnya terdekarbonisasi pada tahun 2060. Pompa kalor, karena efisiensinya yang lebih tinggi, menghasilkan emisi CO₂ yang lebih rendah dibandingkan dengan boiler listrik, yang hanya mencapai emisi yang lebih rendah daripada bahan bakar fosil dalam jangka panjang.

Perlu dicatat bahwa hanya emisi dari pembakaran bahan bakar fosil yang disertakan dalam analisis; emisi hulu dari ekstraksi, pengolahan, kebocoran metana, dll., tidak dipertimbangkan. Biomassa diasumsikan bebas emisi, sebagaimana diperhitungkan dalam statistik resmi, dan emisi dari penggunaan lahan yang terkait dengan biomassa tidak disertakan.

2.5 Analisis Sensitivitas: biaya bahan bakar

Harga bahan bakar memiliki pengaruh yang kuat terhadap LCOH berbagai teknologi pemanas. Analisis sensitivitas terhadap harga gas dan biomassa dalam peralatan pemanas telah dilakukan karena gas dan biomassa berfungsi sebagai sumber energi yang signifikan untuk pemanas industri, sehingga penting untuk memahami bagaimana fluktuasi harga keduanya memengaruhi Biaya Pemanasan yang Diratakan.

Gambar 26. Dampak biaya biomassa terhadap LCOH dengan harga pasar



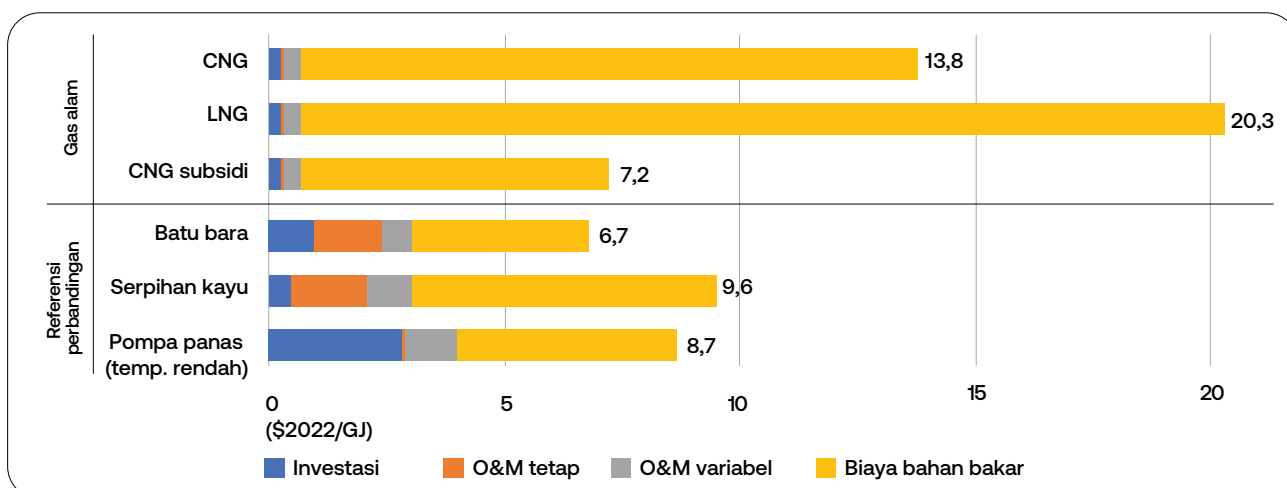
Biaya bahan bakar merupakan komponen terbesar dari Biaya Panas yang Diratakan (LCOH), sehingga evaluasinya menjadi krusial. Harga biomassa dapat berfluktuasi secara signifikan berdasarkan jenis biomassa dan kondisi pasar, yang pada gilirannya memengaruhi LCOH. Misalnya, harga dapat berkisar dari sekitar Rp 600/kg untuk limbah pertanian, seperti sekam padi, hingga sekitar Rp 2800/kg untuk pelet kayu di pasar internasional, terutama pada tingkat tinggi yang diamati pada akhir tahun 2022 untuk ekspor ke Korea Selatan dan Jepang.

Meskipun opsi biomassa yang lebih murah dapat membuat LCOH kompetitif, ketersediaannya sering kali terbatas dan biasanya memerlukan sumber daya lokal. Lebih jauh, diantisipasi bahwa harga biomassa akan naik di masa mendatang karena meningkatnya permintaan dan terbatasnya ketersediaan sumber daya. Persyaratan keberlanjutan yang lebih ketat juga dapat memengaruhi biaya ini.

Harga gas alam

Demikian pula, LCOH untuk boiler gas dapat sangat bervariasi tergantung pada sumber gasnya. Akses ke gas pipa bersubsidi, dengan harga \$6 per MMBtu, dapat menurunkan LCOH hingga serendah \$7 per GJ, sehingga membuatnya kompetitif dengan batu bara. Sebaliknya, penggunaan gas pipa tak bersubsidi atau gas alam cair (LNG) dapat menyebabkan biaya berkisar antara \$14 hingga \$20 per GJ, sehingga jauh lebih mahal daripada biomassa atau pompa panas. Hal ini menunjukkan bahwa kebijakan harga gas alam dapat menjadi pendorong atau penghalang penting bagi penerapan teknologi pemanas rendah emisi.

Gambar 27. Dampak biaya gas alam terhadap LCOH.



2.6 Analisis Sensitivitas

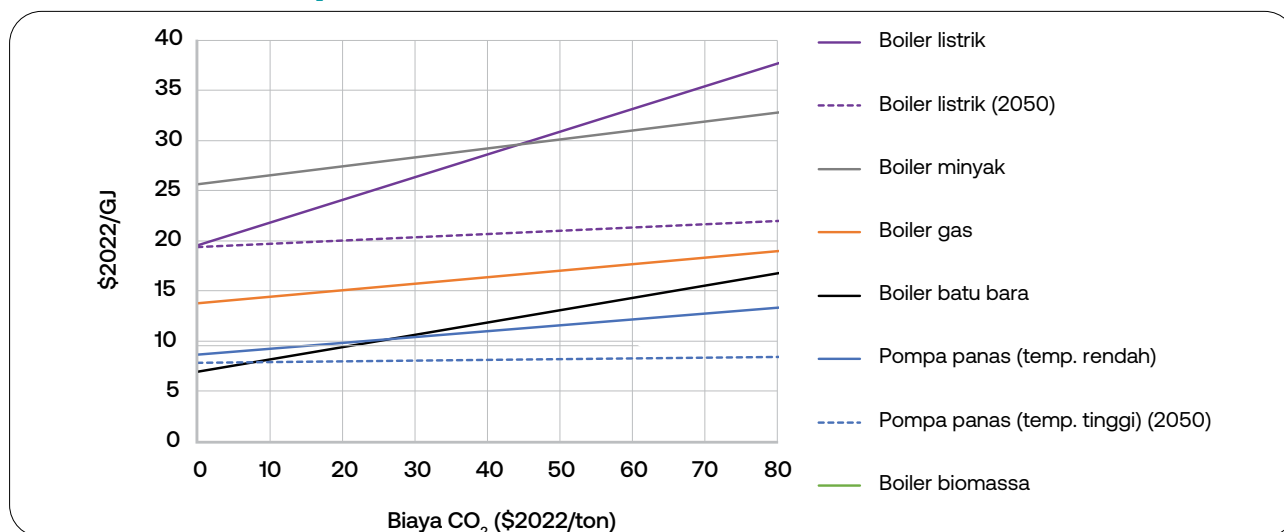
Potensi biaya emisi CO₂ dapat berdampak signifikan pada Biaya Panas yang Diratakan (LCOH) untuk berbagai teknologi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 29. Biaya CO₂, yang dapat mencerminkan potensi pajak karbon di masa mendatang atau skema perdagangan emisi atau sebagai proksi untuk jenis kebijakan lain yang bertujuan untuk mengurangi emisi.

Dengan biaya CO₂ yang melebihi \$15 per ton, boiler biomassa kondensasi dan pompa kalor menjadi kompetitif dengan boiler batu bara. Seiring dengan meningkatnya biaya CO₂, keunggulan kompetitif boiler batu bara dan gas semakin berkurang. Dengan pembangkitan listrik yang saat ini didasarkan pada bahan bakar fosil dalam jumlah besar, pompa kalor dan boiler listrik juga terdampak oleh biaya CO₂, tetapi pompa kalor suhu rendah masih kompetitif dengan batu bara dan gas karena efisiensinya yang tinggi. Namun, boiler listrik mengalami peningkatan biaya yang tajam karena faktor emisi yang tinggi.

Seiring berjalannya waktu, seiring dengan menurunnya intensitas emisi pembangkitan listrik, dampak biaya CO₂ pada LCOH boiler listrik dan pompa kalor juga akan menurun dan menjadi hampir tidak berarti dalam jangka panjang. Hal ini juga menunjukkan bahwa boiler listrik menjadi kompetitif terhadap boiler batu bara dan gas dalam jangka panjang ketika biaya CO₂ melebihi \$100 per ton.

Mengingat konsep umum pada perhitungan LCOH, dampak potensi biaya CO₂ menyoroti ketahanan pompa panas dan biomassa boiler terhadap boiler batubara dan gas, yang menunjukkan potensi dekarbonisasi pada tingkat biaya efektif.

Gambar 28. Dampak biaya CO₂ pada LCOH.



2.7 Pertimbangan dan Keterbatasan Lain dari Analisis

Analisis teknologi pemanas melibatkan beberapa pertimbangan penting yang melampaui perhitungan langsung Biaya Pemanasan yang Diratakan (LCOH). Meskipun LCOH berfungsi sebagai metrik yang berharga untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi dari berbagai opsi pemanas, LCOH tidak memperhitungkan berbagai faktor yang dapat memengaruhi pengambilan keputusan secara signifikan. Faktor-faktor ini mencakup biaya tertanam, biaya sistem, dan biaya sosial-ekonomi yang terkait dengan transisi energi. Dengan memeriksa elemen-elemen ini, pemahaman yang lebih komprehensif tentang implikasi ekonomi dari penerapan teknologi pemanas baru dapat dicapai.

- **Biaya hangus saat mengganti unit pemanas yang ada**

Analisis ini bertujuan untuk menentukan teknologi yang paling efektif saat memilih antara dua peralatan baru, dengan asumsi bahwa peralatan yang ada telah mencapai akhir masa pakai ekonomisnya. Namun, skenario ini tidak selalu mencerminkan kondisi dunia nyata. Untuk memfasilitasi transisi energi, mungkin perlu mengganti boiler yang masih beroperasi yang masih memiliki sisa masa pakai.

Misalnya, pertimbangkan kasus penggantian boiler batu bara yang sudah setengah jalan dari masa pakainya yang 20 tahun (setelah 10 tahun) dengan pompa kalor baru, yang juga memiliki masa pakai yang diharapkan 20 tahun. Biaya investasi tahunan boiler batu bara adalah \$1,0/GJ. Karena boiler akan segera dihentikan pemakaiannya, \$0,5/GJ dari biaya investasi tersebut harus ditambahkan ke investasi pompa kalor untuk 10 tahun pertama, atau \$0,25/GJ jika biaya tersebut didistribusikan selama seluruh masa pakai pompa kalor selama 20 tahun. Biaya yang dikeluarkan ini meningkatkan biaya pemanasan yang diratakan (LCOH) untuk pompa kalor, sehingga menghasilkan total biaya yang lebih tinggi per ton CO₂ yang dihindari.

Singkatnya, saat mengganti boiler batu bara yang masih memiliki sisa masa pakai, penting untuk mempertimbangkan penghentian awal boiler. Nilai sisa biaya investasi boiler batu bara harus diperlakukan sebagai biaya tetap dan diperhitungkan dalam perhitungan untuk menentukan biaya tambahan per ton CO₂ yang dihindari.

- **Sistem biaya**

Analisis LCOH memiliki beberapa keterbatasan. Analisis ini terutama berfokus pada biaya pembangkitan panas, mengabaikan investasi infrastruktur yang diperlukan untuk mengintegrasikan teknologi baru ke dalam sistem energi yang ada. Misalnya, transisi dari pemanas berbahan bakar fosil ke solusi terbarukan seperti pompa panas mungkin memerlukan peningkatan signifikan pada jaringan listrik, termasuk jaringan transmisi dan distribusi, untuk menangani peningkatan permintaan listrik. Namun, peningkatan jaringan ini pada umumnya diharapkan dapat dicakup dalam harga listrik, meskipun tarif saat ini, seperti tarif dari PLN, mungkin tidak sepenuhnya mencerminkan biaya ini karena kompensasi pemerintah yang sedang berlangsung.

Analisis ini juga tidak memperhitungkan biaya yang terkait dengan peningkatan koneksi jaringan di tingkat industri. Jika suatu bisnis perlu meningkatkan kapasitas koneksinya karena memasang pompa panas atau boiler listrik, hal ini dapat menimbulkan biaya tambahan, tergantung pada siapa yang menanggung biaya tersebut. Biaya ini dapat bervariasi berdasarkan kasus, seperti halnya pengisi daya kendaraan listrik rumah tangga yang mungkin memerlukan peningkatan pada sistem kelistrikan rumah, seperti yang terlihat dalam analisis lainnya.

Selain itu, analisis LCOH tidak mempertimbangkan biaya penyeimbangan dan penyimpanan solusi yang mungkin diperlukan saat mengandalkan sumber energi terbarukan yang dihasilkan sendiri secara berkala seperti angin atau matahari. Dalam kasus seperti itu, investasi tambahan dalam penyimpanan energi atau pembangkitan cadangan mungkin diperlukan untuk memastikan pasokan panas yang stabil. Biaya-biaya ini dapat secara signifikan memengaruhi kelayakan ekonomi keseluruhan sistem pompa panas tetapi tidak diperhitungkan dalam perhitungan LCOH, karena diasumsikan pasokan listrik tersedia dari jaringan PLN saat diperlukan.

Di sisi lain, analisis tersebut tidak sepenuhnya menangkap biaya sistemik yang terkait dengan infrastruktur gas. Jika jaringan pipa gas belum tersedia, harga bahan bakar yang digunakan dalam analisis mungkin tidak mencerminkan biaya penuh untuk membangun infrastruktur yang diperlukan, seperti jaringan pipa atau terminal penerima LNG (unit regasifikasi). Faktor-faktor ini dapat memengaruhi kelayakan ekonomi keseluruhan dari sistem pemanas berbasis gas dan terbarukan.

- **Biaya sosial ekonomi**

Lebih jauh lagi, analisis LCOH biasanya mengecualikan faktor eksternal seperti dampak lingkungan dan biaya sosial yang terkait dengan transisi energi. Meskipun LCOH merupakan metrik yang berguna untuk membandingkan biaya ekonomi langsung, evaluasi yang lebih komprehensif harus menyertakan pertimbangan yang lebih luas ini untuk memberikan gambaran lengkap tentang biaya dan manfaat berbagai teknologi pemanas.

Singkatnya, meskipun analisis LCOH merupakan alat yang berharga untuk menilai efektivitas biaya teknologi pemanas, namun cakupannya memiliki keterbatasan yang melekat. Pendekatan yang lebih holistik yang mencakup biaya sistem, investasi infrastruktur, dan eksternalitas sangat penting untuk pemahaman yang lengkap tentang implikasi ekonomi dari transisi ke teknologi pemanas baru.

2.8 Ringkasan

Berdasarkan analisis singkat mengenai berbagai pilihan teknologi di bagian sebelumnya, poin-poin berikut dapat diringkas:



- **Sektor industri di Indonesia bertanggung jawab atas sebagian besar permintaan energi dan emisi, dengan pemanasan proses yang merupakan kategori konsumsi terbesar.** Ada potensi signifikan untuk mengurangi emisi dan meningkatkan efisiensi energi menggunakan teknologi terkini, terutama untuk pemanasan suhu rendah dan sedang.



- **Elektrifikasi muncul sebagai alternatif yang layak untuk bahan bakar fosil di sektor-sektor seperti makanan dan minuman, tekstil, bahan kimia, dan industri manufaktur lainnya seperti karet dan plastik.**



- **Pompa panas suhu rendah sudah tersedia secara komersial dan kompetitif dalam hal biaya dan emisi,** menjadikannya alat penting untuk meningkatkan efisiensi energi dan menurunkan emisi.



- **Namun, elektrifikasi proses suhu tinggi (di atas 90 °C untuk air panas dan uap) saat ini memerlukan biaya lebih tinggi** daripada kebanyakan alternatif.



- **Meskipun demikian, perkembangan positif terlihat, menempatkan elektrifikasi sebagai strategi utama untuk dekarbonisasi** seiring perkembangan pembangkitan listrik menuju emisi nol bersih.



- **Meskipun pompa panas menawarkan penghematan biaya jangka panjang, namun memerlukan investasi awal yang lebih besar** dibandingkan dengan teknologi pemanas lainnya.



- **Boiler biomassa menghadirkan opsi berbiaya rendah untuk mencapai emisi nol,** namun terdapat ketidakpastian yang cukup besar seputar biaya dan ketersediaan bahan bakar.



- **Mungkin akan bermanfaat untuk memprioritaskan penggunaan biomassa untuk proses suhu tinggi dan industri khusus** yang memerlukan pembakaran langsung, daripada untuk permintaan suhu rendah dan menengah yang dapat dengan mudah dialiri listrik.



- **Untuk penggunaan biomassa dan gas alam yang berkelanjutan, hasil menunjukkan potensi yang signifikan dalam versi kondensasi boiler,** yang lebih efisien dan memiliki total biaya rata-rata yang lebih rendah, oleh karena itu akan bermanfaat untuk meningkatkan kesadaran dan ketersediaan teknologi ini secara lebih luas.



Sektor Bangunan Perumahan



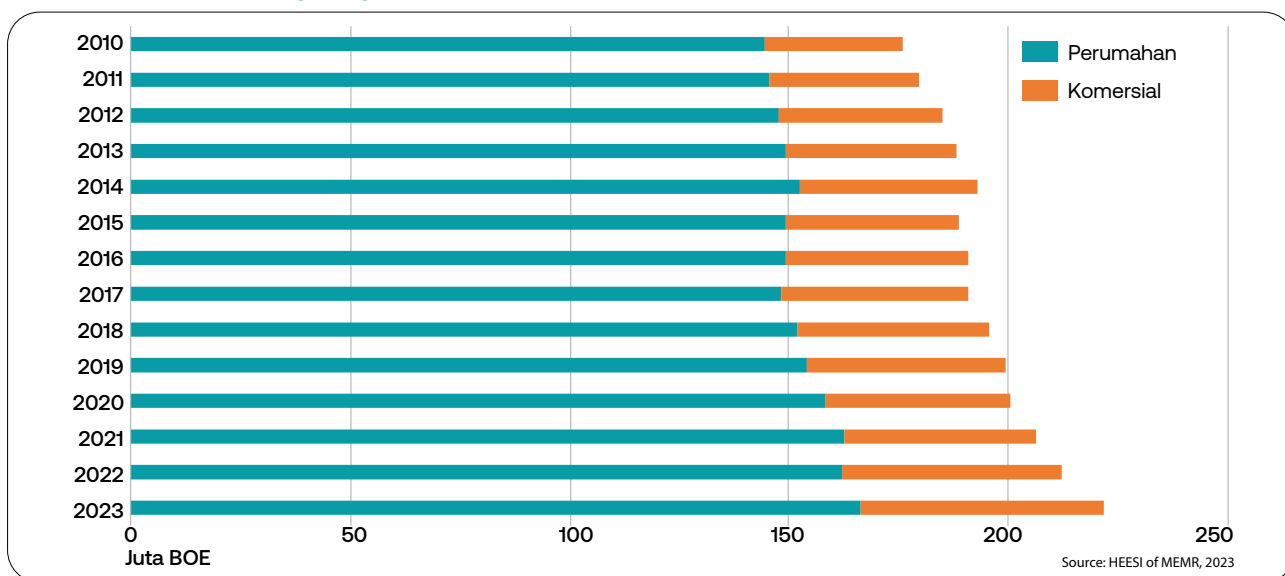
3. Sektor Bangunan Perumahan

Bagian ini bertujuan untuk memberikan informasi yang komprehensif guna membantu para pemangku kepentingan pembuat kebijakan memahami dan mengevaluasi berbagai teknologi untuk efisiensi energi, pengurangan emisi, dan kinerja ekonomi secara keseluruhan dari berbagai peralatan rumah tangga. Informasi regulasi dan kepatuhan seperti standar dan data sertifikasi telah dikecualikan karena tersedia secara luas di domain lain termasuk studi oleh CLASP. Dengan demikian, informasi terbaru dapat dikonsultasikan untuk pembaharuan lebih lanjut.

Bangunan Konsumsi Energi dan Emisi GRK

Sektor bangunan di Indonesia meliputi sektor perumahan dan komersial. Pada tahun 2022, kedua sektor ini menyumbang 18% dari total konsumsi energi final di Indonesia. Porsi ini bisa lebih tinggi jika bangunan di sektor industri juga disertakan.

Gambar 29. Konsumsi Energi Bangunan di Indonesia



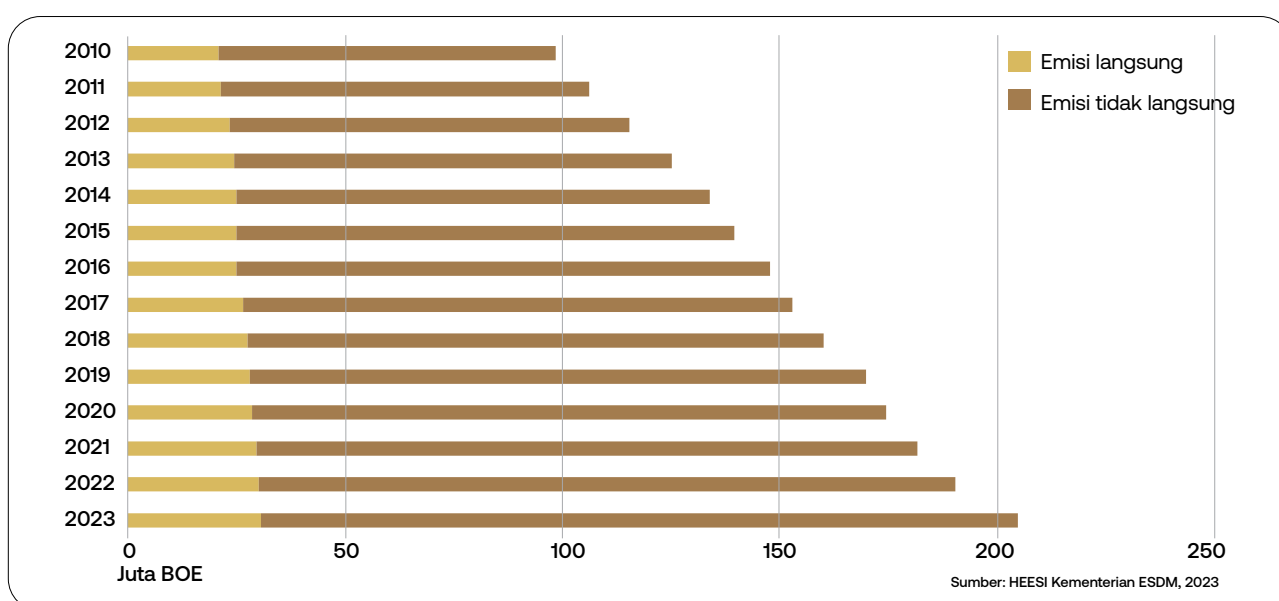
Listrik merupakan bentuk energi yang paling dominan digunakan di sektor bangunan. Listrik menyumbang 60% dari total konsumsi listrik pada tahun 2022 (Kementerian ESDM, 2023). Sektor penggunaan akhir yang paling banyak menggunakan energi adalah pendingin ruangan, penerangan, memasak, pemanas air, peralatan dan perkakas. Penggunaan listrik untuk memasak di rumah tangga Indonesia masih cukup kecil, kurang dari 1% (Statistik BPS, 2023) dibandingkan dengan bahan bakar lain yang lebih populer seperti LPG, gas alam, dan minyak tanah. Permintaan listrik di Indonesia telah tumbuh sebesar 5,8% per tahun antara tahun 2010 dan 2023, yang jauh lebih cepat daripada jenis energi lain yang digunakan di sektor bangunan (Kementerian ESDM, 2023).

Sejalan dengan meningkatnya PDB per kapita, IEA memperkirakan bahwa permintaan energi rumah tangga di negara-negara ASEAN termasuk Indonesia akan meningkat lebih dari tiga kali lipat, hingga mencapai 800 TWh pada tahun 2040. Porsi permintaan energi rumah tangga tersebut berdasarkan penggunaan akhir, dari yang tertinggi adalah peralatan rumah tangga 53%, pendingin ruangan 25%, memasak 13%, pemanas air 6%, dan pencahayaan 3%. Pendinginan ruang tumbuh paling cepat, sekitar tiga kali lipat pada tahun 2040 dibandingkan

dengan permintaan saat ini. Menurut studi Kementerian ESDM dan INDODEPP pada tahun 2022, total luas lantai bangunan diperkirakan akan tumbuh hingga 4% pada awalnya kemudian secara bertahap menurun hingga 2% pada tahun 2050. Oleh karena itu, kebutuhan akan pendingin ruangan di iklim panas dan lembab seperti Indonesia akan meningkat dan mendorong lebih banyak permintaan energi untuk pendinginan.

Lebih jauh lagi, bangunan bertanggung jawab atas sejumlah besar emisi gas rumah kaca (GRK). Emisi GRK dari kegiatan pembangunan di Indonesia tumbuh pada tingkat 5,6% per tahun atau dari 99 juta ton pada tahun 2010 menjadi 205 juta ton CO₂ eq. pada tahun 2023. Emisi GRK per unit energi yang dikonsumsi di sektor bangunan meningkat dari 0,56 ton CO₂/BOE pada tahun 2010 menjadi 0,92 ton CO₂/BOE pada tahun 2023. Peningkatan efisiensi energi bangunan akan secara langsung mengurangi jumlah energi yang dibutuhkan, yang dapat menurunkan emisi gas rumah kaca, terutama jika energi tersebut berasal dari sumber yang lebih bersih. Peningkatan efisiensi energi merupakan strategi utama dalam mengurangi dampak lingkungan dari bangunan dan memitigasi perubahan iklim.

Gambar 30. Emisi Gas Rumah Kaca (GRK) Bangunan



Di sektor bangunan, menggabungkan teknologi peralatan bangunan canggih dengan kebijakan Standar Kinerja Energi Minimum (SKEM) memungkinkan pendekatan komprehensif untuk mencapai emisi nol bersih. SKEM menyediakan alat untuk mengukur, memverifikasi, dan mengoptimalkan kinerja energi, memastikan bahwa adopsi peralatan dan sistem hemat energi memberikan manfaat yang diharapkan. Dengan mengintegrasikan teknologi dan strategi ini, bangunan dapat secara signifikan mengurangi konsumsi energi dan jejak karbon, bergerak menuju target emisi nol bersih secara efektif. Kementerian ESDM telah menerbitkan peraturan tentang SKEM untuk peralatan dan perlengkapan umum pada tahun 2021 (Peraturan Menteri ESDM No. 14/2021 tentang Penerapan Standar Kinerja Energi Minimum Untuk Peralatan Pemanfaat Energi) dan turunannya pada peralatan tertentu seperti, LED, kipas angin listrik, AC, penanak nasi, dan lemari es antara tahun 2021 dan 2023. Produsen harus memastikan produk ini memenuhi MEPS sebelum dapat dijual di pasar Indonesia.

Sejumlah peralatan dan perlengkapan bangunan dengan berbagai tingkat teknologi, efisiensi energi, biaya, intensitas energi, dan potensi pengurangan emisi disajikan di bagian berikutnya dari bab ini. Peralatan yang direpresentasikan dalam analisis ini adalah peralatan yang merupakan bagian tertinggi dari konsumsi energi di rumah tangga dengan kontribusi gabungan lebih dari 90% dari konsumsi listrik dari perkiraan kisaran 42 peralatan listrik di rumah tangga menurut Survei Penggunaan Akhir Perumahan CLASP 2020 Indonesia. Peralatan tersebut yaitu; penanak nasi, lemari es, televisi, AC, kompor, lampu, dan pemanas air. Tujuan dari bab ini adalah untuk memberikan wawasan data efisiensi energi untuk peralatan yang diidentifikasi ini dan opsi dalam layanan energi, data biaya, dan membandingkan biaya siklus hidup dan biaya pengurangan GRK dalam skenario bisnis seperti biasa dibandingkan dengan skenario NZE di mana revisi SKEM diterapkan.

Asumsi Biaya dan Emisi GRK

Sejumlah asumsi dibuat untuk analisis biaya dan emisi GRK. Asumsi ini berlaku untuk semua peralatan yang disajikan dalam bab ini untuk sektor bangunan. Asumsi umum adalah sebagai berikut:

- Harga peralatan rumah tangga pada umumnya diambil dari pasar daring Indonesia, misalnya Tokopedia, Shopee, dan lain-lain.
- Data operasional peralatan rumah tangga seperti frekuensi penggunaan, masa pakai, konsumsi energi, dan lain-lain mengacu pada hasil survei CLASP 2019.
- Menggunakan Indeks Harga Konsumen (IHK) untuk mendapatkan harga riil dari harga nominal peralatan rumah tangga dan listrik.
- Harga listrik diproyeksikan akan meningkat pada tingkat 3,6% per tahun berdasarkan data historis.
- Menurut Mark Ellis et. al. (2007), harga riil peralatan listrik telah menurun 15 – 40% dari tahun dasar selama dua puluh tahun. Oleh karena itu, pengurangan harga sekitar 30% diasumsikan untuk skenario Tanpa SKEM dan pengurangan harga 20% untuk skenario SKEM adalah nilai yang wajar untuk proyeksi harga riil peralatan rumah tangga di sektor bangunan di masa mendatang.
- Metode Faktor Pemulihan Biaya diterapkan untuk menghitung harga tahunan guna memperoleh biaya modal menggunakan tingkat diskonto 10% dan rentang umur peralatan yang berbeda.
- Faktor emisi GRK jaringan diambil dari laporan studi ICCT tahun 2023. Laporan tersebut menunjukkan bahwa faktor emisi GRK Indonesia akan menurun dari 0,773 pada tahun 2022 menjadi 0,114 kg CO₂ eq/kWh pada tahun 2050.
- Skenario Emisi Nol Bersih pada tahun 2060 di sektor energi telah digunakan dalam analisis ini sebagai ilustrasi. Oleh karena itu, angka hasil aktual dari analisis ini didasarkan pada asumsi dasar skenario ini.

3.1 Pencahayaan

Data teknologi dan efisiensi energi

Sistem pencahayaan bangunan di Indonesia masih mengandalkan lampu pijar, CFL, dan LED. Berdasarkan survei CLASP tentang pencahayaan rumah tangga tahun 2019, 57% rumah tangga sudah menggunakan LED. Sisanya masih menggunakan lampu CFL (41%) dan pijar (7%). Diperkirakan teknologi lampu seperti pijar dan CFL dapat segera disingkirkan dari pasaran dalam waktu dekat. Laporan survei CLASP yang sama juga menyebutkan bahwa rata-rata jam operasional pencahayaan sekitar 7,4 jam sehari dalam satu tahun.

Tingkat efisiensi lampu ditunjukkan dengan nilai efikasi. Nilai efikasi memberikan informasi tentang berapa banyak lumen cahaya yang dipancarkan per satuan watt listrik. Lampu LED menawarkan masa pakai operasional yang panjang dan sangat hemat energi. Efikasi LED baru terus meningkat, perlu mencapai sekitar 140 lm/W pada tahun 2030 untuk menyelaraskan dengan Skenario Net Zero, yang akan menjadi sekitar 30% lebih tinggi dari rata-rata tahun 2022. Indonesia telah menerapkan kebijakan SKEM pada pencahayaan, khususnya pada LED (Kementerian ESDM, 2021 dan 2022). Nilai SKEM yang telah ditetapkan untuk LED tidak kurang dari 80 lumen/watt. Tabel 2 menunjukkan perbandingan efisiensi energi lampu LED jika dibandingkan dengan lampu CFL dan lampu pijar. Lampu LED 87 – 90% lebih efisien daripada lampu pijar dan 45 – 55% lebih ekonomis daripada lampu CFL.

Tabel 20. Perbandingan daya listrik antara LED, CFL dan pijar berdasarkan tingkat pencahayaan yang sama

Iluminasi (lumen)	LED (watt)	Lampu pijar (watt)	CFL (watt)
450	4 – 5	40	9 – 13
1.100	9 – 13	75	18 – 25
2.600	25 – 28	150	30 – 55

Sumber: BPPT, 2012

Di masa mendatang, biaya operasional LED diperkirakan akan turun signifikan karena tren teknologi terkini dalam teknologi pencahayaan seperti internet of things, pencahayaan nirkabel, dan lain sebagainya (Realty, 2023)²⁴.

Ada beberapa teknologi yang berpotensi menggantikan LED di masa mendatang. Salah satu teknologi yang menjanjikan tersebut adalah pencahayaan perangkat laser (LD). Meskipun teknologi ini menawarkan beberapa keuntungan yang sangat menarik, teknologi ini juga memiliki tantangan. Pencahayaan laser saat ini masih dalam tahap penelitian dan pengembangan dan dua kali lebih efisien daripada LED. Pencahayaan laser juga lebih ringkas dan membutuhkan lebih sedikit bahan untuk diproduksi.

Data biaya pencahayaan dan emisi

Harga lampu LED mengalami penurunan harga yang cepat secara global. Selama sekitar sepuluh tahun, harga lampu LED di AS telah turun hingga 93%. Jika difokuskan pada Eropa, harga lampu LED terarah telah turun hingga 80-90% selama lima tahun terakhir (CLASP, 2016).

Informasi mengenai biaya berbagai teknologi pencahayaan sangat penting bagi konsumen saat memutuskan teknologi mana yang akan dibeli untuk pencahayaan rumah mereka. Ada sejumlah parameter yang harus diperhitungkan saat membandingkan berbagai teknologi seperti biaya awal atau biaya modal, konsumsi energi, masa pakai, biaya perawatan, dan juga emisi GRK.

Tabel 21. Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi pencahayaan

Jenis lampu	Perkiraan Fluks Cahaya (lumen)	Wattage (watt)	Umur (jam)	Harga Satuan Tipikal (Rp)	Biaya Modal (Rp)
Pijar	800	60	1.200	15.000	33.763
FL	800	14	8.000	35.000	14.231
CFL	800	14	9.000	35.000	12.863
LED	800	8	20.000	30.000	5.926

Jenis lampu	Konsumsi Energi Tahunan (kWh)	Biaya energi (Rp. 1,445/ kWh) ²⁵ (Rp)	Annual Total Cost (Rp)	Total Biaya Tahunan (Rp/ kWh)	Emisi GRK Tahunan ²⁶ (kg CO ₂ eq.) (kg of CO ₂ eq.)
Pijar	162,06	234.177	267.940	1.653	142,13
FL	37,81	54.641	68.872	1.822	33,16
CFL	37,81	54.641	67.504	1.785	33,16
LED	21,61	31.224	37.150	1.719	18,95

Jenis Lampu	Penghematan Biaya Tahunan ²⁷ (Rp)	Penghematan Emisi GRK Tahunan (kg of CO ₂ eq.)	Biaya Pengurangan GRK (IDR/kg CO ₂ eq.)
Pijar	-	-	-
FL	199.068	108,97	-1.516,98
CFL	200.436	108,97	-1.529,53
LED	230.790	123,18	-1.599,50

²⁴ Tersedia di: <https://reality.economictimes.indiatimes.com>

²⁵ Tarif listrik PLN

²⁶ Faktor emisi jaringan listrik Jawa-Bali: 0,877 kg CO₂/kWh; Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan – Kementerian ESDM (2018)

²⁷ Dibandingkan dengan lampu pijar

Tabel 21 menunjukkan perbandingan biaya tahunan dan emisi GRK di antara berbagai teknologi lampu di pasaran untuk fluks cahaya yang sama. Untuk tingkat lumen dan waktu pengoperasian yang sama, LED dapat menghemat 86% dan CFL menghemat 77% energi dibandingkan dengan lampu pijar. Karena lebih efisien, penggunaan lampu LED 8 watt akan memberikan penghematan energi sebesar 140,45 kWh dan total penghematan biaya sebesar Rp 230.790 dibandingkan dengan lampu pijar. Bahkan, total biaya per kWh lampu LED saat ini merupakan yang terendah dibandingkan dengan jenis lampu lainnya kecuali lampu pijar.

Biaya siklus hidup pencahayaan (LCC) dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) SKEM

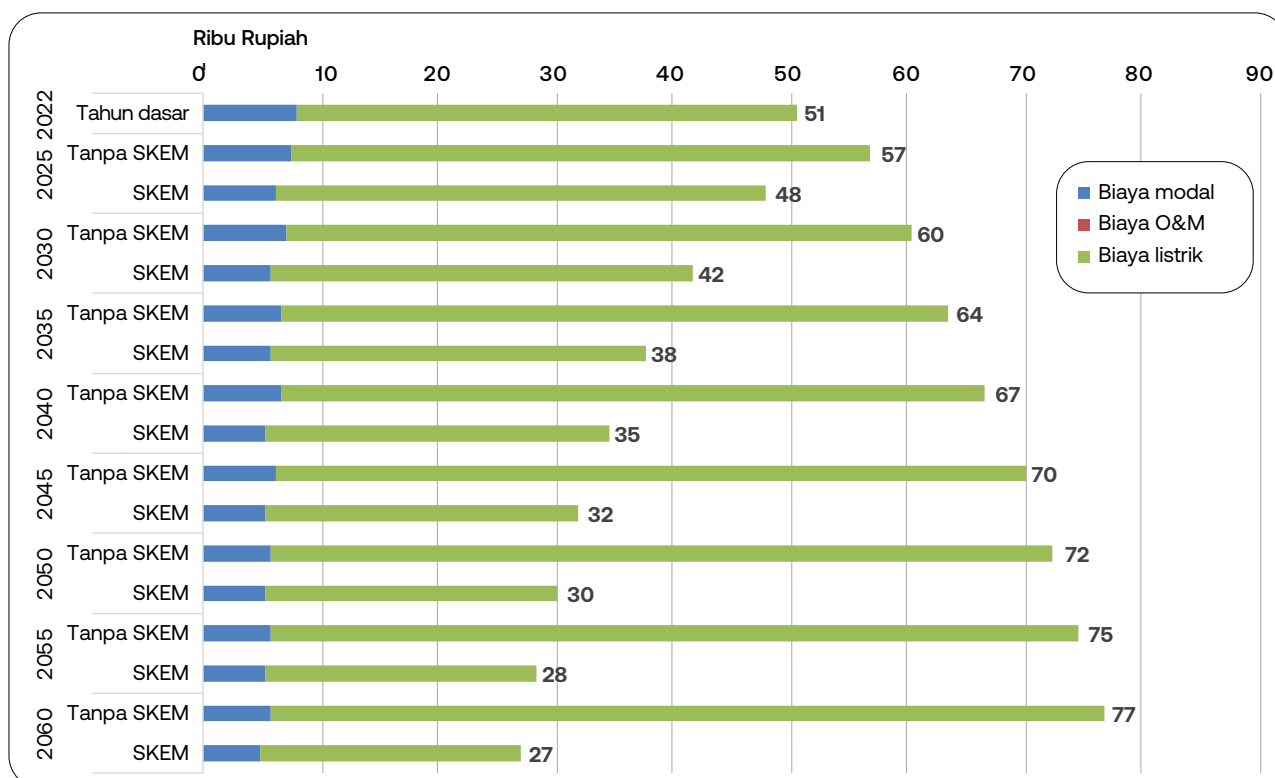
Analisis Biaya Siklus Hidup (LCC) dari implementasi program Standar Kinerja Energi Minimum (SKEM) melibatkan evaluasi total biaya penerapan dan pemeliharaan langkah-langkah hemat energi dan membandingkannya dengan manfaat yang diperoleh. Tujuannya adalah untuk menentukan cara yang paling hemat biaya untuk mematuhi SKEM sekaligus memaksimalkan penghematan energi dan nilai keseluruhan. Meningkatkan efisiensi energi pencahayaan melalui program SKEM dapat secara signifikan mengurangi konsumsi energi, menurunkan biaya operasional, dan berkontribusi pada keberlanjutan lingkungan dan mencapai target Emisi Nol Bersih.

Tabel 22. Asumsi Pencahayaan LED SKEM

Tahun	2022 (tahun dasar)	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
Efikasi SKEM (lm/watt)	80	94	118	142	165	189	213	236	260
Indeks Efisiensi Energi	1	1,18	1,47	1,77	2,07	2,36	2,66	2,95	3,25
Konsumsi Energi Maksimum	1	0,85	0,68	0,57	0,48	0,42	0,38	0,34	0,31

Dengan asumsi bahwa SKEM untuk pencahayaan akan direvisi setiap 5 tahun, **Gambar 31** menunjukkan asumsi kinerja energi minimum dibandingkan dengan tahun dasar 2022. Artinya, konsumsi energi maksimum pada tahun 2060 harus sebesar 31% dari konsumsi energi pada tahun 2022 atau dapat dikatakan bahwa efisiensi energi minimum pada tahun 2060 harus 225% lebih efisien daripada tahun 2022.

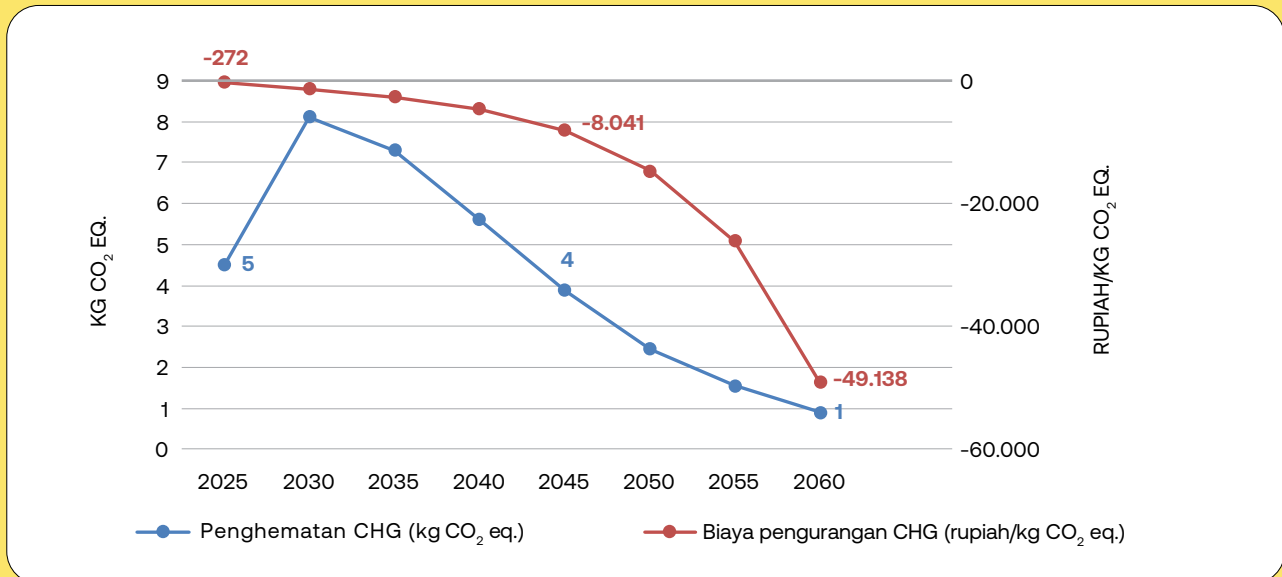
Gambar 31. Biaya siklus hidup (LCC) pencahayaan berdasarkan skenario (Tanpa SKEM vs. SKEM (biaya riil))²⁸



²⁸ Berdasarkan target NZE Indonesia oleh Kementerian ESDM

Menurut sebuah studi yang dipublikasikan dalam prosiding Studi Musim Panas ECEEE, terdapat korelasi antara harga peralatan, konsumsi energi, dan implementasi SKEM (Ellis et. al., 2007). Studi tersebut menggarisbawahi bahwa harga peralatan rumah tangga dan konsumsi energi riil menurun seiring diperkenalkannya SKEM baru ke pasar. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 33, total biaya pencahayaan riil di bawah SKEM akan menjadi 65% lebih rendah dibandingkan dengan total biaya riil di bawah skenario Tanpa SKEM pada tahun 2060 karena penghematan energi yang signifikan dari pencahayaan yang efisien meskipun biaya modal revisi SKEM lebih tinggi daripada skenario Tanpa SKEM.

Gambar 32. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) dari SKEM untuk pencahayaan



Gambar 32 menunjukkan Penghematan dan Biaya Pengurangan GRK akibat penerapan SKEM pada lampu. Biaya pengurangan GRK negatif karena biaya modal rendah dan efisiensi energi tinggi yang menghasilkan penghematan biaya besar (lihat Gambar 34). Penghematan GRK masih meningkat hingga tahun 2025 tetapi kemudian secara bertahap menurun karena faktor emisi GRK yang menurun.

Menurut sebuah studi yang diterbitkan dalam prosiding Studi Musim Panas ECEEE, ada korelasi antara harga peralatan, konsumsi energi, dan implementasi SKEM.

3.2 Pendingin Udara

Data Teknologi pendingin udara dan data efisiensi energi

Dalam Rencana Umum Energi Nasional (RUEN) pemerintah telah menargetkan efisiensi energi nasional sebesar 17,4% pada tahun 2025 dan 38,9% pada tahun 2050 dibandingkan dengan Skenario *Business as Usual* (Kementerian ESDM, 2017). Namun, untuk mencapai target efisiensi energi tersebut bukanlah hal yang mudah. Ada sejumlah tantangan yang harus dihadapi pemerintah. Salah satunya adalah tingginya permintaan konsumen terhadap pendingin ruangan (AC). AC merupakan alat terbaik untuk mendinginkan ruangan dalam gedung, terutama di iklim panas dan lembap seperti Indonesia.

Biaya awal dan operasional AC masih cukup mahal bagi sebagian besar keluarga Indonesia. Jadi, penetrasi AC di Indonesia masih rendah. Menurut survei CLASP 2019, hanya 5% keluarga yang memiliki AC. Kepemilikan AC yang dimiliki oleh sebuah keluarga di Indonesia hanya 1,15 unit. Rata-rata penggunaan AC tahunan di Indonesia adalah sekitar 7,2 jam per hari. Pemerintah Indonesia telah mengatur tingkat penggunaan energi pada AC dengan menerbitkan peraturan SKEM pada tahun 2021 di mana SKEM untuk AC harus memiliki nilai CSPF (*Cooling Seasonal Performance Factor*) minimal 3,4.

Performa AC sangat ditentukan oleh daya listrik AC yang dibutuhkan dan kapasitas pendinginannya. Tingkat performa AC berbeda-beda berdasarkan nilai EER (Efisiensi energi Ratio) yang tertera pada kemasan atau buku petunjuk AC. Semakin tinggi nilai EER atau CSPF, semakin hemat energi AC tersebut.

Data biaya dan emisi AC

Tabel 23 menyajikan data biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi AC. Deskripsi teknologi AC dapat ditemukan dalam studi CLASP yang disebutkan sebelumnya. Sementara tabel di bawah ini dapat dilihat untuk tujuan perbandingan biaya dan data emisi.

Tabel 23. Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi AC

Tipe AC	Daya (PK)	Kapasitas Pendinginan (Btu/jam)	Umur (tahun)	Harga Satuan Tipikal (Rp)	Biaya Modal (Rp)	Biaya O&M ^{a)}
AC Standar	½	5000	(IDR)	2.500.000	406.863	250.000
AC Daya Rendah	½	5000	10	3.000.000	488.236	300.000
AC Inverter	½	5000	12	3.500.000	513.672	350.000

Tipe AC	Konsumsi Energi Tahunan ^{b)} (kWh)	Biaya energi (Rp. 1.445/ kWh) (Rp)	Total Biaya Tahunan (Rp)	Total Biaya Tahunan (Rp/ kWh)	Emisi GRK tahunan ^{c)} (kg of CO ₂ eq.)
AC Standar	4.927,5	7.120.238	7.777.101	1.578	4.321,42
AC Daya Rendah	4.003,6	5.785.202	6.573.438	1.642	3.511,16
AC Inverter	3.175,5	4.588.598	5.452.270	1.717	2.784,91

Tipe AC	Penghematan Biaya Tahunan ^{d)} (Rp)	Penghematan Emisi GRK Tahunan ^{d)} (kg of CO ₂ eq.)	Biaya Pengurangan GRK ^{d)} (Rp/kg of CO ₂ eq.)
AC Standar	-	-	-
AC Daya Rendah	1.203.663	810,26	-983,39
AC Inverter	2.324.831	1.536,51	-1.248,26

Sumber:

a) Diasumsikan 10% dari harga satuan

b) Berdasarkan Manjula Siriwardhana, et. al., 2017 and <https://www.berapawatt.com/jenis-jenis-ac-tips-memilih-yang-hemat-listrik>

c) Java-Bali power grid's emission factor: 0.877 kg CO₂/kWh; Directorate General of Electricity – MEMR (2018)

d) Dibandingkan dengan Standar AC

Biaya siklus hidup AC (LCC) dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) SKEM

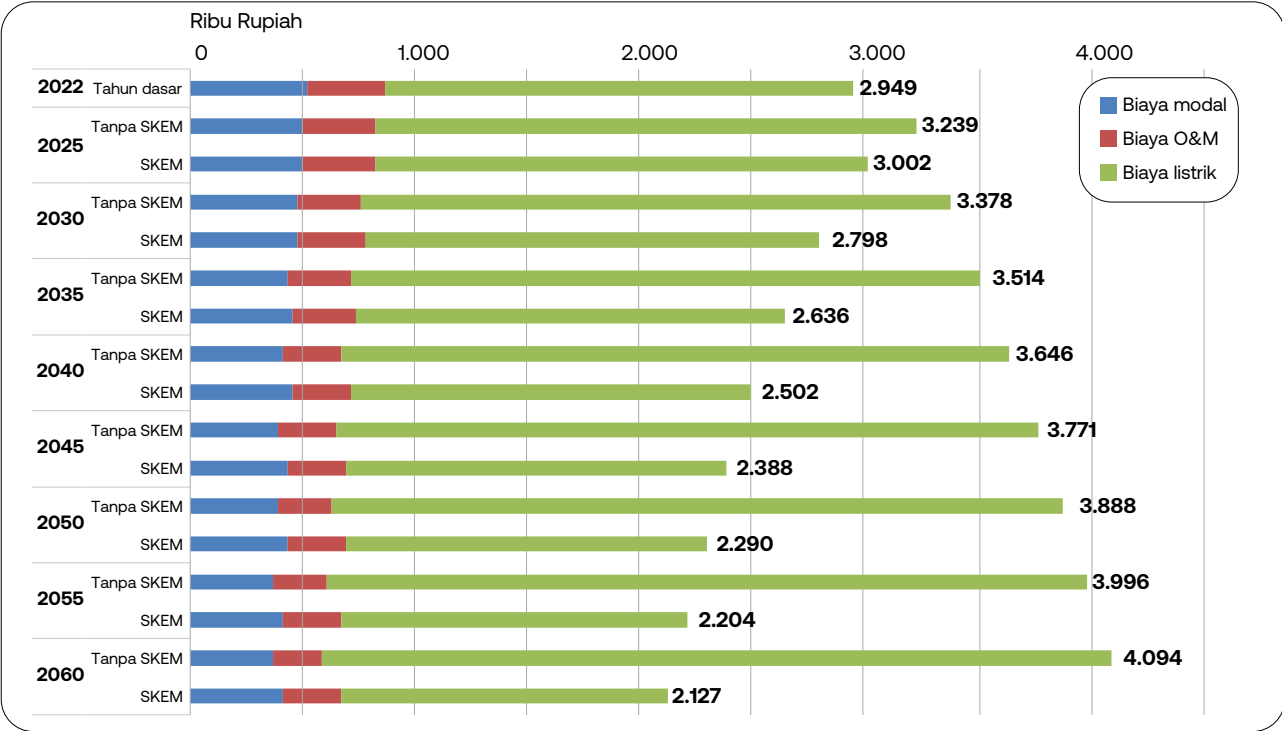
Dengan asumsi bahwa SKEM untuk AC akan direvisi setiap 5 tahun, **Tabel 24** menunjukkan asumsi kinerja energi minimum dibandingkan dengan tahun dasar 2022. Menurut analisis ini, konsumsi energi maksimum pada tahun 2060 harus sebesar 41% dari konsumsi energi pada tahun 2022, sehingga efisiensi energi minimum pada tahun 2060 harus 141% lebih efisien daripada tahun 2022.

Tabel 24. Asumsi SKEM AC inverter

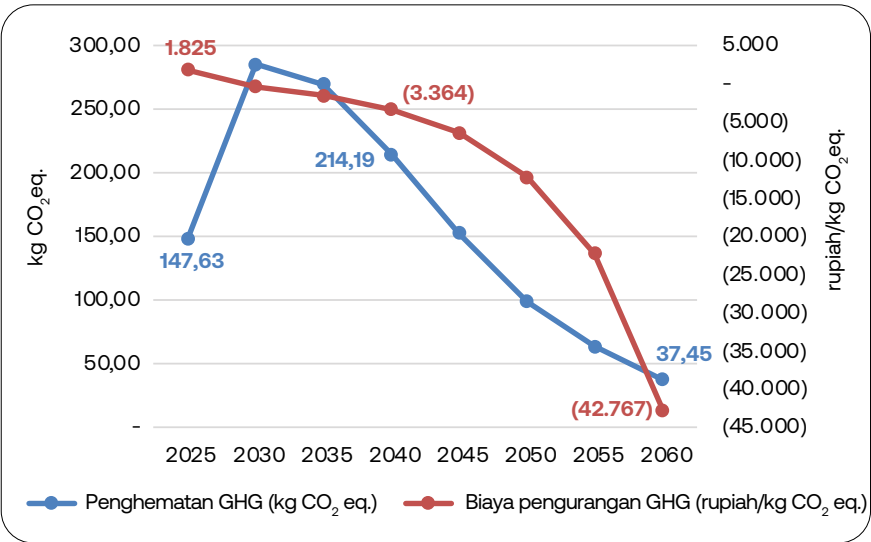
Tahun	2022 (Tahun dasar)	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
MEPS CSPF	3,73	4,15	4,84	5,53	6,23	6,2	7,61	8,31	9,00
Efisiensi energi Index	1	1,11	1,30	1,48	1,67	1,85	2,04	2,23	2,41
Konsumsi Energi Maksimum	1	0,90	0,77	0,67	0,60	0,54	0,49	0,45	0,41

Note: Based on Indonesia NZE targets by MEMR

Gambar 33. Biaya siklus hidup (LCC) AC berdasarkan skenario (Tanpa SKEM vs. SKEM (biaya riil))



Gambar 34. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca dari AC SKEM



Total biaya AC dalam skenario SKEM akan menjadi 48% lebih rendah daripada dalam skenario tanpa SKEM pada tahun 2060. Hal ini juga memberikan nilai negatif dari biaya pengurangan emisi GRK untuk adopsi AC hemat energi (lihat Gambar 36). Di sini kita juga mengamati penurunan GRK karena faktor emisi GRK yang menurun.

3.3 Televisi

Teknologi Televisi dan Data Energi Efisiensi

Pengaruh televisi terhadap keluarga Indonesia tampak sangat menyatu dalam kehidupan sehari-hari masyarakat. Data survei CLASP tahun 2019 menunjukkan bahwa sekitar 93% rumah tangga di Indonesia memiliki televisi. Kepemilikan per rumah tangga adalah 1,07 unit TV. Rata-rata penggunaan per tahun adalah 6,5 jam per hari. Kebiasaan masyarakat Indonesia yang gemar menonton TV dan masih tingginya penggunaan teknologi TV CRT yang boros energi menjadikan TV sebagai salah satu peralatan rumah tangga yang cukup banyak mengonsumsi energi. Sebagian besar responden (80%) menggunakan televisi dengan watt antara 30 hingga 100 W.

Data biaya dan emisi televisi

Tabel 25 menyajikan data biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi TV. Deskripsi teknologi TV dapat ditemukan dalam studi CLASP yang disebutkan sebelumnya. Sementara tabel di bawah ini dapat dilihat untuk tujuan perbandingan biaya dan data emisi.

Tabel 25. Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi TV

Jenis TV	Umur(jam)	Harga Satuan Tipikal (Rp)	Biaya Modal (Rp)
CRT TV 24 inci	30.000	1.350.000	192.757
LED TV 42 inci	60.000	2.500.000	274.659
Plasma TV 42 inci	50.000	8.000.000	923.969
QLED TV 42 inci	70.000	7.000.000	744.743
OLED TV 42 inci	60.000	13.000.000	1.428.229

Jenis TV	Konsumsi energi tahunan (kWh)	Biaya energi (Rp. 1,445/kWh) (Rp)	Total biaya tahunan (Rp)	Total biaya tahunan (Rp/kWh)	Emisi GRK Tahunan ²⁹ (kg of CO ₂ eq.)
CRT TV 21 inci	240,90	348.101	540.858	2.245	211,27
LED TV 42 inci	135,23	195.411	470.070	3.476	118,60
Plasma TV 42 inci	481,80	696.201	1.620.170	3.363	422,54
QLED TV 42 inci	192,72	278.480	1.023.223	5.309	169,02
OLED TV 42 inci	168,63	243.670	1.671.899	9.915	147,89

Jenis TV	Penghematan Biaya Tahunan ³⁰ (Rp)	Penghematan Emisi GRK Tahunan ^{b)} (kg of CO ₂ eq.)	Biaya Pengurangan GRK (Rp/kg CO ₂ eq.)
CRT TV 21 inci	-	-	-
LED TV 42 inci	70.788	92,67	1.316,16
Plasma TV 42 inci	-	-	-
QLED TV 42 inci	-	42,25	15.979,22
OLED TV 42 inci	-	63,38	20.886,68

²⁹ Faktor emisi jaringan listrik Jawa-Bali: 0,877 kg CO₂/kWh; Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan – KESDM (2018)

³⁰ Compared to CRT TV

Biaya siklus hidup televisi (LCC) dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca SKEM

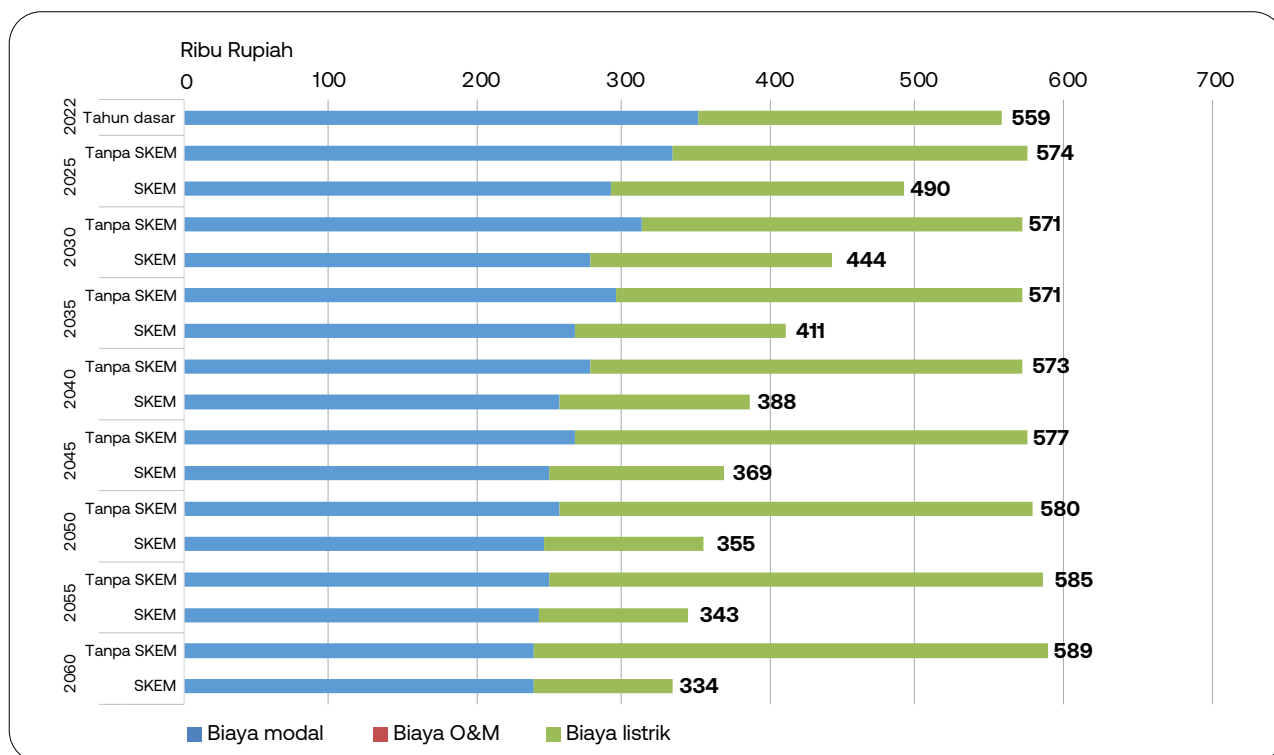
Tabel 26. Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi TV menunjukkan asumsi kinerja energi minimum dibandingkan dengan tahun dasar 2022. Di sini, konsumsi energi maksimum pada tahun 2060 harus sebesar 27% dari konsumsi energi pada tahun 2022. Untuk mencapai hal ini, efisiensi energi minimum pada tahun 2060 harus 266% lebih efisien daripada tahun 2022.

Tabel 26. Asumsi SKEM televisi LED

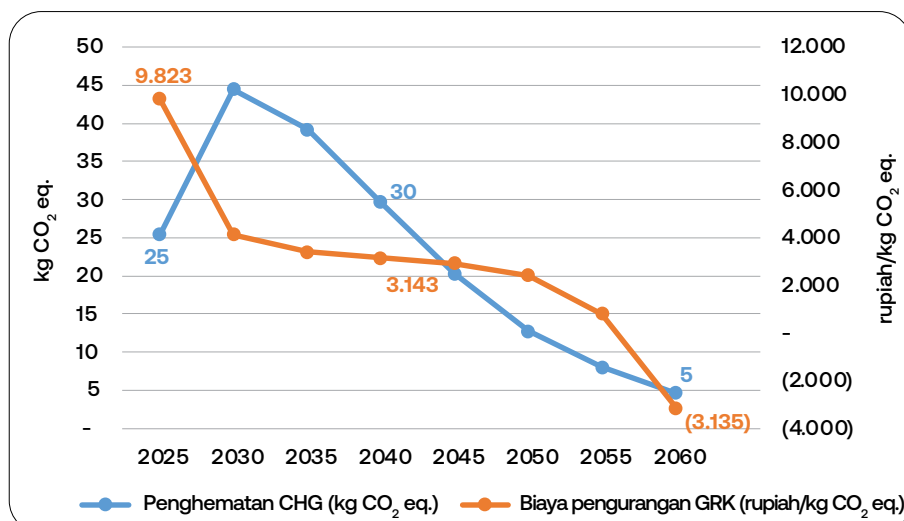
Tahun	2022 (Tahun dasar)	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
Daya Aktif SKEM (watt)	38,11	34,03	30,49	23,10	18,59	15,49	13,33	11,69	10,40
Efisiensi energi Index	1	1,12	1,25	1,65	2,05	2,46	2,86	3,26	3,66
Konsumsi Energi Maksimum	1	0,89	0,80	0,61	0,49	0,41	0,35	0,31	0,27

Note: berdasarkan target NZE Indonesia oleh Kementerian ESDM

Gambar 35. Biaya siklus hidup (LCC) televisi berdasarkan skenario Tanpa SKEM dan SKEM (biaya riil)



Gambar 36. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca melalui SKEM televisi



Analisis biaya pengurangan emisi GRK untuk televisi memiliki hasil yang berbeda dibandingkan dengan lampu atau AC. Biaya modal televisi tinggi tetapi penghematan listrik atau biaya tidak cukup besar untuk mengimbangi biaya modal. Hal ini memberikan nilai positif biaya pengurangan GRK untuk televisi.

3.4 Lemari pendingin

Data Teknologi kulkas dan data efisiensi energi

Kulkas merupakan peralatan rumah tangga yang sudah menjadi bagian dari gaya hidup, terutama di daerah perkotaan. Konsumsi listrik kulkas di sektor rumah tangga rata-rata berada di urutan kedua setelah AC apabila rumah tangga tersebut memiliki unit AC. Apabila tidak ada unit AC, kulkas umumnya merupakan peralatan rumah tangga yang paling banyak mengonsumsi energi, yakni mencapai konsumsi listrik sebesar 6,4 – 29,61% dari total kebutuhan listrik rumah tangga

Data biaya dan emisi kulkas

Tabel 27 menyajikan data biaya dan emisi GRK dari teknologi lemari es utama. Uraian teknologi dapat ditemukan dalam studi CLASP yang disebutkan sebelumnya. Sementara tabel di bawah ini dapat dilihat untuk tujuan perbandingan biaya dan data emisi.

Tabel 27. Data biaya dan emisi GRK dari teknologi utama lemari es

Jenis Kulkas	Volume (liter)	Umur (tahun)	Harga Satuan Tipikal (Rp)	Biaya Modal (Rp)
Non Inverter	200	10	2.500.000	406.803
Inverter	200	14	3.500.000	475.112

Jenis Kulkas	Annual Energy Consumption ³¹ (kWh)	Energy Cost (Rp. 1,445/kWh) (IDR)	Annual Total Cost (IDR)	Annual Total Cost (IDR/kWh)	Annual GHG Emission ^{b)} (kg of CO ₂ eq.)
Non Inverter	200,75	290.084	696.887	3.471	176,06
Inverter	146,00	210.970	686.082	4.699	128,04

Jenis Kulkas	Penghematan Biaya Tahunan ^{c)} (Rp)	Penghematan Emisi GRK Tahunan ^{c)} (kg of CO ₂ eq.)	Biaya Pengurangan GRK ³² (Rp/kg CO ₂ eq.)
Non Inverter	-	-	-
Inverter	10.805	48,02	8.246,52

Biaya siklus hidup kulkas (LCC) dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) SKEM

Tabel 28 menunjukkan asumsi kinerja energi minimum dibandingkan dengan tahun dasar 2022. Analisis menunjukkan bahwa konsumsi energi maksimum pada tahun 2060 harus sebesar 49% dari konsumsi energi pada tahun 2022 atau dapat dikatakan bahwa efisiensi energi minimum pada tahun 2060 harus 103% lebih efisien daripada tahun 2022.

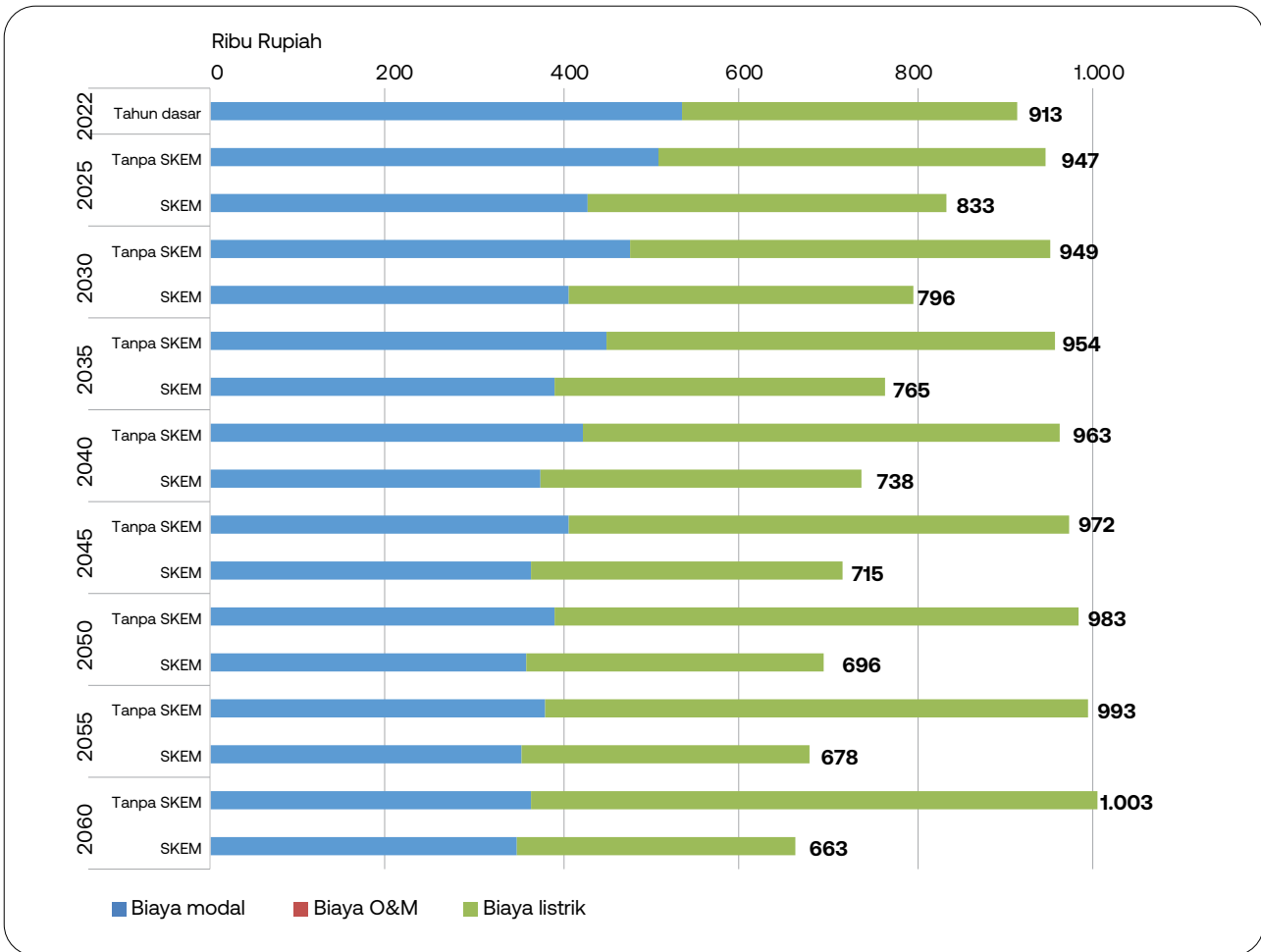
Tabel 28. Asumsi kulkas inverter SKEM

Tahun	2022 (tahun dasar)	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
SKEM Konsumsi Energi (kWh/ tahun)	246	228	202	182	165	152	140	130	121
Efisiensi energi Index	1	1,08	1,22	1,35	1,49	1,62	1,76	1,89	2,03
Konsumsi Energi Maksimum	1	0,92	0,82	0,74	0,67	0,62	0,57	0,53	0,49

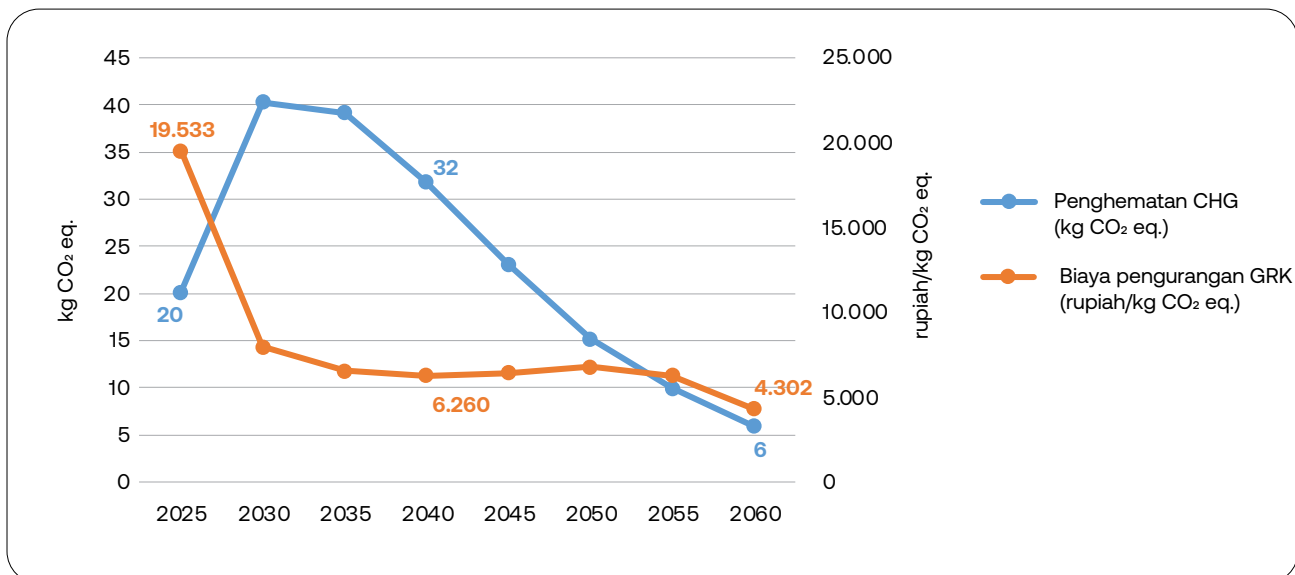
Catatan: Berdasarkan target NZE Indonesia oleh Kementerian ESDM

³¹ Appliance 101 Available at: <https://101appliance.com/inverter-vs-non-inverter-refrigerator-is-it-worth-it/>
³² Compared to non-inverter refrigerator

Gambar 37. Biaya Siklus Hidup (LCC) Kulkas Berdasarkan Skenario Tanpa SKEM dan SKEM (Biaya riil)



Gambar 38. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca dari SKEM kulkas



Mirip dengan televisi, **Gambar 41** biaya pengurangan emisi GRK dari lemari es bernilai positif hingga tahun 2060. Penghematan biaya operasional masih lebih rendah daripada biaya modal lemari es inverter.

3.5 Penanak Nasi

Data Teknologi penanak nasi dan data efisiensi energi

Berdasarkan hasil survei CLASP tahun 2019, mayoritas responden memiliki penanak nasi dengan daya antara 300 hingga 350 W (55%). Sebagian besar unit memiliki kapasitas beras kering 1 hingga 2 L (88%). Sebagian besar responden menggunakan perbandingan beras dan air 1:1 atau 1:2 (69%). Sebagian rumah tangga masih menggunakan kukusan untuk menanak nasi. Berdasarkan survei CLASP ini, penetrasi penanak nasi baru 69% dengan kepemilikan per rumah tangga sebanyak 1,01 unit. Rata-rata jam penggunaan per hari adalah 6 (enam) jam dengan sekitar 4,5 jam digunakan untuk memanaskan nasi.

Ada banyak jenis penanak nasi listrik di pasaran, masing-masing dengan serangkaian fitur sendiri. Elemen pemanas adalah komponen utama penanak nasi yang mengubah listrik menjadi panas yang memasak nasi. Meskipun ada berbagai istilah pemasaran untuk teknologi pemanas, semua teknologi pemanas dapat dikategorikan sebagai jenis "Resistensi Listrik" dan jenis "Induksi".

Data biaya dan emisi penanak nasi

Tabel 29 menyajikan data biaya dan emisi GRK dari teknologi penanak nasi utama. Uraian teknologi dapat ditemukan dalam studi CLASP yang disebutkan sebelumnya. Sementara tabel di bawah ini dapat dikonsultasikan untuk tujuan perbandingan mengenai biaya dan data emisi. Penanak nasi tipe induksi mengeluarkan emisi GRK yang lebih tinggi, dan masih lebih mahal. Penanak nasi tipe ini belum memberikan penghematan energi, biaya, atau GRK dibandingkan dengan penanak nasi tipe resistansi listrik. Keunggulan penanak nasi induksi hanya membuat nasi yang dimasak lebih pulen dan karenanya lebih disukai oleh konsumen.

Tabel 29. Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi penanak nasi

Jenis penanak nasi	Kapasitas (liter)	Watt kompor/ penghangat (watt)	Umur (tahun)	Harga Satuan Tipikal (Rp)	Biaya Modal (Rp)
Resistensi Listrik	1,8	350/30	5	300.000	79.139
Induksi	1,8	1000/30	5	1.000.000	263.797

Jenis penanak nasi	Konsumsi Energi Tahunan (kWh) ³³	Biaya energi (Rp. 1,445/kWh) (IDR)	Total Biaya Tahunan (Rp)	Total Biaya Tahunan (Rp/kWh)	Total Emisi tahunan ^{b)} (kg of CO ₂ eq.)
Resistensi Listrik	240,90	348.101	427.240	1.665	211,27
Induksi	323,02	466.771	730.568	2.261	283,29

Biaya siklus hidup penanak nasi (LCC) dan biaya pengurangan GRK SKEM

Untuk penanak nasi, konsumsi energi maksimum pada tahun 2060 diharapkan sebesar 58% dari konsumsi energi pada tahun 2022. Dengan demikian, untuk mencapainya, efisiensi energi minimum pada tahun 2060 diharapkan sebesar 72% lebih efisien daripada tahun 2022.

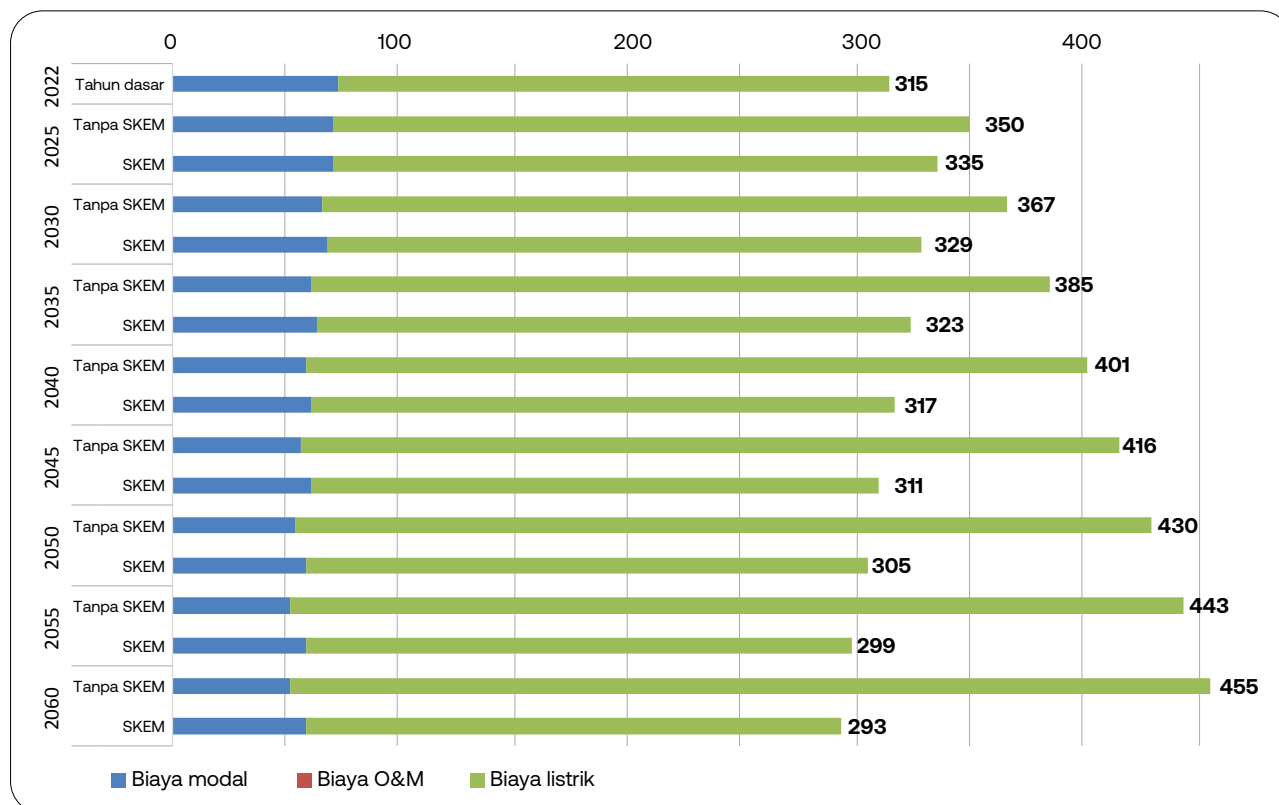
Tabel 30. Asumsi resistansi listrik penanak nasi SKEM

Tahun	2022 (tahun dasar)	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
SKEM Konsumsi Energi (kWh/ tahun)	147	139	128	118	110	102	96	90	85
Efisiensi energi Index	1	1,06	1,15	1,25	1,34	1,44	1,53	1,62	1,72
Konsumsi Energi Maksimum	1	0,95	0,87	0,80	0,75	0,70	0,65	0,62	0,58

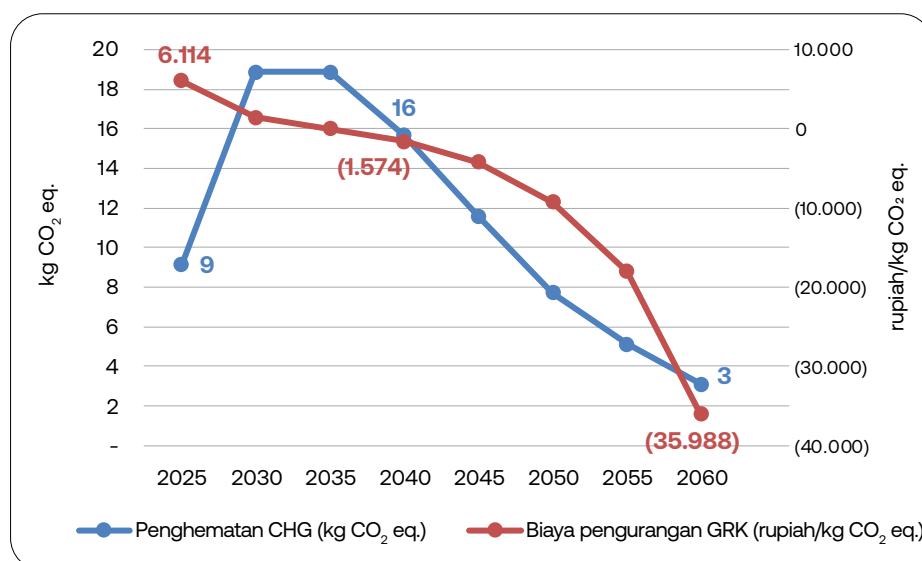
Catatan: Berdasarkan target NZE Indonesia oleh Kementerian ESDM

³³ Waktu memasak dengan induksi 50% lebih sedikit dari resistansi listrik

Gambar 39. Biaya siklus hidup (LCC) penanak nasi berdasarkan skenario Tanpa SKEM dan SKEM (biaya riil)



Gambar 40. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca dari penanak nasi SKEM



Jika efisiensi energi penanak nasi tahan listrik ditingkatkan, penghematan listrik penanak nasi akan lebih tinggi dibandingkan dengan skenario Tanpa SKEM. Karena itu, biaya pengurangan GRK penanak nasi, yang awalnya positif, secara bertahap akan berubah menjadi negatif hingga tahun 2060.

3.6 Kompor

Teknologi kompor dan data efisiensi energi

Teknologi memasak di Indonesia mencerminkan perpaduan praktik tradisional dan modern, yang memanfaatkan berbagai sumber energi. Minyak tanah, gas kota, LPG, biomassa, dan arang masih banyak digunakan, sementara metode memasak listrik dan induktif semakin umum digunakan, terutama di lingkungan perkotaan. Penerapan solusi energi terbarukan masih terus berkembang, yang menunjukkan adanya potensi pergeseran ke arah praktik memasak yang lebih berkelanjutan.

LPG (liquefied petroleum gas) merupakan sumber energi utama untuk memasak di Indonesia, khususnya untuk keperluan rumah tangga dan komersial di daerah perkotaan. LPG dan gas kota merupakan komponen penting dari lanskap energi memasak di Indonesia, yang didukung oleh kebijakan pemerintah dan meningkatnya permintaan baik di rumah tangga maupun bisnis. Sifat pembakarannya yang lebih bersih menjadikannya alternatif penting untuk bahan bakar memasak tradisional, yang berkontribusi pada peningkatan kesehatan dan dampak lingkungan.

Biaya kompor dan data emisi

Tabel 31 menyajikan data biaya dan emisi GRK dari teknologi tungku utama. Uraian teknologi dapat ditemukan dalam studi tersebut. Sementara tabel di bawah ini dapat dilihat untuk tujuan perbandingan biaya dan data emisi

Tabel 31. Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi kompor memasak

Jenis Kompor	Kapasitas	Efisiensi	Umur (tahun)	Harga Satuan Tipikal (Rp)	Biaya Modal (Rp)
Kompor LPG	0,18 kg/hr	55%	15	350.000	46.016
Kompor Listrik	1500 watts	75%	15	900.000	118.326
Kompor Induksi	1500 watts	90%	15	1.500.000	197.211

Jenis Kompor	Konsumsi Energi Tahunan (kWh)	Biaya Energi (Rp. 1,445/kWh and 18,833/kg for LPG ³⁴) (Rp)	Total Biaya Tahunan (Rp)	Total Biaya Tahunan (Rp/kWh atau rupiah/kg)	Total Emisi Tahunan ³⁵ (kg of CO ₂ eq.)
Kompor LPG	131,40 kg	2.474.700	2.520.716	19.184	420,55
Kompor Listrik	803,00 kWh	1.160.335	1.278.661	1.592	704,23
Kompor Induksi	669,17 kWh	966.951	1.164.162	1.740	586,86

Jenis Kompor	Penghematan Biaya Tahunan ³⁶ (Rp)
Kompor LPG	-
Kompor Listrik	1.242.055
Kompor Induksi	1.356.554

Tabel 31. Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi kompor memasak menunjukkan hasil yang menarik tentang biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi kompor memasak. Mengenai biaya, kompor listrik dan induksi akan memberikan total biaya tahunan yang lebih kecil karena efisiensi energi yang lebih tinggi yang menghasilkan konsumsi energi yang lebih rendah meskipun biaya dimuka lebih tinggi. Terlepas dari pertimbangan efisiensi, pilihan konsumen juga dipengaruhi oleh preferensi, karena gas sering kali dianggap lebih cocok untuk kebutuhan memasak tradisional. Akibatnya, penumpukan bahan bakar umumnya diamati, di mana rumah tangga memanfaatkan beberapa teknologi energi tergantung pada kebutuhan spesifik atau hasil yang diinginkan. Namun, mengenai emisi GRK, kompor LPG lebih bersih karena faktor emisi jaringan saat ini masih tinggi, sekitar 0,88 kg CO₂ eq/kWh. Pembangkit listrik berbahan bakar batubara masih mendominasi campuran pembangkit listrik di Indonesia.

³⁴ Harga LPG Pertamina dan daya PLN serta kategori tarif listrik

³⁵ Faktor emisi jaringan listrik Jawa-Bali: 0,877 kg CO₂/kWh; Ditjen Ketenagalistrikan – KESDM (2018) dan faktor emisi LPG sebesar 3,2 kg CO₂/kg

³⁶ Dibandingkan dengan kompor LPG listrik

Biaya siklus hidup kompor memasak (LCC) dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) SKEM

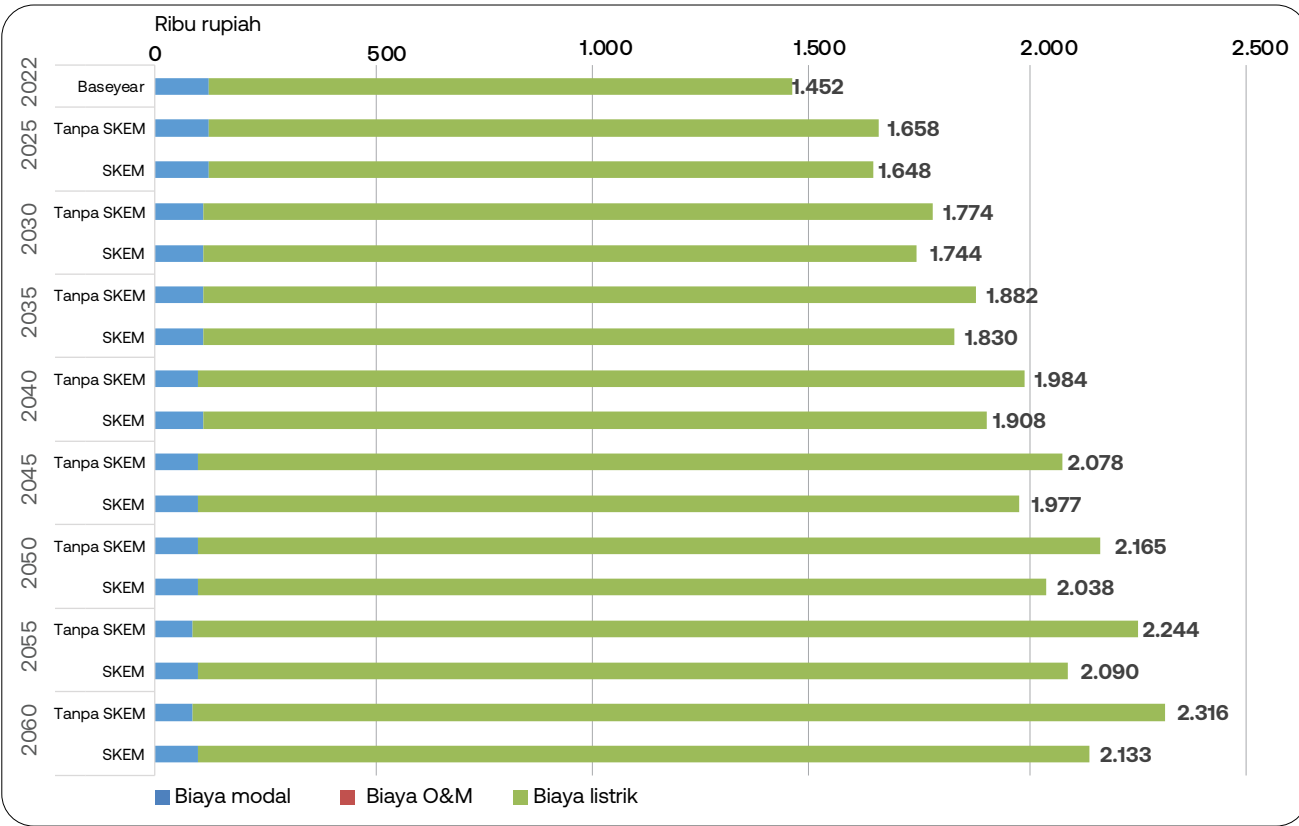
Untuk kompor, konsumsi energi maksimum pada tahun 2060 diperkirakan mencapai 91% dari konsumsi energi pada tahun 2022. Ini berarti diperlukan peningkatan efisiensi sebesar 10% pada tahun 2060.

Tabel 32. Asumsi SKEM kompor induksi

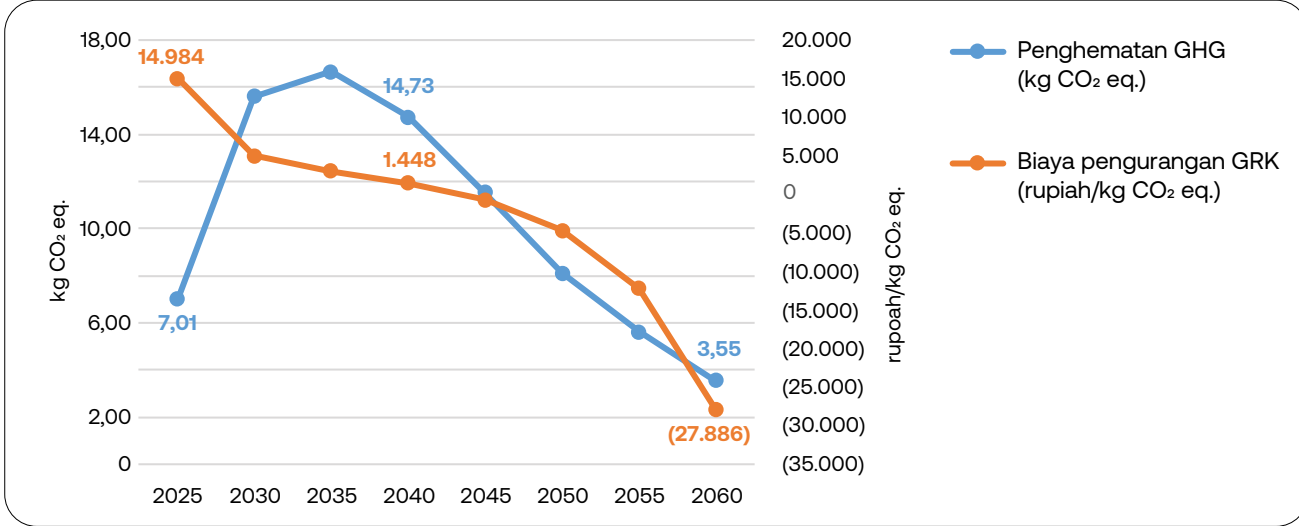
Tahun	2022 (tahun dasar)	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
MEPS Efficiency (%)	87	88	89	90	91	92	93	94	96
Energy Efficiency Index	1	1.01	1.02	1.03	1.05	1.06	1.07	1.08	1.10
Maximum Energy Consumed	1	0.99	0.98	0.97	0.96	0.95	0.93	0.92	0.91

Note: Based on Indonesia NZE targets by MEMR

Gambar 41. Biaya siklus hidup (LCC) kompor induksi dengan skenario Tanpa SKEM dan SKEM (biaya riil)



Gambar 42. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca dari SKEM kompor induksi



3.7 Pemanas Air

Teknologi pemanas air dan data efisiensi energi

Di Indonesia, berbagai teknologi pemanas air digunakan, yang mencerminkan beragamnya sumber daya dan kebutuhan energi di negara ini. Berikut ini beberapa metode umum:

- Pemanas Air Tenaga Surya: Sistem ini memanfaatkan panel surya untuk memanfaatkan energi dari matahari, sehingga populer di banyak wilayah, terutama di daerah pedesaan. Sistem ini hemat biaya dalam jangka panjang dan mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.
- Pemanas Air Listrik: Umumnya di daerah perkotaan, pemanas air listrik praktis dan mudah dipasang. Namun, biaya pengoperasiannya mahal karena biaya listrik.
- Pemanas Air Gas: Pemanas air ini banyak digunakan di rumah tangga dan tempat usaha. Pemanas air ini dapat menggunakan LPG (gas minyak cair) dan dinilai karena efisiensinya serta kemampuan pemanasannya yang cepat.

Data biaya dan emisi pemanas air

Tabel 33. Biaya dan emisi GRK dari berbagai teknologi pemanas air

Jenis Pemanas Air	Kapasitas	Efisiensi	Umur (tahun)	Harga Satuan Tipikal (Rp)	Biaya Modal (Rp)	Biaya O&M (Rp)
Listrik (dengan tangki)	1500 watt/ 80 L	70%	12	4.000.000	587.053	300.000
Tenaga Surya	80 L	50%	20	14.000.000	1.644.435	1.050.000
Pompa Kalor	500 watt/ 80 L	300%	15	15.500.000	2.037.844	1.162.500

Jenis Pemanas Air	Konsumsi Energi Tahunan (kWh)	Biaya energi (Rp. 1.445/kWh)	Total Biaya Tahunan (Rp)	Total Biaya Tahunan (Rp/kWh)	Total Emisi Tahunan (kg of CO ₂ eq.)
Listrik	78,21	113.013	1.000.066	12.787	68,59
Tenaga Surya	-	-	2.694.435	-	-
Pompa kalor	6,08	8.786	3.209.130	527.817	5,33

Jenis Pemanas Air	Penghematan Emisi GRK Tahunan ³⁷ (kg of CO ₂ eq.)	Biaya Pengurangan GRK (Rp/kg CO ₂ eq.)
Listrik	-	-
Tenaga Surya	68,59	32.971
Pompa Kalor	63,26	43.910

Karena biaya awal pemanas air tenaga surya dan pompa panas masih mahal, tidak ada penghematan biaya tahunan untuk kedua teknologi ini dibandingkan dengan pemanas air listrik konvensional. Dalam hal emisi GRK, pemanas air tenaga surya dan pompa panas memberikan penghematan karena efisiensi energinya yang tinggi. Pemanas air tenaga surya tidak mengonsumsi listrik dari jaringan sehingga tidak ada emisi GRK selama fase penggunaan.

Biaya siklus hidup pemanas air dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca dari SKEM

Konsumsi energi maksimum pada tahun 2060 diharapkan sebesar 20% dari konsumsi energi pada tahun 2022, atau efisiensi energi minimum pada tahun 2060 harus 400% lebih efisien daripada tahun 2022.

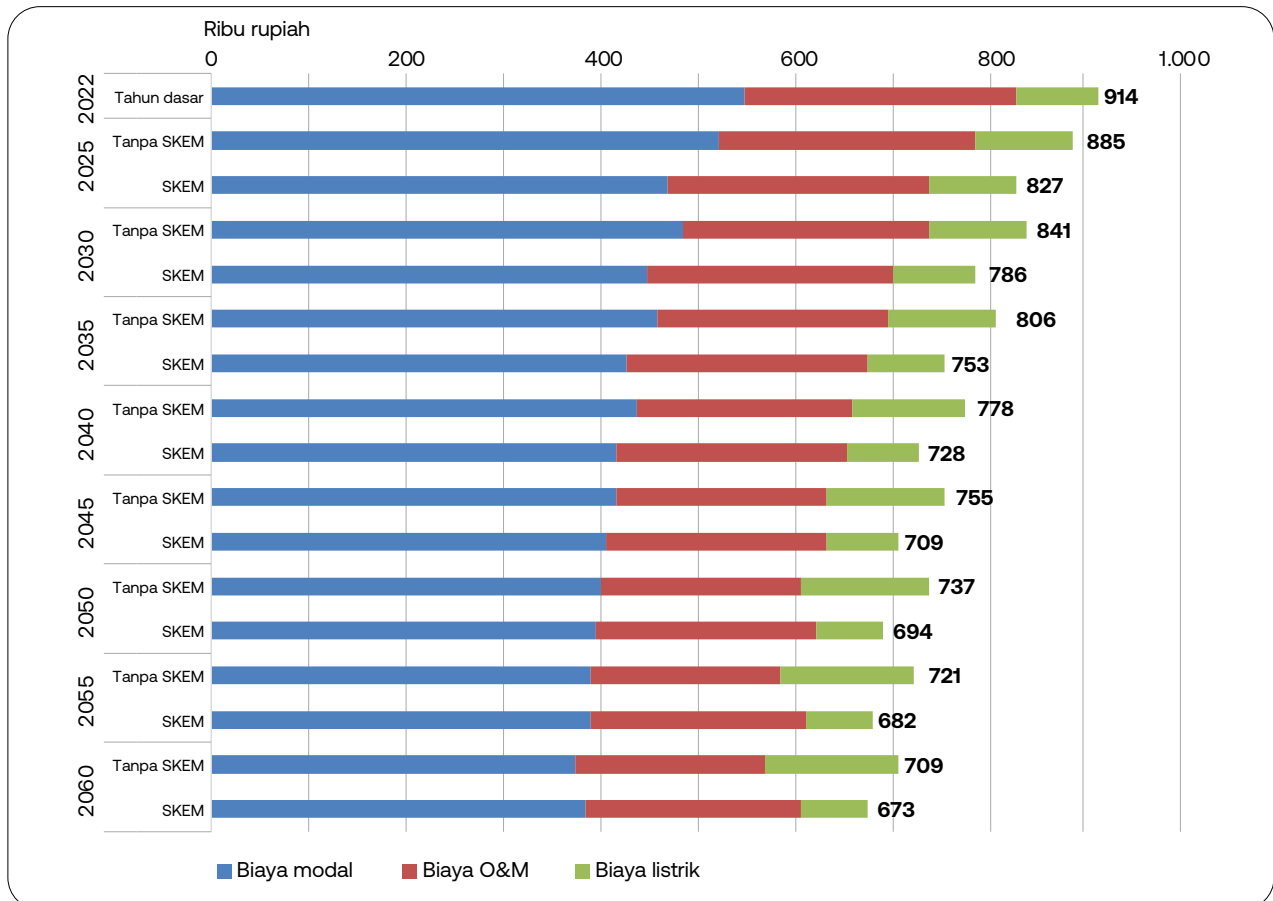
³⁷ Compared to the electric water heater

Tabel 34. Asumsi pemanas air listrik SKEM

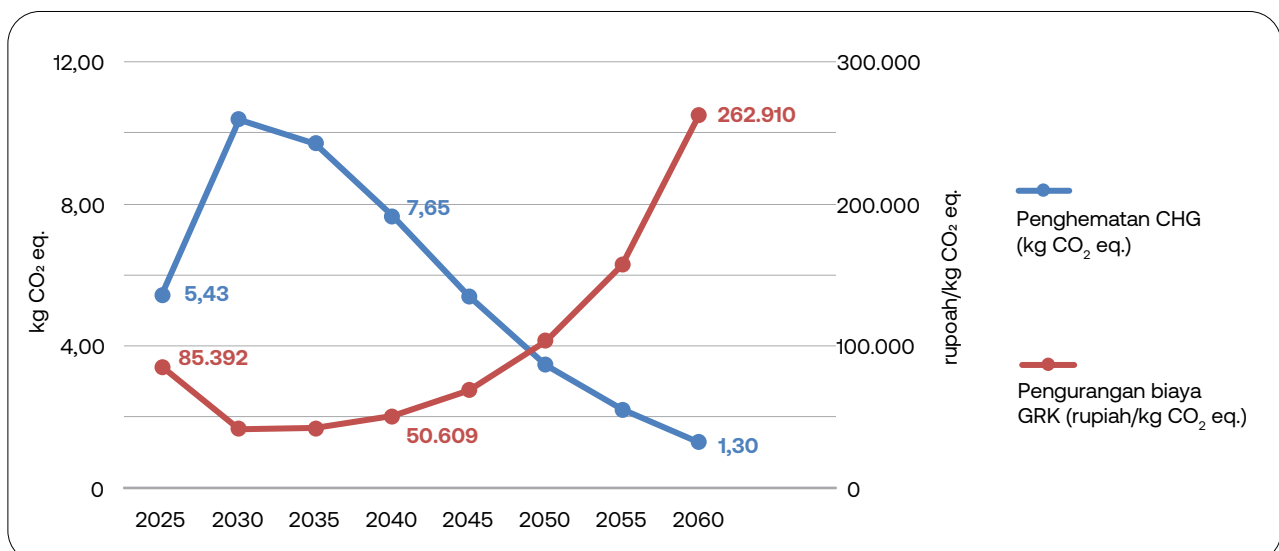
Tahun	2022 (tahun dasar)	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	2060
SKEM UEF(%)	40	45	53	61	68	76	84	92	100
Indeks Efisiensi Energi	1	1,12	1,32	1,51	1,71	1,91	2,11	2,30	2,50
Konsumsi Energi Maksimum	1	0,89	0,76	0,66	0,58	0,52	0,48	0,43	0,40

Catatan: Berdasarkan Singapore SKEM pada Pemanas Air (<https://www.mse.gov.sg/cos2024>). UEF adalah Uniform Energy Factor (Faktor Energi Seragam)

Gambar 43. Biaya siklus hidup (LCC) pemanas air berdasarkan skenario Tanpa SKEM dan SKEM (biaya riil)



Gambar 44. Penghematan dan biaya pengurangan emisi gas rumah kaca dari pemanas air SKEM



3.8 Ringkasan

Berdasarkan analisis peralatan utama yang menyumbang porsi Konsumsi Energi terbesar pada bangunan tempat tinggal, diperoleh wawasan berikut:



- **Bangunan perumahan mewakili lebih dari 75% konsumsi energi dalam bangunan**, oleh karena itu, memastikan peningkatan efisiensi peralatan listrik dan memasak menjadi penting, dengan Standar Kinerja Energi Minimum (SKEM) menjadi alat penting.



- **Listrik sudah menjadi sumber energi yang dominan**, sehingga sebagian besar emisi berada di hulu dalam bauran pembangkitan listrik, oleh karena itu penghijauan bauran listrik tetap menjadi prioritas utama.



- **SKEM merupakan alat utama untuk mendorong penetrasi peralatan yang lebih efisien di pasar**, tetapi penerapannya harus dipertimbangkan secara cermat untuk memastikan kemampuan produsen dalam negeri untuk mematuhi dan meminimalkan potensi dampak negatif pada rantai pasokan lokal. Bermitra dengan produsen untuk mempromosikan produksi dan ketersediaan peralatan yang sangat efisien di pasar domestik telah memberikan manfaat.



- **Insentif untuk peralatan hemat energi dalam bentuk subsidi dan potongan harga dapat memberikan insentif finansial bagi konsumen** untuk membeli peralatan hemat energi dan dengan demikian mengurangi biaya di muka.



- **Kampanye kesadaran publik untuk mendidik konsumen tentang manfaat peralatan hemat energi**, dengan fokus pada penghematan biaya dan dampak lingkungan sangat penting untuk pengambilan keputusan konsumen yang terinformasi.



- **Elektrifikasi masih berperan dalam memasak**, karena LPG tetap menjadi sumber energi utama, tetapi memasak dengan listrik lebih efisien, berkisar antara 75-90% tergantung pada teknologinya, sedangkan kompor LPG memiliki efisiensi 55%. Total biaya tahunan juga jauh lebih rendah untuk kompor listrik.

DAFTAR REFERENSI

- Aismoli. (2024). Statistic. <https://aismoli.or.id/statistic?type=yearly>
- AIISI. (2024). Statistic Distribution. <https://www.aiisi.or.id/statistic/>
- Antara. (2022). 30 electric buses start rolling in Jakarta. <https://en.antaranews.com/news/218977/30-electric-buses-start-rolling-in-jakarta>
- Antara. (2024). Transjakarta sebut sebanyak 200 bus listrik segera masuk koridor. <https://en.antaranews.com/news/217869/jakarta-targets-electrifying-50-pct-of-transjakartas-fleet-by-2025>
- BPS. (2024). Motorised Vehicle Stocks by Province and Type. <https://www.bps.go.id/id/statistics-table/3/VjJ3NGRGa3dkRk5MTIU1bVNFOTVbVbmQyVURSTVFUMDkjMw==/jumlah-kendaraan-bermotor-menurut-provinsi-dan-jenis-kendaraan--unit---2022.html?year=2023>
- Climate Transparency. (2022). Climate Transparency Report 2022: Indonesia
- Danish Energy Agency (DEA). (2023). Technology data – Commercial freight- and passenger transport
- Danish Energy Agency (DEA). (2024). Technology Data – Industrial process heat.
- E.Rightor, P. Scheilhing, A. Hoffmeister and R.Papar. (2022). Industrial Heat Pumps: Electrifying Industry's Process Heat Supply. American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE).
- Ellis, Mark. "Experience with energy efficiency regulations for electrical equipment." International Energy Agency. Paris, France (2007).
- Gaikindo. (2024). Indonesian Automobile Industry Data. <https://www.gaikindo.or.id/indonesian-automobile-industry-data/>
- IEA (2022), An Energy Sector Roadmap to Net Zero Emissions in Indonesia, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/an-energy-sector-roadmap-to-net-zero-emissions-in-indonesia>.
- IEA. (2023). Rail. <https://www.iea.org/energy-system/transport/rail>
- ICCT. (2021). Total cost of ownership for heavy trucks in China: battery electric, fuel cell electric, and diesel trucks.
- ITDP. (2024). Building the Momentum for Transport Electrification in Indonesia. <https://itdp.org/2024/07/15/building-momentum-for-transport-electrification-in-indonesia/>
- ITF. (2023). ITF Transport Outlook. <https://www.itf-oecd.org/itf-transport-outlook-2023>
- Indonesia-Denmark Energy Partnership Programme (INDODEPP). (2023). Energy audits in selected Indonesian enterprises. Summary reports available at <https://ens.dk/en/our-responsibilities/global-cooperation/country-cooperation/indonesia>
- McKinsey. 2024. Plugging in: what electrification can do for industry
- Meira, Z. & Bieker, G. (2023). Comparison of the life-cycle greenhouse gas emissions of combustion engine and electric passenger cars and two-wheelers in Indonesia. ICCT.
- Ministry of Energy and Mineral Resources. (2022). Handbook of Energy and Economics Statistics Indonesia 2021
- Ministry of Environment and Forestry. (2021). Indonesia Long-Term Strategy for Low Carbon and Climate Resilience 2050 (Indonesia LTS-LCCR 2050).
- Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2024a). Handbook of Energy and Economics Statistics Indonesia 2023.

Ministry of Energy and Mineral Resources (MEMR). (2024b). Harga Batubara Acuan.

Pertamina. (2024). Pertamina non-subsidised prices at September 2024

PT PLN. (2024). Tarif tenaga Listrik – tarif adjustment June-September 2024

Rusli, R.D., Purwanto, A.J., Setyawati, C.E.N., Elsy, V., Bhaskara, R.W., & Pranindita, N. (2024), 'Hydrogen Economics for Southeast Asian Industries' in Purwanto, A.J. and R.D. Rusli (eds.) Hydrogen Demand and Supply in ASEAN's Industry Sector. Jakarta: ERIA, pp. 132-145.

Ritchie, H. (2023). Which form of transport has the smallest carbon footprint - Our World in Data. <https://ourworldindata.org/travel-carbon-footprint>

Sawe, et. al. (2024). Clean Industry in China: A Techno-Economic Comparison of Electrified Heat Technologies, Barriers, and Policy Options

Secretariat General of National Energy Council. (2019). Indonesia Energy Outlook 2019.

U.S. Department of Energy. (2022). Manufacturing Static Sankey Diagrams 2018 MECS.

U.S. Energy Information Administration (EIA). (2013). Electricity use by machine drives varies significantly by manufacturing industry.

World Bank. (2024). Monthly commodity price data ("The Pink Sheet") for LNG import prices for Japan.



Danish Energy Agency

Danish Energy Agency
Carsten Niebuhrs Gade 43
DK-1577 Copenhagen V
Denmark
T 0045 33 92 67 00
E: ens@ens.dk
www.ens.dk