

Indonesia: menggerakkan masa depan pelayaran

Bahan bakar pelayaran rendah karbon untuk sektor pelayaran Indonesia

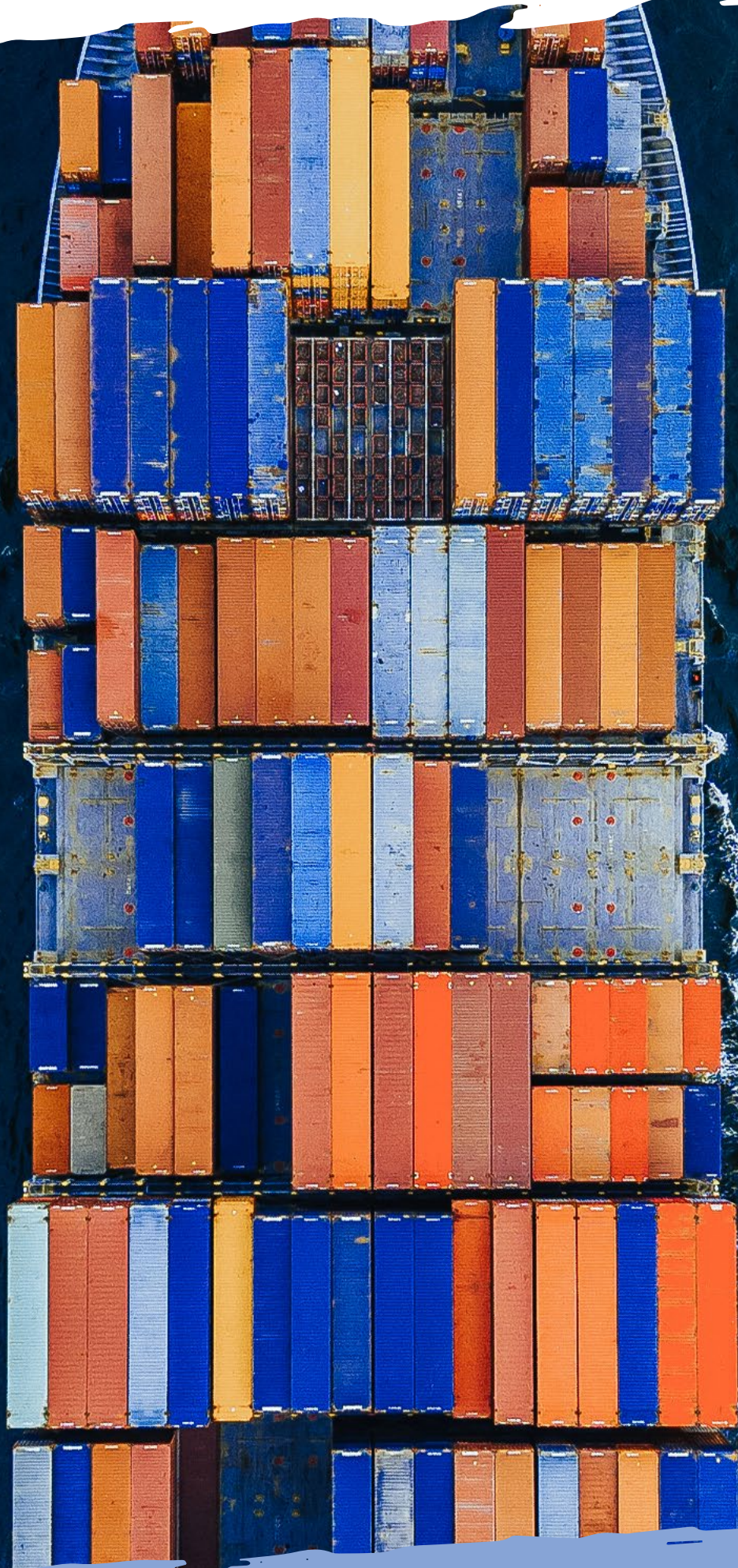


Oleh Ricardo
& Environmental Defense Fund



Untuk
P4G Getting to Zero Coalition Partnership





Daftar Isi

| | | |
|--------------------|---|----|
| | Ringkasan Eksekutif | 6 |
| | Daftar istilah | 9 |
| Pendahuluan | Menilai bahan bakar pelayaran nirkarbon untuk Indonesia | 10 |
| Bagian 1 | Laporan ini menelaah berbagai bahan bakar pelayaran nir- dan rendah karbon | 13 |
| Bagian 2 | Bahan bakar pelayaran rendah karbon dapat digunakan dengan aman dengan regulasi dan pelatihan yang tepat | 15 |
| Bagian 3 | Pendekatan terbaik untuk penerapan bahan bakar pelayaran nirkarbon bergantung pada ketersediaan sumber daya alam, pasar global, dan persyaratan kapal | 17 |
| Bagian 4 | Sektor pelayaran Indonesia signifikan dan beragam; dari kapal internasional besar di rute pelayaran yang padat hingga kapal domestik kecil antarpulau | 20 |
| Bagian 5 | Indonesia sangat bergantung pada batubara dan gas alam untuk pembangkit listrik, dengan peningkatan yang moderat dalam pembangkit terbarukan belakangan ini | 24 |
| Bagian 6 | Indonesia memiliki potensi sumber daya terbarukan yang beragam namun terbatas untuk menghasilkan bahan bakar bagi sektor pelayaran | 26 |
| Bagian 7 | Indonesia memiliki beberapa pilihan untuk memasok industri maritimnya dengan bahan bakar rendah karbon | 30 |
| Bagian 8 | Adopsi bahan bakar rendah karbon dapat membawa manfaat yang lebih luas | 32 |
| Kesimpulan | Indonesia dapat mengadopsi bahan bakar pelayaran yang didekarbonisasi melalui bauran pembangkitan dan pilihan bahan bakar | 34 |
| Studi kasus | Tiga aplikasi untuk bahan bakar pelayaran rendah karbon di seluruh Indonesia | 36 |
| | Referensi | 47 |
| | Lampiran | 50 |

Koalisi Menuju Niremisi (Getting to Zero Coalition)

Getting to Zero Coalition, kemitraan antara Global Maritime Forum, Friends of Ocean Action dan Forum Ekonomi Dunia (World Economic Forum), adalah komunitas para pemangku kepentingan dari sektor maritim, energi, infrastruktur dan keuangan, dan didukung oleh pemerintah negara-negara kunci, IGO, dan pemangku kepentingan lainnya, yang berambisi dan berkomitmen untuk mewujudkan dekarbonisasi pelayaran.

Ambisi Getting to Zero Coalition adalah mewujudkan operasi Kapal Niremisi (ZEV) yang layak secara komersial sepanjang rute perdagangan laut menjelang 2030, didukung oleh infrastruktur yang diperlukan untuk sumber energi bersih nirkarbon yang dapat ditingkatkan skalanya dengan mudah, termasuk produksi, distribusi, penyimpanan, dan bunkering energi tersebut.

Tentang P4G

P4G – Partnering for Green Growth and the Global Goals 2030 – adalah mekanisme penyelenggaraan global yang memelopori kemitraan hijau untuk membangun ekonomi yang berkelanjutan dan tangguh. P4G memobilisasi ekosistem global dari 12 negara mitra dan 5 mitra organisasi untuk membuka peluang bagi lebih dari 50 kemitraan yang bekerja di lima bidang SDG: pangan dan pertanian, air, energi, kota, dan ekonomi sirkular.

Tentang Global Maritime Forum

Global Maritime Forum adalah organisasi nirlaba internasional yang berdedikasi untuk membentuk masa depan perdagangan lintas laut global untuk meningkatkan pembangunan ekonomi jangka panjang yang berkelanjutan dan kesejahteraan manusia.

Tentang Friends of Ocean Action

Friends of Ocean Action adalah grup unik yang terdiri lebih dari 55 pemimpin global dari bisnis, organisasi internasional, masyarakat sipil, sains, dan akademisi yang mencari dan mempercepat solusi terukur untuk menjawab tantangan paling mendesak yang dihadapi lautan. Kelompok ini diselenggarakan oleh World Economic Forum bekerja sama dengan World Resources Institute.

Tentang World Economic Forum

World Economic Forum adalah Organisasi Internasional untuk Kerja Sama Pemerintah-Swasta (International Organization for Public-Private Cooperation). Forum ini melibatkan pemimpin politik, bisnis, budaya, dan masyarakat terkemuka lainnya untuk membentuk agenda global, regional, dan industri. Didirikan pada 1971 sebagai yayasan nirlaba dan berkantor pusat di Jenewa, Swiss, WEF adalah organisasi ini independen, tidak memihak dan tidak terikat pada kepentingan khusus apa pun.

Tentang Environmental Defense Fund

Environmental Defense Fund Europe adalah afiliasi dari Environmental Defense Fund (EDF), sebuah organisasi nirlaba internasional terkemuka yang menciptakan solusi transformatif untuk masalah lingkungan yang paling serius. Sejak 1967, EDF telah menggunakan sains, ekonomi, hukum, dan kemitraan sektor swasta yang inovatif untuk membawa suara baru demi mendapatkan solusi-solusi praktis.

Tentang University College London

University College London Energy Institute Shipping Group bertujuan untuk mempercepat transisi pelayaran ke sistem energi yang adil dan berkelanjutan secara global melalui dukungan penelitian, pendidikan, dan kebijakan pelayaran kelas dunia. Kelompok ini menghususkan diri dalam penelitian multidisiplin yang berpijak pada analisis data dan pemodelan lanjutan sektor maritim.

Tentang International Association of Ports and Harbors

The International Association of Ports and Harbors (IAPH) dibentuk pada 1955 dan selama enam puluh tahun terakhir berkembang menjadi aliansi global yang mewakili lebih dari 180 pelabuhan anggota dan 140 bisnis terkait pelabuhan di 90 negara. Tujuan utama IAPH berkisar pada promosi kepentingan pelabuhan-pelabuhan di seluruh dunia, membangun hubungan antaranggota yang kuat, dan berbagi praktik terbaik di antara anggotanya.

Tentang Ricardo

Visi Ricardo adalah menciptakan dunia di mana setiap orang dapat hidup secara berkelanjutan: menghirup udara bersih, menggunakan energi bersih, bepergian secara berkelanjutan, mengakses air bersih, dan melestarikan sumber daya. Mengadopsi penggunaan bahan bakar pelayaran nirkarbon akan membawa dunia lebih dekat ke cita-cita ini. Sejak tahun 1950-an, Ricardo telah mengupayakan peningkatan kualitas udara dan memelopori penggunaan teknologi energi terbarukan. Saat ini, Ricardo sedang mengerjakan implementasi Perjanjian Paris tentang perubahan iklim, membantu negara-negara mewujudkan rencana mereka untuk mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK).

Situs web: ee.ricardo.com

Ucapan Terima Kasih

Laporan ini ditulis oleh Olivia Carpenter-Lomax, Guy Wilkinson dan Victor Martinez dari Ricardo Energy & Environment dengan bantuan dari Jabulani Nyathi dan Mohit Sharma. Penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada Aoife O'Leary, Marie Cabbia Hubatova dan Panos Spiliotis dari EDF Eropa, Santiago Suarez de la Fuente, Wendela Schim Van Der Loeff dari University College London (UCL) dan Camilo Velandia Perico dan Carlo Raucci dari University Maritime Advisory Services (UMAS) untuk memberikan saran dan data permintaan pelayaran yang merupakan inti analisis dalam laporan ini.

Penulis juga ingin mengucapkan terima kasih kepada orang-orang dan organisasi berikut yang telah membantu mengulas laporan ini: Tristan Smith (UCL), Jeremia Humolong Prasetya dan Karenina Lasrindy (IOJI), Ingrid Sidenvall Jegou (Global Maritime Forum), Emma Skov Christiansen (World Economic Forum), Mathias Emil Bengtsson dan Thomas Capral Henriksen (Kedutaan Besar Denmark di Indonesia), Florian Kitt dan Faela Sufa (Asian Development Bank), dan Ronald Halim (Equitable Maritime Consulting). Terakhir, penulis ingin mengucapkan terima kasih kepada semua peserta pertemuan meja bundar Indonesia yang diselenggarakan pada 30 Juni 2021. Kontribusi mereka telah membantu menyusun laporan ini.

Penafian

Laporan ini didasarkan pada analisis oleh Ricardo Energy & Environment for the Getting to Zero Coalition, kemitraan antara Global Maritime Forum, Friends of Ocean Action, dan World Economic Forum.

Pandangan yang diungkapkan adalah dari penulis sendiri dan bukan dari Getting to Zero Coalition atau Global Maritime Forum, Friends of Ocean Action, atau World Economic Forum.

Ringkasan Eksekutif

Indonesia memiliki peluang untuk menggelar infrastruktur pemasok bahan bakar nirkarbon bagi kapal-kapal yang menyinggahi pelabuhannya. Sumber daya alam, geografi, dan pentingnya posisi Indonesia di jalur perdagangan pelayaran penting menciptakan berbagai peluang yang dapat dimanfaatkan untuk membantu Indonesia mencapai tujuan dekarbonisasi dan memicu ekonomi rendah karbon. Secara khusus, ada potensi penciptaan lapangan kerja dalam rantai pasokan bahan bakar nirkarbon untuk mendukung perekonomian Indonesia. Selain itu, keseluruhan infrastruktur dan rantai pasokan yang akan terbangun dapat membantu meningkatkan elektrifikasi dan mendukung dekarbonisasi pasokan energi, industri, dan transportasi di Indonesia.

Ada beberapa bahan bakar nir- dan rendah karbon yang berpotensi untuk digunakan dalam pelayaran

Pilihan bahan bakar nir- dan rendah karbon yang tersedia untuk diadopsi industri maritim mencakup hidrogen hijau, amonia hijau, metanol hijau, biofuel, dan daya baterai. Studi ini menyelidiki solusi propulsi yang paling cocok untuk berbagai jenis kapal komersial berdasarkan berbagai kriteria. Untuk kapal komersial besar seperti tanker, kontainer, dan kapal muatan curah, opsi yang diidentifikasi paling cocok adalah hidrogen dan amonia; kapal kecil seperti kapal layanan pelabuhan, feri dan pengangkut orang/kendaraan dapat dipasok melalui elektrifikasi langsung dan di atas kapal. Untuk Indonesia, pemanfaatan bahan bakar hayati dalam dekarbonisasi pelayaran merupakan opsi yang potensial di mana ada pasokan sumber daya hayati yang berkelanjutan dan konsisten. Secara sendiri, pemanfaatan bahan bakar hayati tidak dianggap sebagai jalur yang secara holistik dapat mewujudkan dekarbonisasi pelayaran karena kendala pasokan, meningkatnya permintaan untuk sumber daya tersebut secara global dan karena meningkatnya pemanfaatan bahan bakar hayati di sektor lain seperti transportasi jalan dan produksi energi. Namun, pemanfaatan bahan bakar hayati ini dapat memainkan bagian penting dalam solusi keseluruhan untuk Indonesia, dibantu oleh potensi sumber daya energi terbarukan Indonesia yang terbatas namun beragam, yang akan memungkinkan bahan bakar nirkarbon diperoleh dari pembangkit listrik terbarukan.

Dengan peraturan dan pelatihan yang tepat, bahan bakar pelayaran nirkarbon aman digunakan

Beberapa pihak telah menyuarakan keprihatinan mengenai risiko kesehatan, keselamatan dan lingkungan dari bahan bakar nirkarbon. Walaupun risiko ini perlu dimitigasi dan dikelola dengan baik, hal ini tidak boleh dianggap sebagai penghalang untuk mengadopsi bahan bakar nirkarbon dan juga tidak boleh menghalangi industri untuk bergerak maju. Dengan standar, peraturan, pelatihan, dan langkah-langkah keselamatan yang benar, risiko terkait bahan bakar nirkarbon dapat dikelola sebagaimana juga risiko terkait jenis bahan bakar lain selama ini. Bahan bakar yang digunakan saat ini, termasuk bahan bakar hayati, juga berbahaya dan menimbulkan risiko. Namun peraturan, praktik terbaik, dan standar yang telah dikembangkan selama bertahun-tahun pengalaman keahlian telah memungkinkan kita untuk menggunakannya secara luas dan aman di berbagai aplikasi, lingkungan, dan kondisi. Hal yang sama dapat dicapai untuk hidrogen dan amonia.

Indonesia memiliki hubungan perdagangan yang kuat di Asia dan Amerika Utara, dan di seluruh dunia

Indonesia memegang posisi kunci dengan keberadaannya pada jalur pelayaran terpenting di dunia – Selat Malaka dan Selat Sunda. Ini menjadikan Indonesia sebagai *hub* bagi kapal internasional yang melintasi beberapa ekonomi terbesar dunia. Mitra dagang terbesar Indonesia adalah Tiongkok, Singapura, Jepang, dan Amerika Serikat. Indonesia adalah pengeksport utama batu bara dan minyak mentah: bahan bakar adalah komoditas ekspor utama Indonesia berdasarkan nilai, di mana Indonesia sebelumnya menjadi anggota Organization of Petroleum Exporting Countries (OPEC). Ini menyoroti keahlian dan hubungan komersial yang dapat dimanfaatkan Indonesia untuk membangun industri bahan bakar rendah karbon yang kuat dan membantu dekarbonisasi aktivitas pelayaran mitra dagang Indonesia dan Indonesia sendiri.

Pendekatan terbaik untuk adopsi bahan bakar pelayaran nirkarbon bergantung pada pasar global dan persyaratan kapal

Agar adopsi bahan bakar pelayaran nirkarbon berhasil, Indonesia harus memiliki pandangan global, khususnya terhadap pasar yang terhubung melalui rute perdagangan. Kapal-kapal yang menggunakan *bunkering* bahan bakar nirkarbon (memasok bahan bakar untuk digunakan kapal) di berbagai pelabuhan di seluruh dunia harus memiliki kesempatan untuk mengisi bahan bakar sepanjang perjalanannya. Standar yang ditetapkan industri maritim harus dikembangkan untuk mendorong transisi nirkarbon tidak hanya untuk kapal tetapi juga untuk pelabuhan global. Indonesia dapat menjadi bagian dari penggerak standar internasional tersebut sebagai bagian penting sektor pelayaran internasional dan sebagai pelopor bahan bakar nirkarbon.

Dekarbonisasi sektor pelayaran mendukung ambisi Indonesia untuk mengurangi emisi karbon

Indonesia telah menetapkan tujuan untuk meningkatkan elektrifikasi serta kontribusi energi terbarukan ke jaringan di atas 20% pada tahun 2025. Saat ini, bahan bakar fosil merupakan sekitar 84% dari produksi energi di Indonesia. Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang terbatas namun beragam – cukup untuk memasok kebutuhan listrik domestik serta produksi bahan bakar nirkarbon untuk *bunker* kapal di pelabuhannya. Mengadopsi bahan bakar nirkarbon di sektor pelayaran Indonesia dapat menjadi katalis untuk mencapai komitmen karbon Indonesia secara umum berkat dibangunnya pembangkit listrik terbarukan dan pengembangan rantai pasokan, keterampilan, dan skala ekonomi yang akan mendukung dekarbonisasi yang lebih luas. *Elektrofuel* yang dihasilkan juga dapat digunakan dalam sektor-sektor yang lebih luas seperti industri produksi pupuk, amonia dan baja, baik untuk keperluan domestik maupun ekspor. Dengan perencanaan energi, investasi, dan lingkungan yang sesuai untuk ekonomi secara keseluruhan, pengembangan sektor bahan bakar pelayaran nirkarbon dan infrastrukturnya dapat mendukung tujuan dekarbonisasi Indonesia.

Studi Kasus Pelabuhan

Laporan ini menyoroti tiga aplikasi berbeda untuk bahan bakar pelayaran rendah karbon di seluruh Indonesia: memasok jalur sibuk pelayaran internasional dengan bahan bakar rendah karbon; pengisian bahan bakar sektor pelayaran domestik Indonesia; dan dekarbonisasi bagi nelayan kecil dan kapal *off-grid* lainnya. Indonesia melayani sejumlah besar kapal internasional dan menempati posisi kunci sepanjang jalur-jalur pelayaran yang sibuk dan penting, seperti Selat Malaka dan Selat Sunda, sehingga semakin membuka peluang internasional karena kedekatannya dengan pelabuhan-pelabuhan yang ada di Jakarta. Sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki banyak pulau berpenghuni dan pelayaran domestik sangat penting untuk menghubungkan masyarakat dan mengangkut barang dan orang. Oleh karena itu, dekarbonisasi sektor pelayaran akan membutuhkan fokus yang kuat pada penerapan solusi yang menjawab kebutuhan dan kondisi orang dan masyarakat setempat, sekaligus mengatasi emisi dan polusi dari segmen ini yang mengonsumsi 29% dari semua energi pelayaran yang dibutuhkan di Indonesia. Untuk daerah-daerah yang saat ini belum memiliki akses ke tenaga listrik, ini menjadi peluang untuk menerapkan dan menggunakan teknologi pembangkit energi terbarukan *off-grid* untuk memasok listrik kepada masyarakat lokal, industri, dan pada saat yang sama mengisi daya kapal kecil bertenaga baterai.

Indonesia telah menetapkan tujuan untuk meningkatkan akses ke listrik dan kontribusi energi terbarukan ke jaringan di atas **20%** pada tahun **2025**

Daftar Istilah

| | |
|--------------------------|---|
| AIS | <i>Automatic Identification System / Sistem Identifikasi Otomatis</i> |
| APD | Alat Pelindung Diri |
| CCS | <i>Carbon Capture and Storage / Penangkapan dan Penyimpanan Karbon</i> |
| EDF | Environmental Defense Fund |
| GHGP | <i>Greenhouse Gas Protocol / Protokol Gas Rumah Kaca</i> |
| GRK | Gas Rumah Kaca |
| GtZ | <i>Getting to Zero Coalition / Koalisi Menuju Niremisi</i> |
| IMO | <i>International Maritime Organization / Organisasi Maritim Internasional</i> |
| LNG | <i>Liquefied Natural Gas / Gas Alam Cair</i> |
| LPG | <i>Liquefied Petroleum Gas / Gas Minyak Cair</i> |
| MtCO₂e | <i>Megatonnes Carbon Dioxide Equivalent / Setara Megaton Karbon Dioksida</i> |
| P4G | <i>Partnering for Green Growth and the Global Goals 2030</i> |
| SOLAS | <i>Safety of Life at Sea / Keselamatan di Laut</i> |
| SMR | <i>Steam Methane Reformation / Pembentukan Kembali Metana Uap</i> |
| TWh | <i>Terawatt Hours / Terawatt Jam</i> |

Pendahuluan

Ada beberapa jalur potensial bagi Indonesia untuk mengembangkan bahan bakar nirkarbon baru untuk melayani sektor pelayarannya yang berkembang pesat

Adopsi bahan bakar pelayaran nirkarbon memiliki manfaat dan sinergi yang signifikan bagi Indonesia yang jauh melampaui sektor pelayaran.



P4G Getting to Zero Coalition Partnership, yang diselenggarakan bersama oleh Global Maritime Forum, Friends of Ocean Action, World Economic Forum, Environmental Defense Fund, University College London dan International Association of Ports and Harbors, memanfaatkan platform P4G untuk melibatkan pemangku kepentingan dan perusahaan dari tiga negara mitra P4G: Indonesia, Meksiko, dan Afrika Selatan. Tujuannya adalah untuk mewujudkan kapal dan bahan bakar niremisi dan mengidentifikasi pertumbuhan dan peluang bisnis nyata dan dapat ditindaklanjuti yang dapat berkontribusi pada pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan dan inklusif di negara-negara target tersebut.

Laporan ini mengeksplorasi konteks dan potensi penerapan bahan bakar pelayaran nir- dan rendah karbon melalui sektor pelayaran Indonesia. Pekerjaan ini memiliki konteks global yang penting di tengah upaya dekarbonisasi sektor pelayaran. International Maritime Organization (IMO), sebagai regulator pelayaran internasional, dalam Strategi Awalnya telah menetapkan sebuah 'Tingkat ambisi' untuk mengurangi emisi gas rumah kaca setidaknya 50% dari tingkat tahun 2008 pada tahun 2050.

Laporan ini merupakan bagian dari proyek lebih luas yang menyelidiki potensi adopsi bahan bakar pelayaran niremisi di Indonesia, Afrika Selatan dan Meksiko, dan meneruskan pekerjaan sebelumnya dari Environmental Defense Fund (EDF) di bidang pelayaran rendah karbon, termasuk *Sailing on Solar – Could Amonia Hijau decarbonize international shipping?* (Berlayar dengan Tenaga Surya – Bisakah amonia hijau mendekarbonisasi pelayaran internasional?) [1], dan *Electrofuels for shipping: How synthetic fuels from renewable electricity could unlock sustainable investment in countries like Chile* (Electrofuels bagi pelayaran: Bagaimana bahan bakar sintetis dari listrik terbarukan dapat membuka investasi berkelanjutan di negara-negara seperti Chile) [2].

Analisis dalam laporan ini mempertimbangkan karakteristik ekonomi dan geografis Indonesia yang unik untuk memahami potensi skala aplikasi bahan bakar pelayaran nir- dan rendah karbon, aplikasi di dalam dan di luar pelayaran, dan berbagai manfaat yang dapat dibawa ke Indonesia. Termasuk wawasan dan masukan dari Komite Nasional yang dibentuk untuk mendukung Kemitraan P4G - Getting to Zero Coalition.

Walaupun secara historis Indonesia sangat bergantung pada bahan bakar fosil untuk pembangkitan listrik, Indonesia telah menetapkan target energi terbarukan dan dekarbonisasi – memasang 45GW energi terbarukan pada tahun 2025 dan mengurangi emisi GRK secara umum sebesar 29-41% menjelang tahun 2030 [3]. Namun belum jelas apakah Indonesia akan mampu mencapai target tersebut.

Sekitar 47% dari Produk Domestik Bruto (PDB) Indonesia berasal dari manufaktur [4] yang mengandalkan ekspor barang-barang manufaktur di seluruh dunia ke ekonomi besar seperti Cina dan Amerika Serikat. Kemampuan menawarkan bahan bakar rendah karbon ke kapal-kapal pelayaran akan memungkinkan Indonesia melayani pasar masa depan dan berkembang serta memfasilitasi pusat manufaktur yang menarik untuk didirikan seiring meningkatnya permintaan akan barang-barang rendah karbon.

Manfaat dan sinergi untuk Indonesia di luar pelayaran

Adopsi bahan bakar pelayaran nir- dan rendah karbon adalah jalur langsung menuju dekarbonisasi sektor pelayaran. Ini juga akan memberi manfaat dan sinergi yang signifikan bagi Indonesia di luar pelayaran itu sendiri, termasuk:

1. **Penciptaan pekerjaan ramah lingkungan di** seluruh tingkat dan rentang keterampilan dan pendidikan, mendukung transisi yang adil dan merata menuju ekonomi rendah karbon.
2. **Mendorong investasi** di bidang listrik terbarukan, bahan bakar nirkarbon dan infrastruktur berkelanjutan, didukung potensi permintaan yang andal dari sektor pelayaran global dan dapat digunakan untuk mendukung dekarbonisasi sektor ketenagalistrikan yang lebih luas.
3. **Tersedianya bahan bakar** nirkarbon yang dapat digunakan untuk dekarbonisasi sektor lain, seperti transportasi berat, pertambangan, pertanian, manufaktur dan industri.

Pengembangan sektor bahan bakar nirkarbon harus didekati dengan mempertimbangkan sinergi di luar sektor pelayaran untuk mendapatkan manfaat penuh dan menghindari potensi jebakan. Sinergi ini perlu diselidiki dan dipikirkan lebih lanjut.



Bagian 1

Laporan ini mengeksplorasi berbagai bahan bakar pelayaran nir- dan rendah karbon

Ada berbagai potensi bahan bakar pelayaran nir- dan rendah karbon yang sedang dipertimbangkan untuk aplikasi di sektor maritim. Masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan yang perlu diperhitungkan saat memilih bahan bakar dan mengembangkan infrastruktur bunker. Laporan ini fokus pada bahan bakar nirkarbon dan solusi propulsi yang menggunakan listrik terbarukan dan tidak melepas karbon dioksida dalam rantai pasokan atau pada titik penggunaan, berdasarkan teknologi yang kemungkinan besar tersedia secara komersial pada skala yang memadai sebelum tahun 2030. Bahan bakar hayati berkelanjutan dari sumber daya limbah juga dipertimbangkan untuk laporan ini; agar bahan bakar hayati dapat dianggap berkelanjutan, harus ada kehati-hatian yang cukup untuk memastikan bahwa penggunaan produk limbah ini sebagai bahan bakar tidak meningkatkan emisi karbon dalam siklus hidupnya atau dampak negatif lingkungan atau ekologi lainnya dibandingkan metode pembuangan lainnya. Bahan bakar hayati sudah tersedia secara komersial di Indonesia, namun keberlanjutan dari bahan bakar ini harus dipastikan untuk mencegah konsekuensi lingkungan dan sosial yang tidak diinginkan.

Bagan 1: Ringkasan bahan bakar nirkarbon yang menjadi fokus laporan ini

| | |
|--|--|
| <p>Listrik Terbarukan + Baterai Listrik terbarukan dapat digunakan untuk mengisi baterai yang digunakan di kapal. Baterai kapal memiliki efisiensi <i>powertrain</i> yang sangat tinggi dan tingkat kebisingan dan getaran yang rendah. Namun, kepadatan penyimpanan energi dari teknologi baterai yang ada lebih rendah dibandingkan dengan bahan bakar, yang berarti saat ini baru cocok untuk kapal kecil yang melakukan perjalanan jarak pendek.</p> | <p>PENGOLAHAN</p> <p>+</p> |
| <p>Hidrogen Hijau Hidrogen hijau diproduksi menggunakan elektroliser yang dijalankan dengan tenaga listrik terbarukan. Proses produksinya membutuhkan banyak energi dan volume air yang besar. Penyimpanan hidrogen juga merupakan tantangan: disimpan sebagai gas terkompresi dalam tangki bertekanan tinggi, atau sebagai cairan pada suhu sekitar -253°C. Kebocoran bisa jadi susah untuk dicegah. Selain itu, hidrogen adalah gas rumah kaca tidak langsung dan kebocoran apa pun akan menambah inefisiensi. Hidrogen dapat digunakan dalam sel bahan bakar atau mesin pembakaran internal.</p> | <p>Lebih sedikit pengolahan, berarti kerugian dan biaya yang lebih rendah.</p> |
| <p>Amonia Hijau Amonia hijau diproduksi dengan menggabungkan hidrogen hijau dengan nitrogen yang dipisahkan dari udara. Amonia hijau disimpan sebagai gas terkompresi pada tekanan 10 bar atau dalam bentuk cairan pada -34°C. Amonia hijau dapat digunakan di mesin pembakaran internal atau di beberapa sel bahan bakar. Amonia lebih padat energi daripada hidrogen, meskipun jauh lebih rendah kepadatan energinya daripada bahan bakar fosil atau bahan bakar hayati.</p> | <p>!</p> <p>Lebih banyak pengolahan diperlukan, membutuhkan sumber daya dan input tambahan.</p> |
| <p>Bahan bakar hayati dari limbah Bahan bakar hayati dapat diproduksi dari berbagai bahan baku, termasuk limbah pertanian dan kota. Bahan baku harus dikaji keberlanjutan dan potensi dampak lingkungan dan sosialnya yang lebih luas. Pembakaran bahan bakar ini menghasilkan emisi karbon dioksida, dan emisi sepanjang siklus hidupnya bergantung pada rantai pasokan dan proses produksi bahan bakar tersebut.</p> | |

Kandidat bahan bakar lain yang tidak menjadi fokus laporan ini

Metanol hijau

Hidrogen hijau dapat dikombinasikan dengan karbon dioksida untuk menghasilkan metanol yang memiliki kepadatan energi lebih tinggi daripada amonia. Metanol hijau berbentuk cair pada kondisi ambien dan membutuhkan adaptasi minimal untuk kapal yang dirancang untuk bahan bakar fosil.

Agar dapat dianggap nirkarbon, karbon dioksidanya harus ditangkap langsung dari udara atau air laut. Laporan ini tidak berfokus pada metanol hijau karena teknologi penangkapan karbon udara langsung dianggap belum matang dan kemungkinan tidak akan layak pada skala industri dalam rentang waktu 2030 laporan ini. Namun, ini dapat berubah seiring semakin matangnya teknologi, yang berarti bahwa secara teori metanol hijau dapat menjadi pilihan bahan bakar hijau yang layak.

Hidrogen dan Amonia Biru

Hidrogen dapat dihasilkan dari bahan bakar fosil yang menghasilkan karbon dioksida sebagai produk sampingan. Jika karbon dioksidanya ditangkap dan disimpan, hidrogennya disebut "hidrogen biru", yang kemudian dapat digabungkan dengan nitrogen untuk membentuk "amonia biru".

Meski bahan bakar biru memiliki potensi pelayaran, laporan ini berfokus pada bahan bakar nirkarbon. Hal ini didasarkan pada asumsi bahwa teknologi penangkapan dan penyimpanan karbon belum matang, dan kemungkinan tidak akan dapat mencapai tingkat penangkapan yang diperlukan untuk memastikan bahwa siklus hidup emisi karbon dari karbon biru secara signifikan lebih rendah daripada diesel dalam rentang waktu 2030 laporan ini dan pada skala industri. Adopsi bahan bakar biru juga membutuhkan upaya untuk mengurangi emisi dari ekstraksi dan distribusi bahan bakar fosil. Lihat Lampiran E untuk lebih jelasnya.

Bahan bakar hayati dari tanaman energi

Selain produk limbah, bahan bakar hayati dapat dihasilkan dari berbagai tanaman energi yang dibudidayakan secara khusus untuk tujuan konversi menjadi bahan bakar. Seperti bahan bakar hayati dari limbah, pembakaran bahan bakar ini menghasilkan emisi karbon dioksida, dan emisi siklus hidup bergantung pada rantai pasokan dan proses produksi.

Laporan ini tidak fokus pada penggunaan bahan bakar hayati dari tanaman energi untuk pelayaran di Indonesia karena ketersediaan lahan yang terbatas, dan ada bahaya di mana tanaman energi dapat menggantikan tanaman pangan atau kawasan hutan yang ada. Karena itu, ketersediaan bahan baku bahan bakar hayati yang berkelanjutan dan peka terhadap lingkungan terbatas.


Bagian 2

Bahan bakar pelayaran rendah karbon dapat digunakan dengan aman dengan regulasi dan pelatihan yang tepat

Seperti halnya bahan bakar laut berbasis fosil, penanganan bahan bakar rendah karbon memerlukan regulasi dan pelatihan industri yang tepat agar dapat dilakukan dengan aman dan menghindari bahaya bagi manusia dan lingkungan.

Bagan 2 memaparkan bahaya utama dan implikasi penanganan bahan bakar rendah karbon. Tabel bahaya lengkap disertakan dalam Lampiran B.

Bagan 2: Ringkasan bahaya utama dan implikasi penanganan bahan bakar laut rendah karbon. Minyak gas kelautan dan gas alam cair disertakan untuk perbandingan

| |  Bahaya utama | Implikasi penanganan |
|-------------------------------------|---|--|
| Listrik + Baterai Terbarukan | <ul style="list-style-type: none"> • Risiko paparan listrik. • Bahan kimia baterai mungkin korosif. • Pelepasan gas selama pengisian dapat menimbulkan risiko kebakaran. | <ul style="list-style-type: none"> • Prosedur operasi yang aman diperlukan untuk meminimalkan risiko paparan listrik. • Memastikan peralatan dalam kondisi baik akan membatasi risiko kebakaran atau paparan bahan kimia. |
| Hidrogen Hijau (cair) | <ul style="list-style-type: none"> • Sangat mudah terbakar dan meledak. • Risiko luka bakar kriogenik. • Gas rumah kaca tidak langsung. | <ul style="list-style-type: none"> • Memastikan tangki dan peralatan dalam kondisi baik, kebocoran dicegah, dan gas tidak terkumpul di ruang tertutup. • Penanganan yang aman membutuhkan alat pelindung diri (APD) yang sesuai. |
| Amonia Hijau (cair) | <ul style="list-style-type: none"> • Sangat beracun bagi lingkungan perairan dan manusia. • Mudah meledak dan mudah terbakar. • Korosif. | <ul style="list-style-type: none"> • Sebagai komoditas yang diperdagangkan secara global, sudah ada regulasi untuk penyimpanan dan penanganan amonia di kapal. • Memastikan tangki dan peralatan dalam kondisi baik, kebocoran dicegah dan gas tidak terkumpul di ruang tertutup. • Penanganan yang aman membutuhkan APD yang sesuai. |
| Bahan Bakar Hayati | <ul style="list-style-type: none"> • Beracun bagi lingkungan dan manusia. • Mudah meledak dan mudah terbakar. • Formaldehida dapat terbentuk selama pembakaran. | <ul style="list-style-type: none"> • Banyak jenis bahan bakar hayati dapat disimpan dalam tangki yang mirip dengan bahan bakar fosil cair konvensional. • Bahan bakar hayati sifatnya mirip dengan bahan bakar fosil biasa sehingga aturan keselamatan dan penanganan yang serupa dapat diterapkan. |
| Minyak gas kelautan | <ul style="list-style-type: none"> • Mudah terbakar dan berbahaya jika terhirup atau tertelan. • Beracun bagi kehidupan akuatik dengan efek jangka panjang. | <ul style="list-style-type: none"> • Penanganan yang aman membutuhkan APD yang sesuai. • Pemaparan badan air terhadap bahan bakar harus benar-benar dihindari. |
| Gas alam cair | <ul style="list-style-type: none"> • Sangat mudah terbakar dan meledak. • Risiko luka bakar kriogenik. | <ul style="list-style-type: none"> • Pastikan tangki dalam kondisi baik, kebocoran dicegah, dan gas tidak terkumpul di ruang tertutup. • Penanganan yang aman membutuhkan APD yang sesuai. |

Baterai dan infrastruktur pengisian daya telah terbukti untuk transportasi jalan raya dan sedang diluncurkan dengan cepat di banyak negara. Catu daya darat di pelabuhan sudah digunakan untuk mengurangi emisi dari sistem tenaga tambahan untuk kapal saat berlabuh. Pemangku kepentingan di komite pengarah telah menyebut proyek percontohan yang mendemonstrasikan penerapan baterai, solar PV dan Liquefied Petroleum Gas (LPG) untuk menggerakkan kapal-kapal kecil di Indonesia. Satu hal yang perlu diperhatikan adalah daur ulang baterai mengingat sifat racun dari bahan yang tersisa setelah digunakan. Tanpa itu, ada risiko akumulasi limbah beracun dan tidak dapat digunakan di ekosistem.

Hidrogen dan amonia sudah dipahami dengan baik dalam aplikasi industri dengan peraturan, standar, dan kode praktik terkait. Akan perlu ada beberapa modifikasi peraturan dan kode yang mengatur penggunaan bahan bakar dalam aplikasi maritim, tetapi proses ini sudah berlangsung [5] [6]. Hidrogen sudah dikonsumsi di Indonesia untuk sistem sel bahan bakar *off-grid* dengan lebih dari 800 sel bahan bakar yang menyediakan daya untuk telekomunikasi dan sistem penting lainnya [7]. Hidrogen sangat sulit untuk diangkut dan disimpan tanpa risiko kebocoran karena ukuran molekulnya yang kecil sehingga mampu menembus sebagian besar bahan. Kebocoran hidrogen harus benar-benar dihindari karena merupakan gas rumah kaca sekunder (mengurangi penyerapan metana dari atmosfer). Selain itu, hidrogen sangat eksplosif dan berisiko meledak di ruang tertutup. Untuk alasan ini, mungkin lebih baik apabila bahan bakar hidrogen diproduksi dekat dengan pelabuhan di mana akan digunakan untuk mencegah kebutuhan transportasi dan penanganan, dan perlu ada sarana untuk ventilasi serta untuk mendeteksi, mengukur dan mengurangi kelalaian.

Amonia sudah digunakan di sektor pertanian Indonesia, yang diproduksi, digunakan di dalam negeri, dan juga diekspor [8] yang berarti penanganan dan pengangkutan amonia sudah dipahami dengan baik. Hal ini ditunjukkan oleh terminal ekspor amonia Indonesia di Bontang Utara yang memiliki tangki penyimpanan amonia integritas ganda 50.000 ton metrik dengan pengisian berkapasitas tinggi untuk dimuat ke kapal. Mitsubishi juga menjajaki pembangunan pabrik amonia sebagai sumber bahan bakar untuk dikirim ke Jepang, meskipun amonia ini akan digunakan untuk melengkapi batubara di pembangkit listrik tenaga batubara [9]. Dengan kemajuan ini sekalipun, korosivitas, toksisitas, serta produksi gas NO_x saat dibakar membutuhkan perhatian dan tindakan mitigasi yang cermat selama penanganan dan penggunaan [5].

Berbagai Lembaga Klasifikasi di seluruh dunia telah menerbitkan dokumen yang berkaitan dengan penggunaan hidrogen dan amonia dan sedang mengembangkan aturan kelas untuk bahan bakar yang dapat diterima oleh masing-masing Negara Bendera [10] [11] [12] [13]. Diperkirakan bahwa Konvensi Internasional untuk Keselamatan Kehidupan di Laut (*International Convention for the Safety of Life at Sea – SOLAS*) dari IMO akan diperbarui setelah aturan yang ditetapkan oleh Lembaga Klasifikasi, yang cenderung menyesuaikan lebih cepat.

Penggunaan bahan bakar hayati dalam transportasi jalan raya, terutama sebagai bahan bakar *drop-in*, semakin umum. Pemerintah berbagai negara, seperti pemerintah Indonesia, telah menetapkan kebijakan untuk mendorong pemanfaatan bioetanol dan biodiesel sebagai bahan bakar campuran untuk mendekarbonisasi transportasi dan energi. Bahan bakar ini jauh lebih mirip dengan bahan bakar transportasi berbasis fosil yang mapan dari segi penyimpanan dan persyaratan penanganannya daripada hidrogen atau amonia. Sepanjang adopsi bahan bakar hayati, sangat penting bahwa masalah penggunaan lahan dengan isu-isu terkait keberlanjutan lainnya dipertimbangkan, karena hal ini dapat memiliki implikasi yang signifikan pada keandalan pasokan bahan bakar hayati dan keberlanjutan bahan bakar.

Bagian 3

Pendekatan terbaik untuk adopsi bahan bakar pelayaran nirkarbon tergantung pada ketersediaan sumber daya alam, pasar global, dan persyaratan kapal

Meskipun dekarbonisasi sektor pelayaran mungkin menantang, sudah ditetapkan tujuan yang ambisius untuk mencapai hal ini: IMO telah menetapkan target pengurangan emisi setidaknya 50% pada tahun 2050 (relatif terhadap tingkat tahun 2008) dan, baru-baru ini, John Kerry – Utusan Iklim Amerika Serikat – menyerukan target yang lebih ambisius untuk sepenuhnya mendekarbonisasi sektor ini dalam jangka waktu yang sama. Adopsi luas *electrofuel* kemungkinan akan memainkan peran utama dalam mencapai target ini. Namun, untuk mencapai hal ini, dua tantangan penting harus diatasi, baik dalam skala lokal maupun global: yakni produksinya berdasarkan kebutuhan dan sumber daya lokal, serta penyimpanan, pengangkutan, dan penggunaan yang aman.

Pilihan bahan bakar pelayaran nirkarbon untuk bunkering kapal di Indonesia bergantung pada berbagai faktor, termasuk ketersediaan sumber daya, tingkat pemanfaatannya dalam sektor maritim global, konteks lokal sekitar pelabuhan, biaya dan implikasi praktis dari infrastruktur, karakteristik bahan bakar dan kesesuaiannya untuk berbagai aplikasi pelayaran.

Sumber daya alam dan ketersediaan lahan untuk produksi bahan bakar

Adopsi bahan bakar nirkarbon bergantung pada ketersediaan sumber daya alam yang sesuai, dan lahan untuk memproduksi dan menyimpan bahan bakar tersebut.

Produksi hidrogen dan amonia hijau memerlukan listrik terbarukan dalam volume besar. Ini dapat dihasilkan di dekat fasilitas produksi bahan bakar atau di tempat lain dan diangkut ke lokasi melalui jaringan listrik. Proses elektrolisis membutuhkan air, dan karena pabrik produksi bahan bakar kemungkinan berada di dekat pelabuhan, maka air laut dapat digunakan. Untuk itu dibutuhkan pemasangan peralatan desalinasi; biaya pabrik desalinasi sangat kecil dibandingkan dengan infrastruktur produksi bahan bakar lainnya. Selain itu, fasilitas desalinasi dapat memberikan manfaat yang lebih luas dalam mengatasi masalah kekurangan air dengan menciptakan skala ekonomi yang didukung oleh permintaan air untuk bahan bakar. Kebocoran hidrogen apa pun adalah masalah, bukan hanya karena mengurangi efisiensi proses, tetapi juga karena hidrogen adalah gas rumah kaca tidak langsung; ini mungkin berarti bahwa hidrogen harus diproduksi secara lokal di lokasi dan disimpan dalam waktu sesingkat mungkin.

Bahan bakar hayati dari limbah harus diproduksi dari sumber yang bertanggung jawab yang meminimalkan dampak ekologi dan lingkungan. Bahan bakar hayati, seperti bahan bakar fosil, melepaskan karbon ketika dibakar dalam mesin pembakaran, namun dapat dianggap nol bersih jika karbon yang dikeluarkan diimbangi dengan jumlah karbon yang diserap ketika karbon itu terbentuk, misalnya ketika tanaman tumbuh. Namun, pupuk, transportasi dan produksi bahan bakar hayati dapat melepaskan karbon tambahan yang berarti bahwa bahan bakar hayati tidak benar-benar nirkarbon sepanjang seluruh siklus hidupnya. Hal lain yang perlu dipertimbangkan adalah apakah ada penggunaan alternatif untuk produk limbah atau residu, yang digunakan sebagai bahan baku, yang bernilai lebih, atau memiliki dampak karbon dan lingkungan yang lebih rendah. Sumber limbah biomassa berkelanjutan ini cenderung langka dan sulit digunakan pada skala besar.

Menghindari risiko lingkungan yang lebih luas

Indonesia memiliki kawasan hutan hujan yang masih asli dan merupakan *hotspot* keanekaragaman hayati. Perlu ada pertimbangan cermat untuk memastikan bahwa dampak lingkungan dan sosial dari setiap perubahan penggunaan lahan (baik langsung maupun tidak langsung) dan penggunaan sumber daya alam diminimalkan. Misalnya, mengganti pertanian penghasil pangan, habitat atau lahan hutan dengan infrastruktur bahan bakar atau teknologi pembangkit listrik terbarukan harus benar-benar dihindari.

Selain itu, pengembangan pembangkit terbarukan untuk menghasilkan bahan bakar hanya boleh dilakukan sebagai tambahan terhadap yang dikembangkan untuk menyediakan kebutuhan listrik yang lebih luas dan dekarbonisasi pasokan listrik ke masyarakat dan industri di Indonesia. Jika sumber daya alam tidak tersedia di sekitar pelabuhan, maka listrik terbarukan atau bahan bakar itu sendiri dapat diimpor dari tempat lain, atau kapal dapat melakukan persinggahan bunker terpisah di tempat lain di mana sumber daya tersedia untuk menghasilkan bahan bakar nirkarbon secara berkelanjutan.

Pasar bahan bakar nirkarbon global

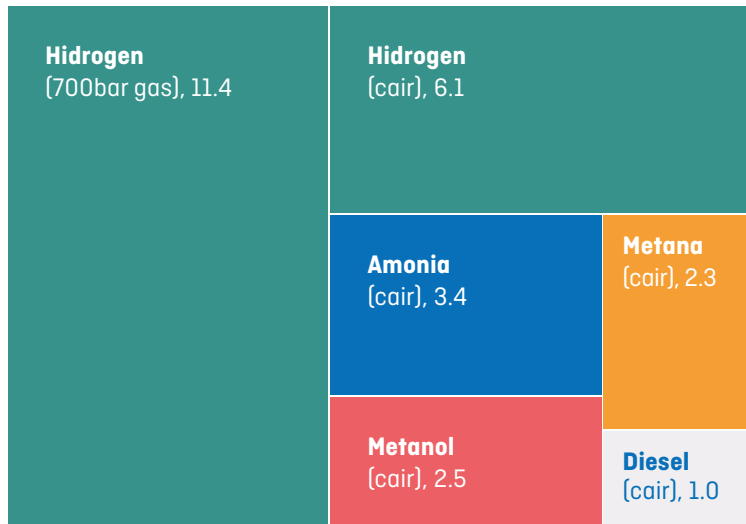
Indonesia terletak di jalur pelayaran yang sibuk dengan lalu lintas kapal internasional yang melewati Nusantara, terutama melalui Selat Sunda dan Selat Malaka; menghubungkan Samudra Hindia dengan Pasifik. Akibatnya, Indonesia memiliki hubungan perdagangan yang kuat dengan pasar Asia seperti Cina dan Jepang serta pesisir barat Benua Amerika. Selain itu, Indonesia adalah tetangga Singapura yang merupakan *hub* maritim global dan pasar bahan bakar nirkarbon yang potensial.

Secara global, hidrogen hijau dan amonia hijau telah muncul sebagai bahan bakar penting untuk dekarbonisasi pelayaran. Menyelaraskan pemilihan bahan bakar dengan seluruh dunia berarti bahwa kapal-kapal internasional dapat melakukan *bunkering* di Indonesia dan pengembangan teknologi kapal dan bunker akan tersedia secara komersial untuk pasar global. Agar hal ini dapat terjadi, perlu ada insentif pasar yang memadai untuk menarik kapal-kapal internasional. Sementara bahan bakar hayati berkualitas tinggi dan berkelanjutan kemungkinan akan menjadi komoditas yang semakin penting di masa depan, sumber bahan baku berkelanjutan terbatas untuk memproduksi bahan bakar hayati di seluruh dunia. Ini berarti bahwa bahan tersebut kemungkinan tidak akan digunakan untuk sebagian besar pelayaran internasional. Di mana diperoleh secara hati-hati dan berkelanjutan, bahan bakar hayati dapat digunakan untuk mendukung aplikasi pelayaran tertentu atau rute pelayaran domestik.

Kesesuaian bahan bakar untuk berbagai aplikasi

Karakteristik utama bahan bakar yang menentukan kesesuaiannya untuk aplikasi yang berbeda adalah kepadatan energi; jumlah energi yang dapat diberikan per satuan volume. Kepadatan energi yang lebih rendah artinya kapal tidak akan dapat melakukan perjalanan lebih jauh dengan ukuran tangki bahan bakar yang sama dan harus berhenti untuk mengisi bahan bakar lebih sering. Bagan 3 menunjukkan perbandingan kepadatan energi berbagai bahan bakar relatif terhadap diesel, yang menunjukkan bahwa bahan bakar nirkarbon (hidrogen dan amonia) memiliki kepadatan energi lebih rendah daripada bahan bakar yang mengandung karbon.

Bagan 3: Volume penyimpanan relatif yang dibutuhkan untuk berbagai bahan bakar pelayaran (termasuk tangki, relatif terhadap diesel) [14]



Kepadatan energi sistem propulsi berbasis baterai (tidak ditunjukkan dalam Bagan 3) adalah sekitar seperempat dari sistem hidrogen gas [15]. Ini berarti bahwa teknologi baterai saat ini hanya cocok untuk kapal lebih kecil yang membutuhkan lebih sedikit energi, dan di mana volume kapal tidak terlalu menjadi kendala. Bagi kapal yang lebih besar, dan khususnya kapal internasional, amonia hijau kemungkinan adalah bahan bakar nirkarbon yang paling cocok karena memiliki kepadatan energi yang lebih tinggi.

Bahan bakar hayati umumnya berupa bio-diesel, bio-etanol, atau bio-metana, memiliki kepadatan energi yang tinggi relatif terhadap bahan bakar hijau atau baterai, dan merupakan pengganti yang lebih langsung untuk bahan bakar berbasis fosil. Lampiran A menjelaskan analisis multi-kriteria dari berbagai bahan bakar nir- dan rendah karbon yang dilakukan untuk mendukung proyek ini.

Pola pelayaran

Lokasi pelabuhan dan jumlah serta jenis kapal yang mengunjunginya merupakan faktor penting dalam memahami pemilihan bahan bakar dan desain solusi infrastruktur. Beberapa aplikasi pelayaran akan lebih cocok untuk adopsi cepat bahan bakar rendah karbon baru.

Kapal yang melakukan perjalanan teratur antara sejumlah kecil pelabuhan besar sangat cocok untuk penerapan awal bahan bakar rendah karbon karena pelabuhan yang lebih besar lebih mungkin untuk dapat menyediakan *bunkering* yang diperlukan, dan investasinya akan didukung oleh permintaan reguler. Kapal yang berbasis di satu atau dua pelabuhan lokal, seperti kapal tunda, feri, dan layanan lepas pantai, dapat memperoleh manfaat dari ketersediaan bahan bakar nirkarbon untuk kapal yang lebih besar, atau mungkin dapat beroperasi dengan daya baterai.

Kapal yang singgah di pelabuhan yang lebih banyak dan lebih kecil mungkin akan lebih sulit menemukan pelabuhan yang dapat memasok bahan bakar baru tersebut, sehingga kemungkinan akan mengadopsi bahan bakar nirkarbon belakangan.



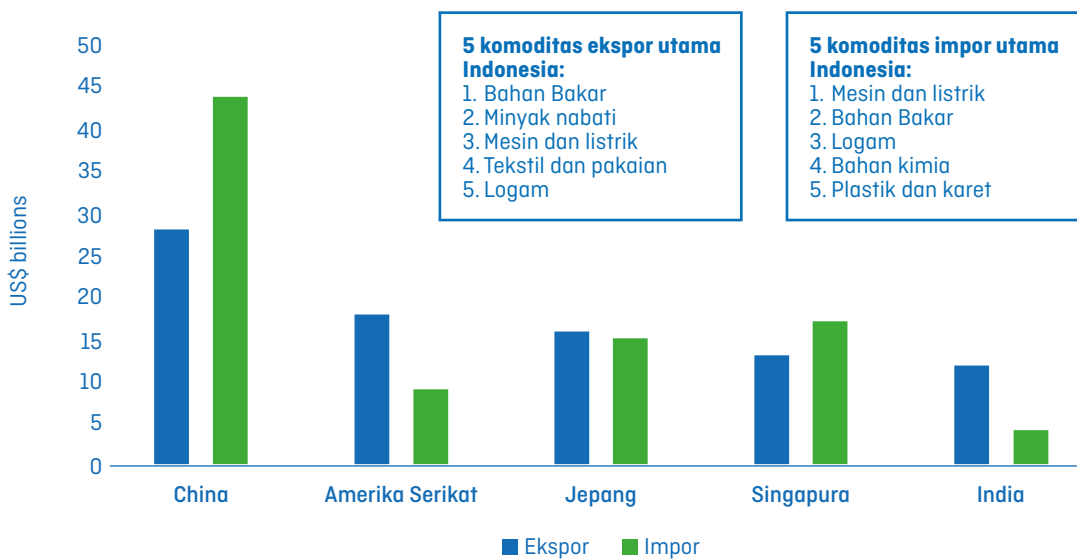
Bagian 4

Sektor pelayaran Indonesia signifikan dan beragam; dari kapal internasional besar di rute pelayaran yang padat hingga kapal domestik kecil antarpulau

Indonesia terletak sepanjang dua jalur pelayaran terpenting di dunia, yaitu Selat Malaka dan Selat Sunda. Posisi ini memberikan potensi untuk menjadi *hub* bagi kapal internasional yang melintas antara ekonomi-ekonomi terbesar dunia. Mitra dagang terbesar Indonesia adalah Cina, Singapura, Jepang, dan Amerika Serikat.

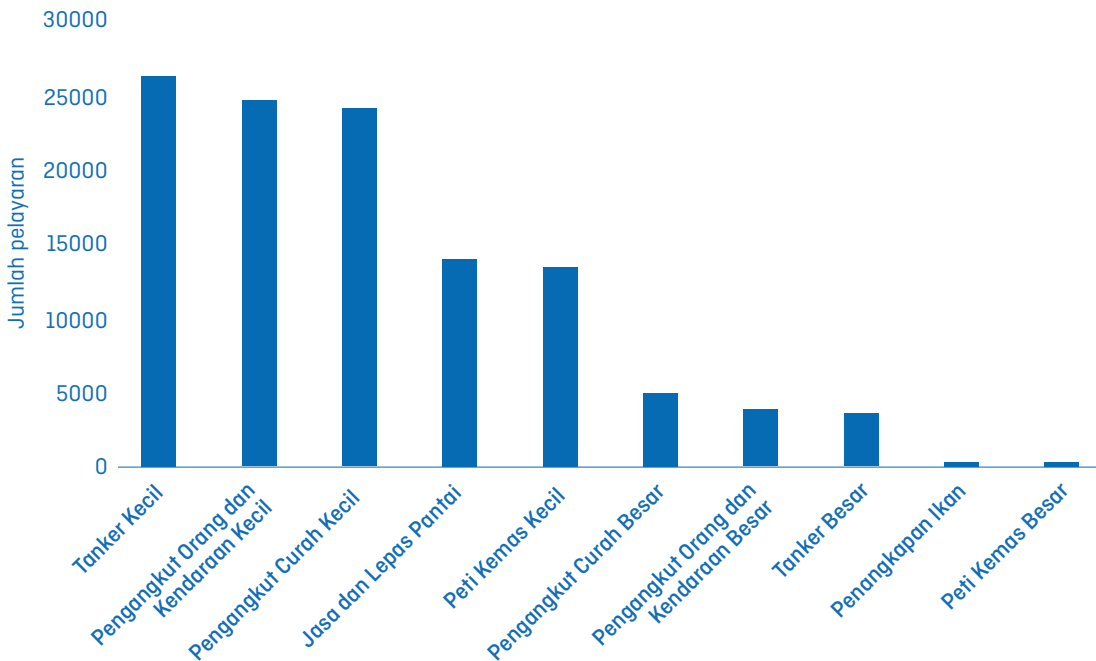
Indonesia merupakan pengeksportor besar batu bara dan minyak mentah. Keduanya adalah bahan bakar komoditas ekspor utama Indonesia dari segi nilai, di mana Indonesia sebelumnya adalah anggota Organization of Petroleum Exporting Countries (OPEC). Indonesia mengeksportor bahan bakar fosil senilai US\$ 42 miliar pada tahun 2018 (tahun terakhir angka tersebut tersedia).

Lampiran 4: Mitra dagang terbesar Indonesia dari segi ekspor dan impor (WITS World Bank)



Bagan 5 menunjukkan jumlah perjalanan pelayaran dari pelabuhan Indonesia selama setahun berdasarkan data pelacakan kapal Automatic Identification System (AIS). Data ini hanya mencakup kapal lebih besar yang masuk dalam sistem pelacakan internasional. Kategori kapal didefinisikan lebih rinci dalam Lampiran C. Ada juga sejumlah besar kapal yang lebih kecil dan tidak dilacak (<20 GT) di Indonesia, termasuk kapal penangkap ikan kecil, kapal industri dan kapal pribadi. Diperkirakan terdapat lebih dari 700.000 kapal jenis ini di Indonesia. Tidak ada data pelacakan yang tersedia untuk kapal-kapal ini, namun mereka adalah bagian penting dari sektor pelayaran Indonesia, serta merupakan bagian penting dari permintaan bahan bakar.

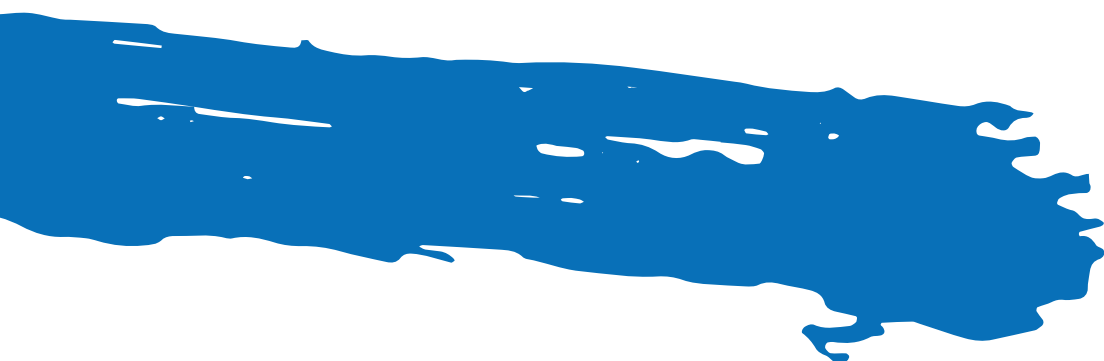
Bagan 5: Keberangkatan internasional dan domestik Indonesia berdasarkan kategori kapal (data AIS, mencakup kapal besar yang dilacak secara internasional) lihat Lampiran C untuk definisi kategori kapal



Indonesia merupakan negara pelayaran yang aktif, sebagaimana tergambar dari jumlah dan ragam jenis kapal yang mengunjungi pelabuhannya. Mayoritas lalu lintas kapal Indonesia terdiri dari pengangkut orang dan kendaraan kecil, kapal tanker, peti kemas dan pengangkut muatan curah.

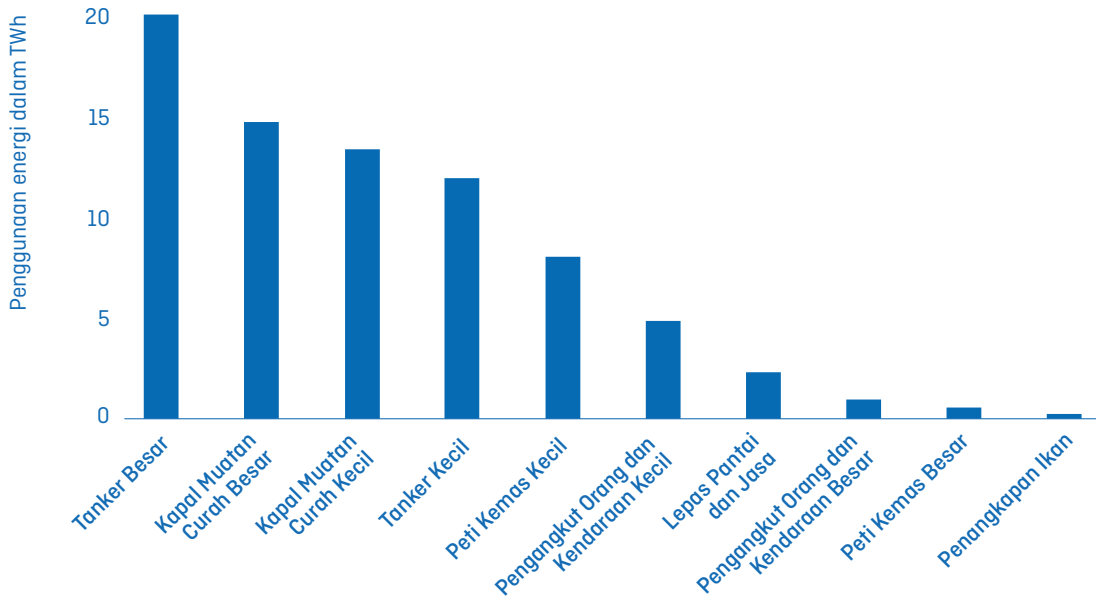
Jenis kapal dengan jumlah tertinggi perjalanan berangkat dari pelabuhan di Indonesia adalah pengangkut orang dan kendaraan kecil, kemungkinan besar kapal pengangkut orang antarpulau yang mengunjungi pelabuhan yang sama dan sering. Jenis berikutnya adalah kapal tanker kecil yang mengirimkan bahan bakar lintas pulau dan kapal muatan curah kecil yang mengangkut barang.

Kapal penangkap ikan komersial besar menyumbang sedikit dari total lalu lintas Indonesia – karena sebagian besar penangkapan ikan di Indonesia dilakukan dengan kapal kecil (lebih dari 80% dari semua kapal penangkap ikan) yang tidak dilengkapi pelacakan AIS, sehingga tidak muncul dalam data ini [17].



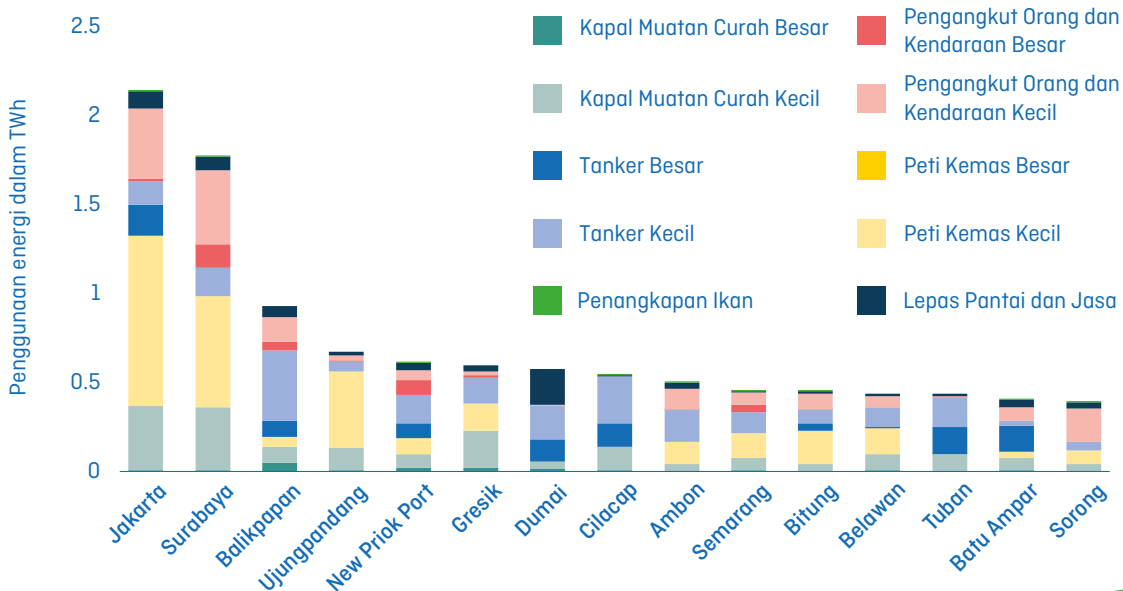
Bagan 6 menunjukkan jumlah bahan bakar, yang ditunjukkan dalam energi bahan bakar (terawatt jam, TWh) yang digunakan di seluruh Indonesia berdasarkan masing-masing kategori kapal. Empat kategori teratas untuk konsumsi energi adalah kapal tanker kecil, kapal muatan curah, kapal peti kemas dan kapal pengangkut orang dan kendaraan.

Bagan 6: Penggunaan energi bahan bakar sektor pelayaran Indonesia, termasuk keberangkatan internasional dan domestik berdasarkan kategori kapal (data AIS, penangkapan kapal besar yang dilacak secara internasional) [16] lihat Lampiran C untuk definisi kategori kapal

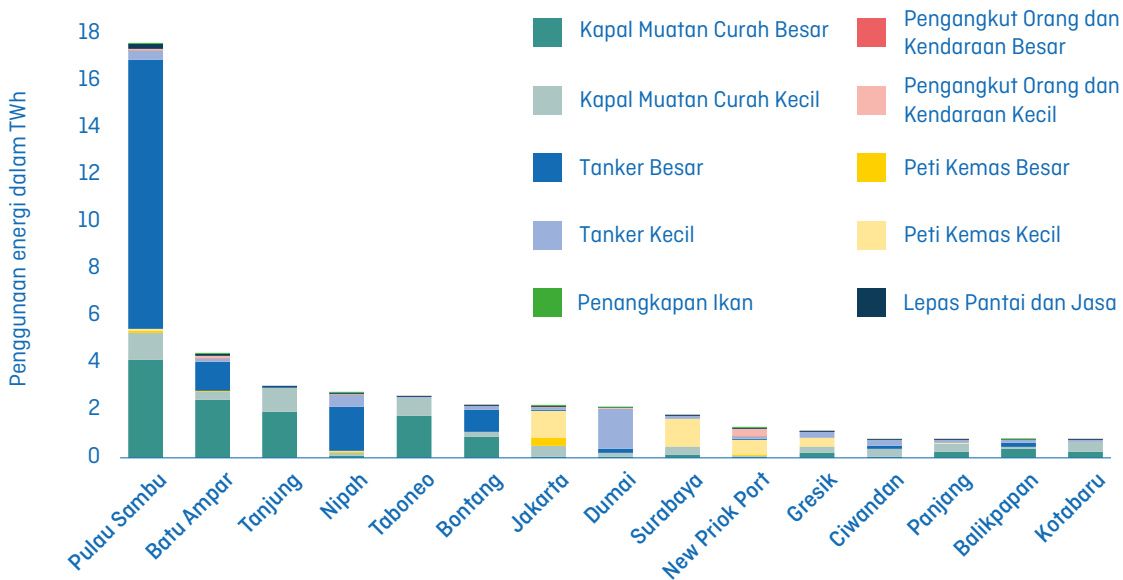


Bagan 7 dan 8 menunjukkan penggunaan energi bahan bakar oleh kapal domestik dan internasional di 15 pelabuhan tersibuk di Indonesia, sekali lagi, menggunakan data pelacakan AIS. Total ada lebih dari 160 pelabuhan di Indonesia. Sebagian besar pelabuhan tersebut dikunjungi sangat sedikit kapal, sehingga kebutuhan bahan bakarnya juga sangat sedikit dibandingkan dengan beberapa pelabuhan terbesar yang ditunjukkan pada Bagan 7 dan 8.

Bagan 7: Penggunaan energi bahan bakar menurut kategori kapal untuk keberangkatan domestik, menunjukkan 15 pengguna energi terbesar di Indonesia (data AIS, mencakup kapal besar yang dilacak secara internasional) [16]



Bagan 8: Penggunaan energi bahan bakar menurut kategori kapal untuk keberangkatan internasional, menunjukkan 15 pengguna energi terbesar di Indonesia (data AIS, mencakup kapal besar yang dilacak secara internasional) [16]



Pelabuhan Jakarta dan Surabaya merupakan pelabuhan terbesar di Indonesia dalam hal konsumsi energi dan jumlah pelayaran untuk keberangkatan domestik, yang terutama terdiri dari peti kemas dan pengangkut orang dan kendaraan. Pelabuhan Jakarta lebih khusus untuk kargo peti kemas, dan melayani kapal tanker muatan curah cair dan kering yang relatif lebih sedikit. Pelabuhan Surabaya memiliki posisi yang strategis dan menguntungkan sebagai simpul wilayah pelosok, serta merupakan pusat pelayaran antar pulau untuk kawasan timur Indonesia.

Pulau Sambu dan Batu Ampar, yang terletak sepanjang rute internasional Selat Malaka dan dekat dengan Singapura, merupakan dua pelabuhan terbesar dari segi penggunaan energi dan jumlah pelayaran untuk keberangkatan internasional, di mana kapal muatan curah, peti kemas, dan kapal tanker mewakili sekitar 95% dari total permintaan energi untuk keberangkatan internasional dari kedua pelabuhan tersebut.

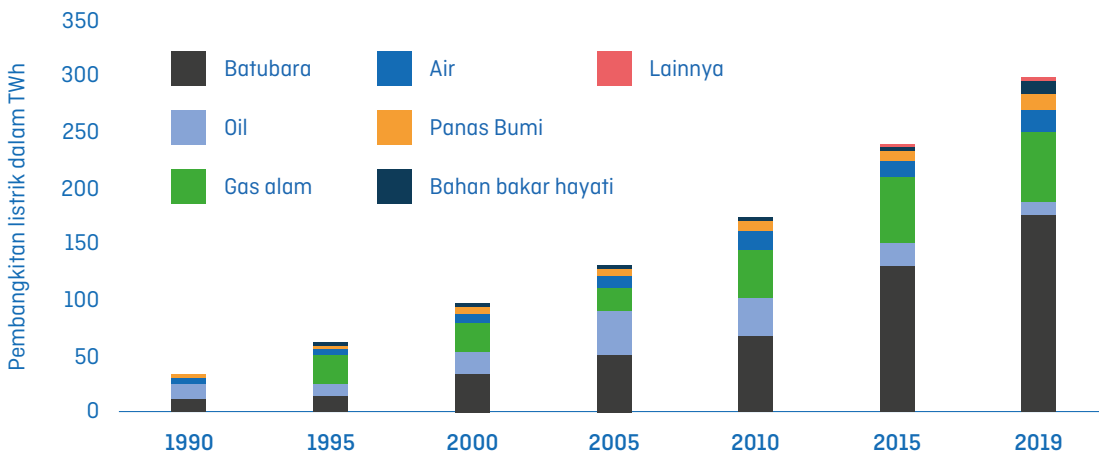
Bagian 5

Indonesia sangat bergantung pada batu bara dan gas alam untuk pembangkit listrik, dengan peningkatan sedang dalam pembangkit terbarukan belakangan ini

Bahan bakar fosil tetap menjadi sumber utama bahan bakar untuk produksi energi Indonesia (86,7% pada tahun 2020). Tenaga air telah berkontribusi pada bauran energi selama beberapa dekade, dan belakangan ini ada perkembangan dalam penggunaan panas bumi dan bahan bakar hayati. Terlepas dari itu, penggunaan batu bara dan gas alam juga meningkat substansial untuk memenuhi permintaan listrik Indonesia yang terus meningkat. Sangat mungkin bahwa batubara dianggap sebagai cara tercepat, termudah dan termurah untuk menyediakan listrik bagi jutaan orang [18]; Indonesia memiliki plafon untuk harga batubara, sehingga pembangkitan listrik seperti ini sangat menarik secara ekonomi dibandingkan dengan sumber lain.

Pembangkitan listrik terbarukan dan rendah karbon meningkat sedang dari basis yang rendah, khususnya produksi bioenergi dan panas bumi. Peningkatan bioenergi ini disebabkan oleh pertumbuhan biodiesel (B20, B30) yang dihasilkan dari minyak sawit mentah konvensional. Ini mencapai 16% dari total pembangkitan listrik pada 2019 [19].

Bagan 9: Bauran pembangkitan listrik historis di Indonesia

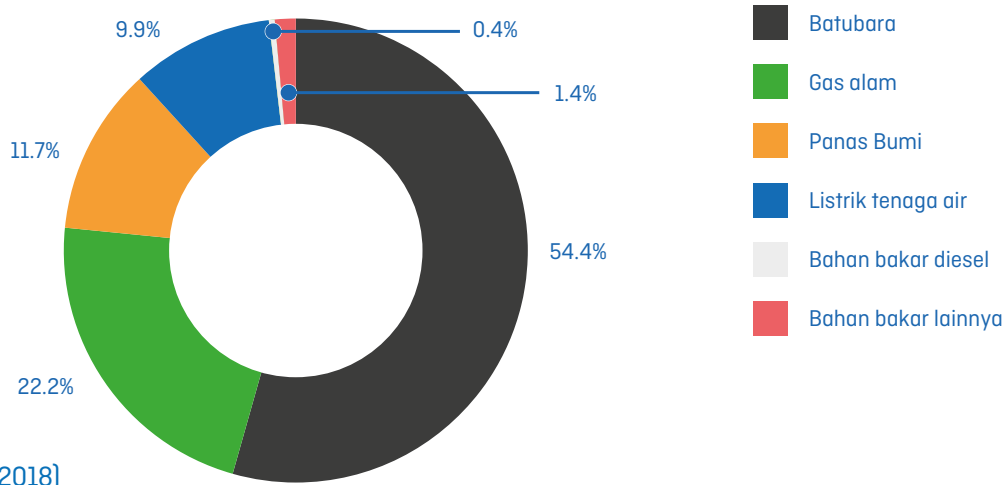


Karena pesatnya industrialisasi dan urbanisasi di Indonesia, permintaan listrik diprediksi akan meningkat tiga kali lipat dari tahun 2015 hingga 2030. Indonesia menjadi konsumen listrik terbesar di Asia Tenggara, dan pertumbuhan ini didorong oleh pertumbuhan populasi, kelas menengah baru, dan elektrifikasi rumah tangga non-listrik.

Agar Indonesia dapat mencapai elektrifikasi universal pada 2026, diperkirakan akan dibutuhkan pembangkit tambahan sebesar 80GW dengan biaya sekitar US\$155 miliar. Perusahaan Listrik Negara Indonesia (PLN) saat ini hanya berencana untuk menambah kapasitas pembangkit 35GW ke jaringannya pada 2029, yang 57% di antaranya akan berasal dari batubara [20].

Indonesia memiliki beberapa target pembangkit terbarukan dan pengurangan emisi. Rencana Umum Energi Nasional memasang target ambisius untuk meningkatkan kapasitas pembangkit listrik terbarukan dari 9GW pada 2018 (12,5% dari total kapasitas pembangkit) menjadi 45GW pada 2025 (23% dari total kapasitas pembangkit).

Bagan 10: Prediksi bauran pembangkit listrik untuk Indonesia pada 2025



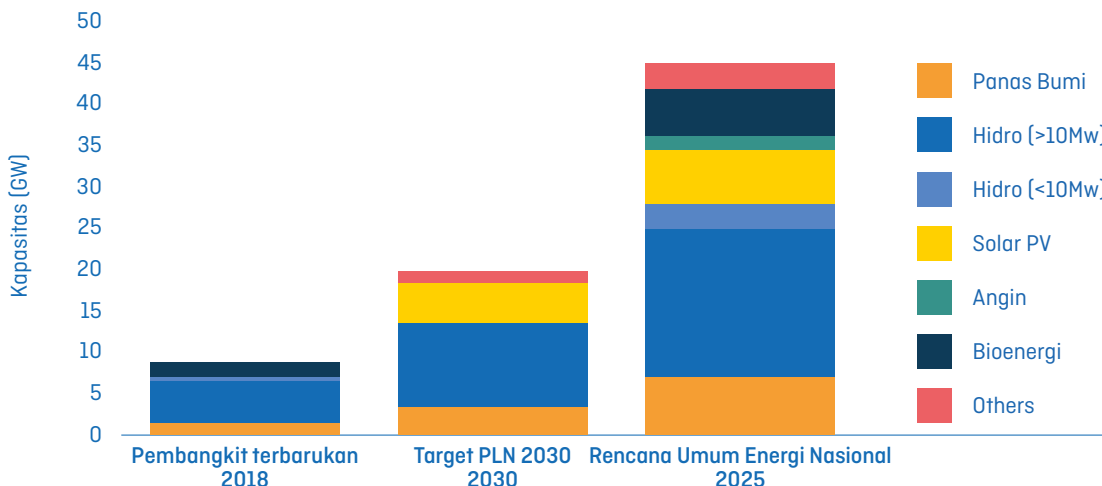
PLN memiliki rencana sepuluh tahun lebih sederhana yang mencakup tambahan kapasitas 20,9GW pada 2030. Proyeksi saat ini menunjukkan bahwa Indonesia kemungkinan tidak akan memenuhi target pembangkit terbarukan tersebut [19].

Geografi Indonesia yang tersebar di banyak pulau menghasilkan lebih dari 600 sistem jaringan yang terisolasi, dan akses listrik antarpulau dan antarlokasi tidak konsisten [21]. Misalnya, elektrifikasi Papua kurang dari 40% sementara Jakarta hampir 100%. Ini berarti sulit untuk menggeneralisasi kondisi jaringan dan mengembangkan kebijakan yang sesuai di seluruh negeri. Ada rencana untuk meningkatkan interkoneksi antarpulau di Indonesia, dan mencapai akses listrik universal pada 2024. Peningkatan akses ini kemungkinan akan sangat bergantung pada "jaringan mikro" yang membutuhkan sistem pembangkit terisolasi *off-grid*, alih-alih melalui jaringan yang terhubung secara nasional [22].

Hambatan lain dalam adopsi pembangkit terbarukan adalah penggunaan lahan. Sudah ada ketegangan antara pertumbuhan populasi, pertumbuhan ekonomi, dan habitat alami di Indonesia. Penting untuk diperhatikan bahwa perubahan penggunaan lahan langsung dan tidak langsung dipertimbangkan secara hati-hati ketika mengidentifikasi solusi pembangkit listrik terbarukan.

Bioenergi digunakan di beberapa sektor (industri, bangunan dan transportasi), termasuk dalam bentuk bahan bakar hayati untuk transportasi dan pembangkit. Bioenergi terutama berasal dari kelapa sawit yang sendirinya memiliki implikasi lingkungan dari perubahan penggunaan lahan [22].

Bagan 11: Target kapasitas energi terbarukan Indonesia dari PLN dan Rencana Umum Energi Nasional dibandingkan dengan pembangkit terbarukan aktual pada 2018



Bagian 6

Potensi sumber daya terbarukan Indonesia beragam namun terbatas untuk menghasilkan bahan bakar untuk sektor pelayaran

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang terbatas karena ketersediaan lahan, kelayakan pengembangan lokasi dan jaringan yang belum saling tersambung di seluruh negeri. Total, Indonesia diperkirakan memiliki potensi untuk menghasilkan antara 830TWh dan 1.873TWh energi terbarukan setiap tahun dari panas bumi, tenaga air, pasang surut, angin dan matahari yang dapat dieksploitasi, seperti yang dijelaskan dalam Bagan 12.



Bagan 12: Potensi energi terbarukan Indonesia berdasarkan berbagai sumber daya

Angin

Indonesia memiliki potensi angin darat sebesar 9,3GW (10TWh/tahun). Sebagian besar terletak sepanjang pesisir selatan Indonesia. Sedangkan untuk angin lepas pantai tetap, potensi Indonesia terbatas karena terbatasnya sumber daya angin dan dalamnya perairan di lepas pantai. Namun, ada potensi yang lebih besar ketika pembangun tenaga angin lepas pantai terapung akan lebih matang secara komersial di tahun-tahun mendatang [36]. Teknologi angin lepas pantai lebih kompleks dan mahal daripada teknologi angin darat, dan pengembangan angin lepas pantai perlu dirancang dengan mempertimbangkan faktor lingkungan dan cuaca, dan dihubungkan dengan penilaian dampak lingkungan yang ekstensif.

Surya

Indonesia memiliki potensi tenaga surya yang baik sebesar 4,8kWh/m²/hari karena variabilitas musim yang rendah. Estimasi potensi tenaga surya di Indonesia bervariasi. Satu studi oleh IRENA memperkirakan total potensi kapasitas 500GW, sementara studi lain oleh IESR memperkirakan kapasitas potensial 1.492GW [36] [37]. Perbedaan tersebut kemungkinan disebabkan oleh asumsi pertimbangan penggunaan lahan dan ketersediaan serta kemajuan teknologi surya selama dekade berikutnya. Ini berarti antara 525TWh [36] hingga 1.568TWh pembangkitan energi per tahun [37]. Studi lain baru-baru ini menyoroti potensi sumber daya surya melebihi angka yang disebutkan sebelumnya [42]. Jika sumber daya tambahan ini dapat diakses, maka akan ada manfaat dekarbonisasi pasokan energi yang signifikan di Indonesia, serta peluang untuk pembangkitan dan penciptaan bahan bakar nirkarbon. Namun, setiap infrastruktur energi terbarukan harus dikembangkan dengan cara yang peka terhadap lingkungan, menghindari perubahan penggunaan lahan dari pertanian atau hutan penghasil pangan.

Pasang Surut

Walaupun beberapa teknologi pembangkit pasang surut dan gelombang belum matang, sumber daya ini berpotensi menjadi lebih andal dalam waktu dekat. Indonesia memiliki potensi pasang surut yang baik dengan kapasitas 18GW yang dapat digunakan di dekat pelabuhan, sehingga memudahkan produksi bahan bakar hijau. Potensi ini setara energi 47TWh per tahun [38].

Panas Bumi

Indonesia memiliki 40% cadangan energi panas bumi dunia berkat kehadiran gunung berapi yang aktif. Potensi panas bumi yang diketahui dan dapat dikembangkan di Indonesia adalah sebesar 133TWh/tahun dari kapasitas 19GW [37].

Tenaga Air

Tenaga air saat ini merupakan sumber pembangkit terbarukan terbesar di Indonesia. Pembangkit listrik tenaga air yang akan dikembangkan di Indonesia harus dipertimbangkan di mana dampak terhadap lingkungan rendah, dan mudah diakses. Berdasarkan hal tersebut dan lokasi potensial yang relatif mudah untuk dikembangkan, terdapat 105TWh/tahun potensi tenaga air di Indonesia [39].

Total energi terbarukan yang diperlukan untuk mendukung penerapan 5% bahan bakar hijau nirkarbon (hidrogen atau amonia) di seluruh armada pelayaran Indonesia diperkirakan berjumlah sekitar 8.3TWh/tahun. Ini adalah kebutuhan energi yang kecil jika dibandingkan dengan potensi energi terbarukan di Indonesia, namun menjadi lebih signifikan seiring meningkatnya adopsi menuju 100%.

Potensi energi terbarukan ini juga harus dimanfaatkan untuk mendukung dekarbonisasi pasokan energi domestik Indonesia. Permintaan listrik dari jaringan diharapkan berada pada kisaran 500 hingga 950TWh pada 2030. Jika permintaan ini sebagian besar akan didekarbonisasi, yang merupakan tujuan yang hendak dicapai, akan ada energi terbarukan terbatas yang tersedia untuk penggunaan lain seperti pelayaran, dan ketersediaan ini diperkirakan akan sangat terlokalisasi.

Pembangkit listrik terbarukan yang diperlukan untuk mendukung 5% adopsi teknologi kapal nirkarbon pada tahun 2030:

~8.3TWh/tahun

Potensi investasi infrastruktur untuk mendukung 5% adopsi teknologi kapal nirkarbon pada tahun 2030
(lihat Lampiran D):

45,9 – 65,4 milyar rupiah (USD 3,18 – 4,53 juta)

Kebutuhan listrik nasional Indonesia pada tahun 2030
diperkirakan sebesar:

500 – 950TWh/tahun

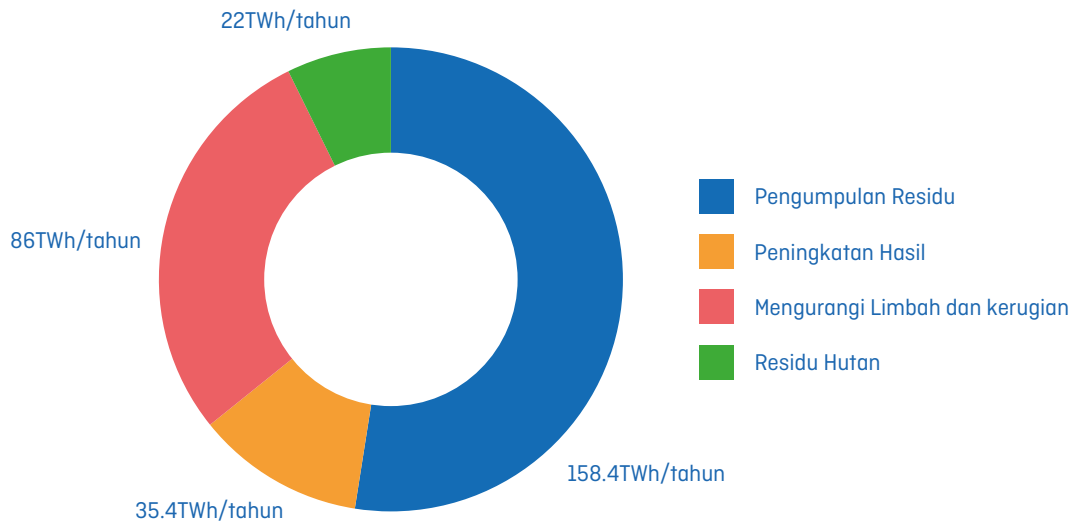
Potensi tenaga terbarukan Indonesia:

830 – 1873TWh/tahun

Indonesia memiliki potensi aliran biomassa limbah, termasuk dari kehutanan, pertanian, dan limbah rumah tangga. Pemerintah Indonesia berencana untuk memanfaatkan 22% dari potensi bahan bakar hayati ini pada tahun 2030, dengan 60% untuk pembangkit listrik yang terhubung ke jaringan dan 40% untuk pembangkit listrik *captive off-grid*. Setiap produksi bahan bakar pelayaran perlu melengkapi rencana pemerintah Indonesia saat ini, alih-alih bersaing atau bertentangan, untuk memastikan tidak ada risiko dekarbonisasi menyeluruh dari sektor energi dan transportasi domestik Indonesia.

Potensi sumber daya dari aliran limbah diperkirakan 302TWh/tahun [23]. Angka ini dihitung berdasarkan aliran bahan baku berkelanjutan yang potensial, termasuk pengumpulan residu pertanian, peningkatan hasil panen melalui intensifikasi pertanian berkelanjutan, sumber daya hayati dari lahan yang dibebaskan melalui pengurangan kerugian dan limbah dalam rantai nilai dan residu dari hutan produktif. Potensi bahan bakar hayati yang sebenarnya akan tergantung pada jalur proses mana bahan baku tersebut dimasukkan dan bahan bakat hayati yang kemudian dihasilkan. Untuk kepentingan perhitungan ini, potensi bahan baku teoretis telah dikurangi dengan inefisiensi logistik, dan setelahnya faktor 40% dihitung untuk efisiensi proses. Lampiran F mencantumkan kemungkinan bahan baku dan proses yang diperlukan untuk memproduksi biodiesel, bioetanol, minyak nabati, dan biometana.

Bagan 13: Potensi pembangkit Indonesia dari bahan bakar hayati canggih



Bagian 7

Indonesia memiliki beberapa pilihan untuk memasok bahan bakar rendah karbon bagi industri maritimnya

Ada beberapa opsi dan peluang untuk mengisi bahan bakar kapal yang mengunjungi pelabuhan Indonesia menggunakan bahan bakar nir- dan rendah karbon. Solusi akhirnya kemungkinan adalah kombinasi dari opsi-opsi tersebut.

Adopsi energi terbarukan dengan volume tinggi

Jika Indonesia mampu memanfaatkan hampir seluruh potensi energi terbarukan sebesar 1.873TWh, maka Indonesia akan dapat sepenuhnya mendekarbonisasi jaringan. Selain itu, akan ada sekitar 1.000TWh yang dapat digunakan dalam aplikasi seperti industri, transportasi darat. Kemudian, pelayaran domestik dan internasional dapat didekarbonisasi melalui konversi ke hidrogen dan amonia hijau, atau di mana memungkinkan, melalui elektrifikasi langsung menggunakan kapal bertenaga baterai. Potensi energi terbarukan teoretis ini tidak mungkin dapat dicapai secara penuh, karena akan ada sebagian yang tidak layak akibat kendala lahan, kendala praktis atau dampak lingkungan yang tidak diinginkan. Energi yang tersedia dapat ditambah dengan teknologi baru seperti pembangkit tenaga angin lepas pantai terapung dan peningkatan efisiensi pembangkitan yang ada melalui pendekatan yang lebih baik. Opsi ini akan menjadikan Indonesia mandiri energi, mendukung upaya dekarbonisasi yang ada, menggerakkan kapal dengan bahan bakar hijau nirkarbon, serta memenuhi ambisi untuk menjadi pusat bunker untuk pelayaran internasional nirkarbon karena lokasi geografis Indonesia.

Jaringan mikro terbarukan lokal

Indonesia memiliki peluang signifikan untuk menyebarkan energi terbarukan luar jaringan (*off grid*) di perdesaan; lebih dari 12.000 desa di seluruh Indonesia saat ini belum teraliri listrik (EIC). Ada potensi untuk membangun sistem energi komunitas lokal di area ini untuk memasok rumah lokal, bangunan warga dan bisnis, kemudian untuk mengisi daya kapal bertenaga baterai skala kecil lokal untuk kapal penangkap ikan atau transportasi antar pulau. Pengisian listrik langsung kemungkinan akan menurunkan biaya bahan bakar untuk kapal, yang selanjutnya mendukung ekonomi di desa-desa terpencil ini. Kapal-kapal yang lebih kecil inilah yang paling cocok untuk teknologi tenaga baterai, yang tidak akan cocok untuk kapal yang lebih besar yang berlayar lebih lama.

Mengimpor listrik hijau untuk bahan bakar

Jika Indonesia mengimpor listrik dari negara tetangga, listrik ini bisa digunakan untuk menghasilkan bahan bakar hijau. Ini akan menjadi proyek yang sangat besar dan akan membutuhkan banyak infrastruktur. Investasi yang diperlukan untuk interkoneksi listrik akan sangat besar, dan kelayakan ekonominya harus dipertimbangkan dengan cermat.

Interkonektor mana pun kemungkinan besar akan dikembangkan berdasarkan alasan bisnis yang jauh lebih luas daripada sekadar memasok bahan bakar untuk sektor pelayaran Indonesia, dan kemungkinan besar akan digerakkan oleh manfaat bersama antara negara-negara tetangga yang terkoneksi. Ada beberapa studi kelayakan yang sedang dilakukan untuk pembangunan jaringan listrik antarbenua pertama di dunia, menghubungkan Australia ke Singapura untuk memasok energi terbarukan [24]. Interkonektor ini direncanakan akan melewati kepulauan Indonesia, yang dapat memberikan tambahan kapasitas energi terbarukan yang dibutuhkan Indonesia untuk sepenuhnya mendekarbonisasi jaringannya serta menghasilkan bahan bakar nirkarbon untuk kapal domestik dan internasional.

Adanya interkonektor ke Jakarta akan memungkinkan bahan bakar diproduksi dan dikirim ke seluruh Indonesia. Ini berarti bahwa Indonesia tidak akan dibatasi oleh potensi energi terbarukan lokal yang terbatas. Ini mungkin dapat menjadi opsi yang sangat baik jika hanya perkiraan batas bawah potensi energi terbarukan yang dapat dicapai, dan ini akan memberikan peluang untuk mengembangkan industri produksi bahan bakar pelayaran ramah lingkungan di Indonesia tanpa perlu menyediakan semua listrik ramah lingkungan dari sumber dalam negeri. Karena kehilangan hidrogen selama penyimpanan dan pengangkutan sulit dicegah, pilihan yang lebih baik kemungkinan adalah mengonversi ke amonia hijau pada titik produksi sebelum transportasi.

Mengimpor bahan bakar hijau untuk memasok pelabuhan bunker

Pelabuhan bunker utama Indonesia dapat menggunakan bahan bakar impor dari pasar bahan bakar nirkarbon global yang sedang tumbuh. Ini akan memungkinkan Indonesia untuk melayani sektor pelayarannya yang berkembang pesat dengan bahan bakar nirkarbon tanpa perlu bergantung pada pasokan energi terbarukan atau produksi bahan bakar dalam negeri. Ini dapat digunakan bersama dengan produksi dalam negeri untuk melengkapi pasokan bahan bakar untuk adopsi internasional skala besar. Karena kesulitan dalam mencegah kehilangan hidrogen selama penyimpanan dan pengangkutan, pendekatan ini mungkin paling cocok untuk amonia hijau.

Penggunaan bahan bakar hayati yang terbatas dari bahan baku limbah yang berkelanjutan

Indonesia memiliki pilihan untuk menggunakan kapabilitas penyediaan bahan bakar hayati yang sudah mapan untuk mendukung dekarbonisasi industri maritim. Pilihan ini hanya perlu menggunakan bahan bakar hayati berkelanjutan dari limbah atau sumber lain yang memadai dan sudah memiliki jalur pasokan berkelanjutan hingga penggunaan akhir yang sudah memperhitungkan emisi karbon sepanjang siklus hidup. Pasokan ini kemungkinan tidak akan tersedia pada skala yang dibutuhkan untuk memasok bahan bakar pelayaran dalam proporsi signifikan, terutama karena pemerintah Indonesia telah mulai menggunakan bahan bakar hayati untuk transportasi jalan dan energi. Kemudian, bahan bakar hayati yang berkelanjutan akan menjadi komoditas yang berharga dengan sendirinya, dan dapat diekspor ke pasar internasional dan menciptakan aliran permintaan lain untuk bahan bakar hayati.

Bagian 8

Adopsi bahan bakar rendah karbon dapat memberikan manfaat yang lebih luas

Dekarbonisasi sektor pelayaran di Indonesia dapat memberikan manfaat tambahan yang lebih luas untuk pembangunan berkelanjutan, termasuk penciptaan lapangan kerja ramah lingkungan untuk mendukung transisi yang adil, mendukung akses ke permintaan global akan produk dan komoditas ramah lingkungan, dan memungkinkan dekarbonisasi yang lebih luas jauh di luar sektor pelayaran.

Elektrifikasi melalui pembangkit tenaga terbarukan

Diasumsikan bahwa, di masa depan, jaringan mini yang dipasok oleh bauran pembangkit tenaga terbarukan akan dikembangkan untuk melayani masyarakat terpencil di Indonesia. Ini akan memungkinkan pemanfaatan sumber daya alam lokal untuk melayani masyarakat dan industri, serta menyediakan penggerak nirkarbon yang andal untuk kapal penangkap ikannya.

Di pulau-pulau terpencil di luar Jawa dan Bali, listrik banyak dihasilkan menggunakan bahan bakar diesel yang mahal dengan cara yang relatif tidak efisien. Cara ini mahal, menambah beban subsidi pemerintah untuk memasok bahan bakar diesel, mengambil sumber daya dari perbaikan infrastruktur. Pengembangan jaringan mini yang terisolasi akan memberdayakan masyarakat lokal dengan memasok energi mereka sendiri untuk kapal komersial dan domestik serta rumah dan bisnis; menciptakan aliran pendapatan tambahan dan pekerjaan ramah lingkungan yang terampil. Hal ini juga mendukung tujuan elektrifikasi dan dekarbonisasi Pemerintah Indonesia.

Penciptaan pekerjaan ramah lingkungan pada seluruh tingkat keterampilan dan pendidikan

Mengingat bahwa berbagai ekonomi lokal diharapkan untuk bertransisi dari ekonomi berbasis bahan bakar fosil ke ekonomi yang lebih tidak padat karbon, penting untuk mempertimbangkan konsep transisi yang adil di mana mereka yang akan terkena dampak transisi ini akan didukung. Ini termasuk perorangan dan masyarakat yang bergantung pada industri ini untuk pekerjaan dan ekonomi mereka, serta masyarakat lokal dan adat yang mungkin terdampak negatif oleh perkembangan ini.

Produksi bahan bakar alternatif akan disertai dengan penciptaan berbagai pekerjaan dalam rantai pasokan bahan bakar nirkarbon. Seiring berkurangnya pekerjaan dalam industri ekstraksi, transportasi dan pembangkit listrik bahan bakar fosil, penciptaan pekerjaan dalam rantai pasokan yang berkelanjutan memainkan peran penting dalam mendukung transisi ini. Produksi batubara Indonesia sudah menurun dalam beberapa tahun terakhir. Meski dapat mendisrupsi ekonomi lokal, hal ini dapat membuka peluang yang lebih besar untuk menciptakan kapasitas lokal dan pekerjaan yang bertahan di masa depan, membawa pembangunan signifikan bagi Indonesia dan mendorong ekonomi hijau di sekitar pelabuhan. Hal ini berpotensi mengurangi kemiskinan dan ketimpangan secara signifikan, yang telah disorot sebagai hambatan untuk pembangunan berkelanjutan negara [25].

Mendapatkan manfaat dari permintaan global akan produk dan komoditas ramah lingkungan

Adopsi awal bahan bakar nirkarbon dapat menjadikan Indonesia sebagai pemimpin dunia dalam bunker bahan bakar ini. Indonesia dapat masuk ke pasar ini dengan memanfaatkan lokasinya di rute pelayaran utama serta mendiversifikasi industri maritim melalui dekarbonisasi kapal pesiar.

Kemampuan menawarkan hidrogen dan amonia hijau untuk kapal yang melakukan bunkering juga akan menempatkan Indonesia sebagai pemasok permintaan global yang terus meningkat akan produk "hijau". Seiring meningkatnya pasar untuk produk dan material ini, Indonesia akan mendapat keuntungan karena dapat menawarkan opsi tersebut bagi kapal-kapal.

Demikian pula, bahan bakar hijau dan rendah karbon dapat diadopsi di industri untuk menyediakan panas dan pembakaran industri, menggantikan opsi berkarbon tinggi. Contohnya adalah produksi baja hijau melalui hidrogen hijau. Konsumsi baja di Indonesia terus meningkat dan diproyeksikan hampir dua kali lipat pada tahun 2025 (21,4 juta ton) dibandingkan dengan tingkat konsumsi tahun 2016 (12,7 juta ton). Ini menunjukkan peluang pertumbuhan yang signifikan bagi produsen baja lokal [26]. Produk dan komoditas yang diproduksi menggunakan hidrogen hijau dapat langsung masuk ke pasar yang berkembang ini dan menawarkan alternatif yang lebih berkelanjutan. Produsen baja telah secara aktif berpartisipasi dalam dialog ini melalui asosiasi hidrogen lokal, yang dapat mendorong Indonesia memanfaatkan peluang ini dan peluang lainnya dalam teknologi dan barang terkait bahan bakar nirkarbon.

Menarik investasi asing dan swasta

Mendorong penggunaan energi terbarukan dalam skala besar dan membangun infrastruktur, rantai pasokan, dan kapasitas yang diperlukan untuk mengampu ekonomi *electrofuel* di Indonesia, dan menuai manfaat yang dibawa, akan membutuhkan volume investasi yang signifikan, 45.9 - 65.4 triliun rupiah (3.18 - 4.53 miliar USD) untuk penerapan 5% teknologi kapal nirkarbon pada tahun 2030. Karena sifat proyek-proyek ini, dan manfaat terkait untuk industri, pendanaan iklim internasional bermitra dengan sektor swasta domestik dan internasional dapat dimanfaatkan dan memainkan peran kunci, tidak hanya dalam memasok modal yang diperlukan, tetapi juga untuk mengalokasikannya secara efektif, sehingga turut mendorong kemajuan keberlanjutan dan sektor energi lokal.

Kesimpulan

Indonesia dapat mengadopsi bahan bakar pelayaran yang didekarbonisasi melalui bauran pembangkitan dan opsi pengisian bahan bakar. Dengan demikian, Indonesia akan mampu menawarkan bahan bakar ini menjawab permintaan yang meningkat dan bernilai di sektor pelayaran internasional, serta mendukung tujuan dekarbonisasi dan ekonomi di seluruh Indonesia.



Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang beragam namun terbatas. Terdapat pula potensi untuk memasok bahan bakar hayati dari sumber limbah yang berkelanjutan dan peka bagi lingkungan, meskipun potensi skala sumber ini terbatas. Perlu ada ambisi untuk menggunakan potensi ini juga untuk mendekarbonisasi pasokan energi domestik, dan sisanya dapat dimanfaatkan untuk mendekarbonisasi pelayaran dan sektor lain seperti transportasi darat. Belum diketahui apakah ada sumber daya energi terbarukan yang layak dan peka terhadap lingkungan untuk memenuhi semua kebutuhan di atas. Selain itu, terdapat pula hambatan akibat variasi spasial dari potensi energi terbarukan Indonesia dan jaringannya yang terputus.

Indonesia dapat mengatasi tantangan untuk menyediakan bahan bakar pelayaran nirkarbon dengan mengadopsi bauran pembangkitan dan opsi pengisian bahan bakar. Ini mencakup pemanfaatan potensi pembangkit energi terbarukan di mana tersedia dan menyalurkan listrik hijau ke pelabuhan untuk konversi menjadi bahan bakar, mengimpor listrik terbarukan dari negara tetangga, atau mengimpor bahan bakar hijau untuk memasok pelabuhan. Jaringan mikro lokal yang dipasok pembangkit listrik terbarukan dapat dimanfaatkan untuk memasok listrik ke masyarakat serta untuk pengisian daya langsung kapal lokal kecil yang cocok untuk elektrifikasi langsung.

Pengembangan bahan bakar hayati dari limbah harus dibuat hanya dengan menggunakan bahan baku yang berkelanjutan dan peka terhadap lingkungan, memastikan bahwa emisi siklus hidupnya nol atau sangat rendah, dan bahwa penggunaan alternatif atau pembuangan limbah tidak akan menghasilkan emisi yang lebih rendah daripada penggunaannya sebagai bahan bakar hayati. Sumber bahan bakar hayati yang memenuhi kriteria ini diperkirakan tidak terlalu banyak, tidak konsisten sepanjang waktu, dan sulit ditingkatkan skalanya karena merupakan produk limbah, sehingga tidak diproduksi secara langsung. Namun, penggunaannya untuk aplikasi spesifik atau sangat terlokalisasi mungkin sesuai.

Agar Indonesia dapat mencapai tujuan dekarbonisasinya, bagian-bagian penting dari infrastruktur perlu didukung investasi besar. Hal ini akan membutuhkan koordinasi dan perencanaan jangka panjang. Suatu peta jalan yang komprehensif akan sangat bermanfaat bagi Indonesia dan akan mengirimkan sinyal yang jelas sejak dini. Peta jalan tersebut akan mendorong investasi, infrastruktur, dan pasar untuk tumbuh dan berkembang dan perlahan mewujudkan ekonomi listrik nirkarbon lokal memenuhi tujuan tersebut, dan dengan demikian Indonesia dapat memanfaatkan pergeseran pasar yang akan datang. Indonesia dapat menarik investasi asing dan swasta melalui pendanaan internasional, yang akan memberikan peluang bagi perusahaan lokal untuk tumbuh dan mengembangkan keterampilan dan keahlian. Pembangunan infrastruktur bahan bakar niremisi untuk memasok 5% sektor pelayaran dengan bahan bakar hijau dapat menarik investasi antara 45.9 - 65.4 triliun rupiah (3.18 - 4.53 miliar USD).

Studi kasus pelabuhan

Studi kasus pelabuhan satu: Memasok jalur pelayaran internasional yang sibuk dengan bahan bakar rendah karbon

Indonesia melayani sejumlah besar kapal internasional dan sepanjang jalur pelayaran yang sibuk dan penting, termasuk Selat Malaka dan Selat Sunda. Selat Sunda terletak dekat dengan pelabuhan-pelabuhan besar di Jakarta.

Kapal-kapal internasional kemungkinan akan membutuhkan hidrogen hijau atau amonia sebagai bahan bakar bunker yang didekarbonisasi, karena bahan bakar ini tampaknya akan diadopsi oleh sektor maritim internasional. Dalam jangka panjang, permintaan bahan bakar akan tinggi, dan ini membutuhkan keamanan pasokan bahan bakar pelayaran yang signifikan. Namun, permintaan tersebut pada awalnya diperkirakan akan kecil seiring kapal-kapal pertama beralih ke bahan bakar rendah karbon. Permintaan tersebut akan meningkat seiring waktu, dan ini memberi waktu yang cukup untuk perencanaan dan adaptasi.

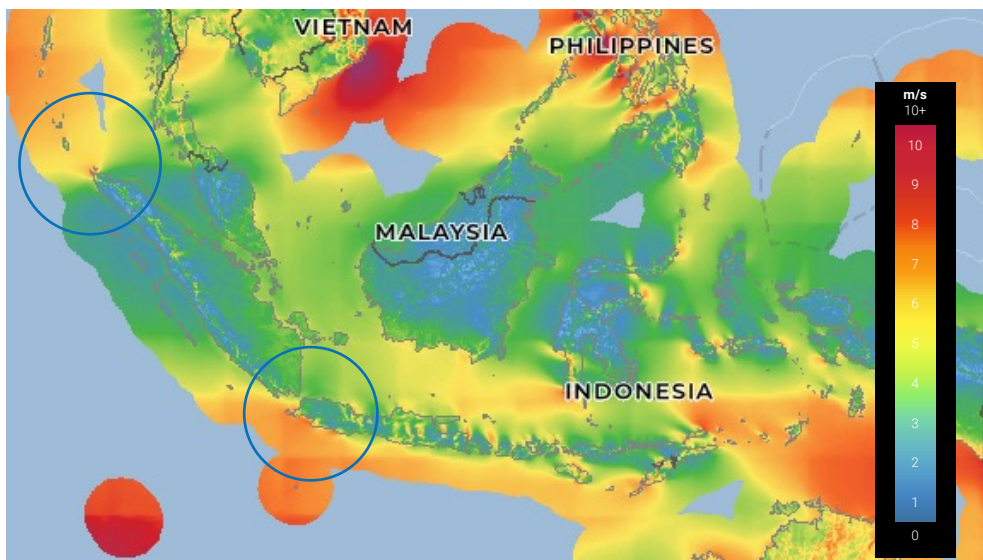


Pada awalnya, hal yang mungkin dilakukan adalah membangun bunker bahan bakar rendah karbon sesuai sumber daya terbarukan terbatas yang berada di sekitar, seperti surya, angin, dan panas bumi. Pasokan ini dapat ditunjang dengan bahan bakar impor sesuai kebutuhan.

Ketika permintaan bahan bakar rendah karbon meningkat, teknologi pembangkit terbarukan yang lebih maju dapat dikembangkan, seperti pembangkit energi lepas pantai seperti tenaga angin, pasang surut, dan gelombang.

Sementara potensi angin lepas pantai belum dieksplorasi secara luas, ada beberapa potensi angin lepas pantai yang dapat dieksplorasi lebih lanjut untuk memasok produksi bahan bakar nirkarbon untuk melayani kapal-kapal internasional yang telah didekarbonisasi. Beberapa kantong potensi angin lepas pantai yang agak lebih tinggi ini dapat ditemukan di Selat Malaka dan Selat Sunda (lihat Bagan 14).

Bagan 14: Peta kerapatan angin Indonesia dan lokasi selat Indonesia [40]



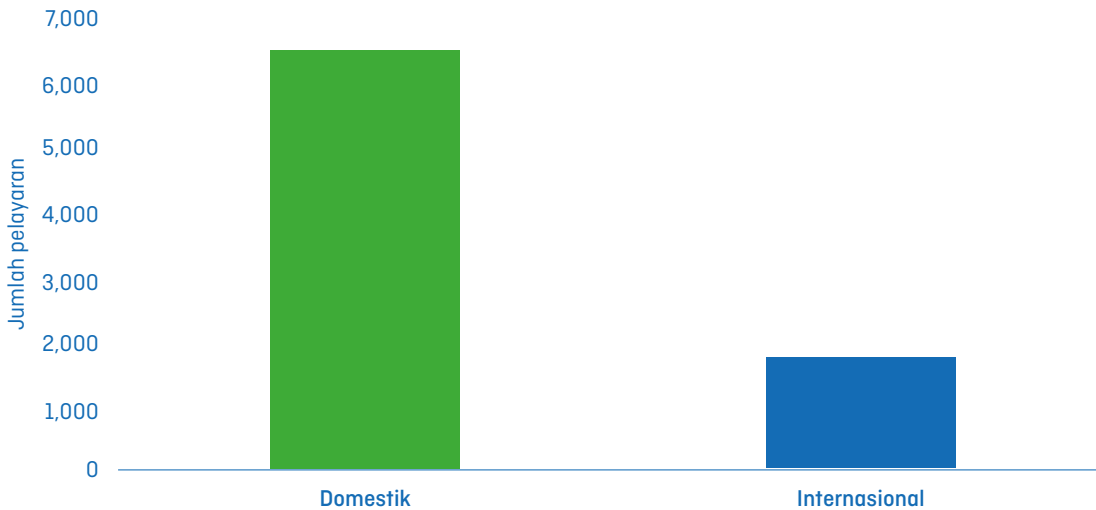
Kelayakan angin lepas pantai tetap dan mengambang dapat dipertimbangkan di daerah-daerah tersebut; perkembangan teknologi ini pada saatnya akan membuka potensi energi terbarukan tambahan dan meminimalkan dampak lahan dari penggunaan infrastruktur terbarukan di darat. Pembangkit pasang surut atau gelombang juga dapat memungkinkan akses ke sumber energi tambahan untuk mendukung pembangkitan bahan bakar pelayaran; energi pasang surut dan laut dapat memiliki potensi lebih baik di Selat Sunda dan Selat Malaka karena pasang yang lebih tinggi dan arus laut yang lebih cepat, namun hal ini perlu dikaji lebih lanjut.

Sumber daya terbarukan ini dapat dilengkapi lebih lanjut dengan interkonektor internasional, apabila akan didirikan. Selain menyediakan listrik terbarukan untuk pasokan domestik dan industri, interkonektor dapat menyediakan energi untuk produksi bahan bakar hijau. Prospek terbaik untuk interkonektor internasional adalah dengan Australia, di mana ada potensi energi terbarukan sangat besar di pesisir utaranya pada jarak terpendek dengan Indonesia (yaitu 2.000 mil laut). Selain itu, bahan bakar hijau dapat diimpor dari daerah lain untuk menambah bahan bakar yang diproduksi di Indonesia. Gabungan opsi-opsi ini dapat dioptimalkan untuk menyediakan bahan bakar pelayaran ramah lingkungan bagi kapal-kapal internasional yang singgah di pelabuhan Indonesia, pada saat yang sama juga memaksimalkan manfaat bagi tujuan ekonomi dan lingkungan Indonesia.

Contoh Pelabuhan: Tanjung Priok (Jakarta)

Jakarta memiliki pelabuhan terbesar di Indonesia dalam hal pelayaran domestik dan penggunaan energi domestik. Tanjung Priok sering dikunjungi oleh berbagai jenis kapal kecil; khususnya kapal peti kemas kecil, diikuti pengangkut curah kecil dan pengangkut kecil orang dan kendaraan. Walau sebagian besar kapal yang berangkat dari Jakarta adalah pelayaran domestik, Indonesia memiliki permintaan energi yang signifikan dari kapal-kapal pelayaran internasional (lihat Gambar 15). Lokasi Jakarta yang dekat dengan Selat Sunda memberinya peluang untuk memanfaatkan salah satu jalur pelayaran tersibuk di dekatnya, juga salah satu sumber daya angin terbesar di Indonesia (lihat Gambar 14). Membangun bauran pembangkit listrik terbarukan, termasuk pemanfaatan tenaga angin di wilayah tersebut, akan memungkinkan Jakarta menjadi pemangku kepentingan bahan bakar nirkarbon.

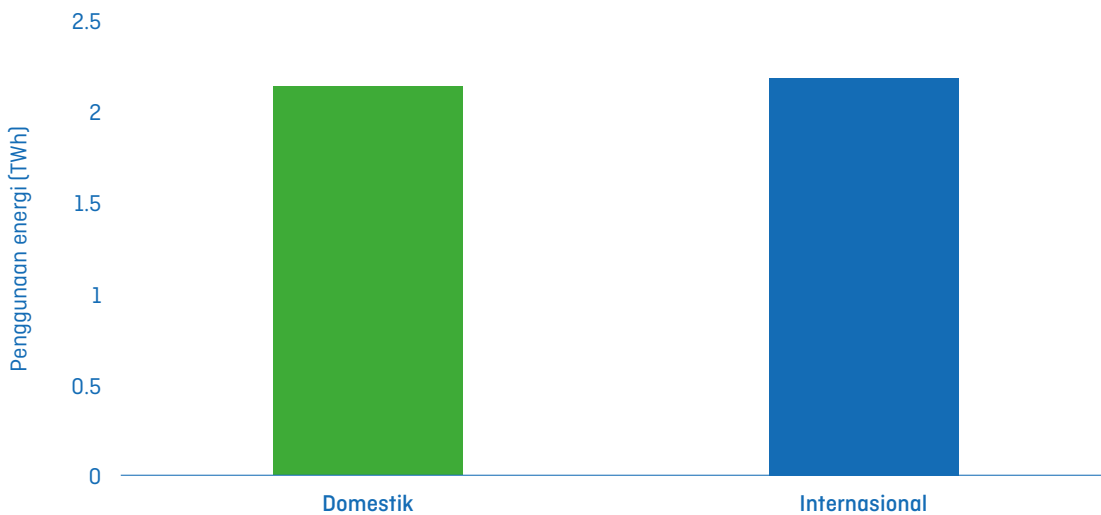
Bagan 15: Pelayaran Domestik dan Internasional Tanjung Priok



Dengan sumber listrik terbarukan yang andal, Jakarta dapat menghasilkan bahan bakar nirkarbon untuk memasok bunker kapal domestik dan internasional di pelabuhan, dan menjadi pusat ekspor bahan bakar nirkarbon ke pelabuhan lain di Indonesia melalui jalur pelayaran domestik yang mapan. Hal ini akan memungkinkan pelabuhan-pelabuhan yang disinggahi banyak kapal internasional untuk dipasok bahan bakar nirkarbon, jika pelabuhan tersebut tidak memiliki potensi terbarukan besar yang dekat dengannya.

Jakarta mungkin memiliki potensi energi terbarukan yang cukup untuk memenuhi permintaan energi awal untuk memasok kapal domestik dan internasional; yakni 5% pada tahun 2030 [27]. Namun, dengan meningkatnya permintaan akan bahan bakar ini di pelabuhan, dan agar Jakarta dapat menjadi pusat ekspor bagi pelabuhan lain, maka permintaan ini mungkin perlu didukung dengan kapasitas terbarukan tambahan. Ini berpotensi dicapai melalui interkoneksi internasional, dengan negara tetangga seperti Australia dan Singapura, untuk memasok energi yang cukup untuk memproduksi bahan bakar sekaligus menyediakan kapasitas terbarukan untuk industri domestik dan komersial di Jawa.

Bagan 16: Penggunaan energi Tanjung Priok berdasarkan penggunaan energi internasional dan domestik (TWh)



Studi kasus pelabuhan

Studi kasus pelabuhan kedua: Menggerakkan sektor pelayaran domestik Indonesia

Sebagai negara kepulauan, Indonesia memiliki banyak pulau berpenghuni, dan pelayaran domestik sangat penting untuk menghubungkan masyarakat dan mengangkut barang dan orang. Berdasarkan pelacakan AIS, kapal-kapal domestik Indonesia sebagian besar adalah peti kemas kecil, pengangkut curah dan pengangkut orang dan kendaraan antarpulau di Indonesia. Di luar itu, ada sejumlah besar kapal yang lebih kecil dan tidak berpelacak (<20 GT) di Indonesia, termasuk kapal penangkap ikan kecil, kapal industri dan kapal pribadi.



Dekarbonisasi kapal domestik merupakan bagian penting dari dekarbonisasi industri perkapalan Indonesia. Pendekatan yang paling tepat untuk itu akan tergantung pada aplikasi dan sumber daya yang tersedia:

Kapal sangat kecil: Kapal penangkap ikan terkecil, kapal kontainer dan pengangkut orang mungkin paling cocok untuk mengadopsi teknologi pengisian bahan bakar baterai. Ini adalah cara penggunaan energi terbarukan paling efisien untuk menggerakkan kapal dan didasarkan pada teknologi baterai dan pengisian daya yang sudah teruji. Listrik dapat dipasok dari jaringan, atau menggunakan jaringan mikro skala komunitas.

Kapal berbasis hidrogen dan amonia hijau: Di daerah di mana kemampuan bunkering hidrogen dan amonia hijau sedang dibangun, misalnya untuk digunakan oleh kapal internasional, kapal-kapal domestik yang lebih besar pun kemungkinan dapat memanfaatkan ketersediaan ini. Bahan bakar hijau dapat dihasilkan melalui penggunaan pembangkit listrik terbarukan domestik, atau melalui rute yang ditetapkan untuk mengimpor bahan bakar atau listrik hijau. Bahan bakar juga dapat dipasok dari *hub* pelabuhan yang lebih besar jika produksi bahan bakar dilakukan dalam skala besar. Bahan bakar ini kemudian dapat memasok pelabuhan yang lebih kecil untuk melayani kapal domestik, misalnya, melalui bunkering antar kapal (*ship-to-ship* – STS). Produksi bahan bakar lokal di dekat pelabuhan domestik juga mungkin dibangun jika permintaannya cukup besar untuk itu, dan jika ada sumber energi terbarukan yang memadai di sekitarnya untuk memenuhi permintaan tersebut.

Penggunaan bahan bakar hayati berkelanjutan dari limbah: Ada beberapa kemungkinan aplikasi yang sangat cocok untuk penggunaan bahan bakar hayati berkelanjutan. Misalnya, daerah-daerah di mana terdapat aliran limbah lokal yang cocok untuk produksi bahan bakar hayati yang berkelanjutan dan tersedia dalam jumlah yang memadai. Kapal-kapal yang menggunakan bahan bakar ini kemungkinan besar memiliki pola pelayaran yang terbatas atau terprediksi agar dapat mengandalkan bahan bakar ini yang tersedia hanya di sejumlah kecil pelabuhan yang sesuai. Pilihan untuk menggunakan pengisian bahan bakar STS, mengingat ketersediaan sumber daya yang tinggi di daerah dengan permintaan yang rendah, juga dapat membantu memenuhi permintaan bahan bakar hayati di pelabuhan yang membutuhkan bahan bakar tersebut, tetapi memiliki potensi sumber daya yang kecil. Keuntungan utama menggunakan bahan bakar ini untuk kapal-kapal tersebut adalah relatif mudahnya mengubah teknologi kapal untuk dapat beroperasi dengan bahan bakar hayati. Analisis siklus hidup lengkap perlu dilakukan untuk semua opsi bahan bakar nabati di Indonesia untuk menentukan apakah opsi tersebut akan lebih baik dibandingkan opsi lain dengan mempertimbangkan penggunaan lahan, keberlanjutan, dan efisiensi.

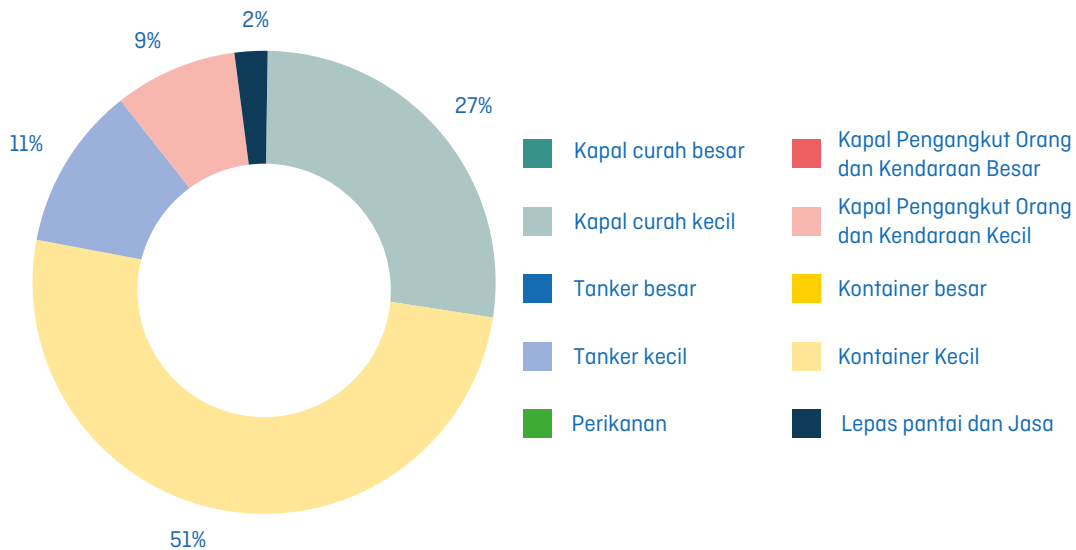
Dengan menyediakan berbagai bahan bakar dan pendekatan alternatif untuk pelayaran domestik, Indonesia dapat memberi contoh bagi negara-negara Asia Tenggara lainnya yang mengandalkan pelayaran domestik untuk transportasi dan perdagangan. Pendekatan yang paling cocok akan bervariasi dari pulau ke pulau, dari pelabuhan ke pelabuhan, dan antara aplikasi pelayaran. Kombinasi solusi yang dipilih dapat dioptimalkan untuk memberikan nilai terbaik bagi masyarakat dan industri lokal yang dilayani oleh kapal. Ini juga menyediakan potensi penciptaan lapangan kerja lokal di seluruh pelabuhan domestik Indonesia dan sepanjang rantai pasokan bahan bakar, mendukung Indonesia dalam tujuan dekarbonisasi dan memungkinkan terwujudnya ekonomi masa depan yang hijau.

Contoh pelabuhan: Ujungpandang

Ujungpandang adalah pelabuhan di Makassar, ibu kota provinsi Sulawesi Selatan. 90% kapal yang berangkat dari Ujungpandang adalah kapal domestik, terutama terdiri dari kapal peti kemas kecil, pengangkut curah kecil dan pengangkut kecil orang dan kendaraan – Lihat Lampiran C untuk deskripsi kategori kapal.

Jenis-jenis kapal ini cocok untuk digerakkan dengan baterai terpasang. Sulawesi Selatan secara geografis memiliki posisi yang baik untuk membangun pembangkit listrik terbarukan lokal, khususnya tenaga angin, untuk memasok kapal-kapal ini dengan listrik serta memenuhi kebutuhan energi lain di daerah tersebut, seperti elektrifikasi domestik. Membangun pembangkit listrik lokal dapat direplikasi ke pelabuhan-pelabuhan lain di seluruh Indonesia dan, di mana memungkinkan, ini dapat berasal dari bauran pembangkitan, termasuk angin, surya, panas bumi, dan air. Bagan di bawah ini menunjukkan potensi angin yang ada di Sulawesi Selatan berdasarkan kecepatan angin.

Bagan 17: Pelayaran domestik Ujungpandang berdasarkan kategori kapal

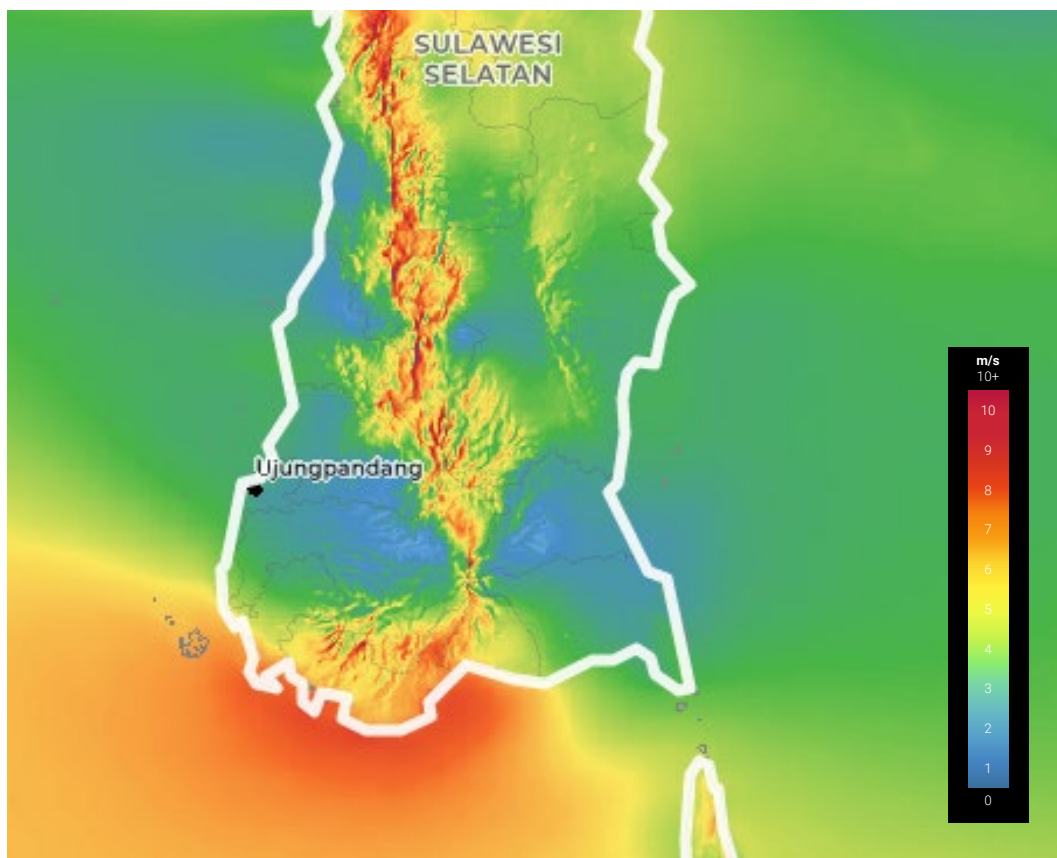


Contoh pelabuhan: Balikpapan

Balikpapan adalah pelabuhan berat kapal tanker di Kalimantan Timur, di pantai barat Selat Makasar. Kapal tanker lebih cocok untuk menggunakan bahan bakar yang mudah dibakar. Oleh karena itu, pelayaran domestik yang digerakkan oleh hidrogen hijau dan amonia hijau akan menjadi solusi yang lebih baik. Karena potensi energi terbarukan di sekitar pelabuhan Balikpapan terbatas, pelabuhan ini kemungkinan perlu dipasok dari impor listrik atau bahan bakar langsung dari pelabuhan lain.

Pendekatan ini dapat direplikasi di pelabuhan-pelabuhan lain di Indonesia di mana potensi energi terbarukan lokalnya terbatas dan yang berfokus pada perjalanan domestik –sehingga melayani kapal-kapal kecil yang lebih cocok untuk elektrifikasi langsung. Jika pasokan bahan bakar hijau yang diproduksi secara domestik kurang layak, maka sebagai alternatif (atau saling melengkapi) Balikpapan menyediakan pasokan bahan bakar hayati berkelanjutan dari limbah untuk memasok permintaan dari kapal yang berlayar ke pelabuhan domestik.

Bagan 18: Potensi tenaga angin di Sulawesi Selatan [40]



Studi kasus pelabuhan

Studi kasus pelabuhan ketiga: Dekarbonisasi nelayan kecil dan kapal di luar jaringan lainnya

Sementara pulau-pulau besar di Indonesia sudah dialiri listrik, ada banyak pulau lain yang belum dialiri listrik, terutama yang jauh dari Jakarta. Kapal-kapal kecil di daerah ini umumnya adalah kapal nelayan kecil dan pengangkut orang, menggunakan bahan bakar diesel yang harus didatangkan dari tempat lain, dan ini berdampak pada biaya dan meningkatkan emisi.

Untuk kapal-kapal kecil seperti itu, elektrifikasi melalui baterai dan motor adalah pendekatan yang mungkin paling efisien. Untuk daerah yang saat ini belum memiliki akses listrik, ada peluang untuk membangun teknologi pembangkit energi terbarukan luar jaringan kecil yang dapat digunakan untuk memberi daya bagi masyarakat dan industri lokal, dan dapat digunakan untuk mengisi daya kapal kecil menggunakan baterai. Ini adalah cara paling efisien untuk menyediakan daya bagi kapal menggunakan listrik terbarukan, dan sangat cocok untuk kapal kecil yang berlayar menempuh jarak yang lebih pendek.



Dua pulau dengan kepadatan kapal penangkap ikan terbesar adalah Sumatera (34,2%) dan Jawa (39,76%). Banyak dari kapal-kapal tersebut – diperkirakan lebih dari 700.000 di seluruh Indonesia – tidak masuk dalam sistem pelacakan AIS. Oleh karena itu, tidak banyak data yang akurat tentang mereka. Walau demikian, kapal-kapal tersebut memberikan kontribusi penting dalam menghubungkan masyarakat, mendistribusikan barang, dan penangkapan ikan skala kecil. Karena itu, mereka harus diperhitungkan ketika merancang solusi untuk pelabuhan dan pulau-pulau ini.

Untuk kapal-kapal kecil seperti ini, dan yang ada di Sumatera dan Jawa, elektrifikasi melalui baterai dan motor mungkin menjadi pendekatan yang paling efisien. Untuk daerah yang saat ini belum memiliki akses ke listrik, ada peluang untuk membangun teknologi pembangkit energi terbarukan luar jaringan yang dapat digunakan tidak hanya untuk mengisi daya kapal kecil menggunakan baterai, tetapi juga untuk menyediakan daya bagi masyarakat dan industri lokal. Ini merupakan cara yang efisien dan cocok untuk menyediakan daya bagi kapal kecil yang cenderung berlayar menempuh jarak yang lebih pendek. Penggunaan energi terbarukan luar jaringan akan membantu mengurangi ketergantungan pada diesel untuk pembangkitan luar jaringan dan membawa listrik ke masyarakat lokal. Pendekatan ini juga dapat memberi sinergi dan skala ekonomi untuk membantu masyarakat mendapatkan akses listrik bersih.

Banyak lokasi pesisir Indonesia memiliki potensi matahari dan angin untuk memasang infrastruktur pembangkit listrik skala kecil dengan dampak lingkungan yang minimal. Listrik yang dihasilkan dari energi terbarukan dapat dimasukkan langsung ke pengisi daya baterai. Menyambung pembangkit listrik terbarukan dengan kapal yang menggunakan baterai adalah kombinasi yang menguntungkan. Desain sistem luar jaringan perlu mempertimbangkan elektrifikasi domestik yang meningkat dan pola pelayaran untuk memastikan bahwa daya tersedia pada saat kapal perlu diisi tanpa menghalangi akses listrik secara umum. Misalnya, pada siang hari, saat kapal sedang digunakan dan permintaan daya rendah, maka infrastruktur pengisian daya berbasis surya mungkin kurang cocok, karena akan membutuhkan penyimpanan daya tetap yang lebih banyak. Baterai kapal juga dapat digunakan sebagai penyimpan daya untuk keperluan rumah tangga dengan waktu pengisian bisa relatif fleksibel. Ini berarti bahwa pembangkitan dapat dimanfaatkan bila tersedia.

Pengangkutan kendaraan-orang, penangkapan ikan, dan jasa lepas pantai menyumbang hampir 42% dari total pelayaran domestik, namun hanya 28% dari total permintaan energi. Ini menunjukkan bahwa sebagian besar pelayaran ini berjarak pendek. Karena Indonesia memiliki banyak pelabuhan kecil yang tersebar di seluruh negeri, uji coba penggunaan jaringan mikro untuk mendekarbonisasi kapal kecil dapat dilakukan terlebih dahulu di pelabuhan yang terletak berdekatan dengan desa-desa pesisir terpencil yang tidak teraliri listrik yang memadai, atau yang lokasi geografisnya menjadikannya gerbang ke beberapa lokasi lain.

Solusi untuk mengelektifikasi kapal-kapal kecil di seluruh Indonesia akan bervariasi antar lokasi dan pelabuhan. Dua contoh aplikasi terdapat di bawah ini.

Contoh 1: Pelabuhan yang terletak di lokasi yang sama dengan desa-desa pesisir terpencil yang kekurangan listrik

Pemerintah Indonesia telah mengumumkan rencana untuk menggunakan jaringan mini dan energi terbarukan untuk mengelektifikasi provinsi-provinsi timur seperti Papua, Papua Barat, Maluku, Maluku Utara, dan Nusa Tenggara Timur dan Barat [29]. Jaringan listrik kecil yang direncanakan untuk daerah-daerah ini dapat dirancang dan ditempatkan sedemikian rupa sehingga dapat digunakan untuk memasok listrik ke desa-desa setempat dan untuk elektrifikasi kapal-kapal kecil di pelabuhan. Hal ini dapat membantu dekarbonisasi pelayaran sekaligus meningkatkan akses masyarakat terhadap energi, dengan demikian juga kualitas hidup mereka.

Strategi serupa kemudian dapat direplikasi di mana pun ada rencana untuk memasang jaringan listrik kecil untuk elektrifikasi dan ada pelabuhan di dekatnya. Elektrifikasi juga dapat menguntungkan desa-desa pesisir terpencil tanpa pelabuhan: jika berada di jalur pelayaran yang sibuk, jaringan listrik kecil dan infrastruktur pengisian daya dapat disiapkan untuk menyediakan layanan pengisian daya ke kapal lain yang lewat. Ini akan menciptakan situasi yang menguntungkan bagi semua: desa akan mendapatkan ketahanan energi, kapal tidak perlu membawa baterai besar, dan ini akan membantu pengembangan model bisnis yang memungkinkan daerah terpencil memiliki sumber pendapatan baru yang akan mendorong pembangunan di berbagai daerah.

Contoh 2: Pulau-pulau dengan lokasi geografis yang menguntungkan

Pulau Kalimantan, yang terletak di tengah kepulauan Indonesia, berfungsi sebagai pintu gerbang ke hampir semua pulau besar lainnya di negara ini, termasuk Sumatera, Jawa, dan Sulawesi, serta destinasi internasional seperti Singapura. Awalnya, lebih masuk akal secara praktis dan teknis untuk mengidentifikasi pelabuhan-pelabuhan yang relatif dekat satu sama lain (bisa berada di pulau yang sama atau pulau lain), dan kemudian mengidentifikasi pelabuhan-pelabuhan di antara mana kapal-kapal melakukan banyak perjalanan ke dan-ke-pulau. dari perjalanan. Dengan lahan yang cukup dan potensi sumber daya terbarukan untuk membangun jaringan mini di dekat pelabuhan-pelabuhan ini, infrastruktur pengisian daya yang diperlukan dapat dibangun di pelabuhan-pelabuhan ini untuk mendukung elektrifikasi kapal-kapal angkut kecil. Mengingat keberhasilan pendekatan ini, model serupa dapat direplikasi di banyak pelabuhan lain dan dapat ditingkatkan untuk memasok kapal-kapal yang berlayar jarak jauh.

Referensi

- [1] N. Ash and T. Scarbrough, "Sailing on Solar - Could green ammonia decarbonise international shipping?," Environmental Defense Fund, London, 2019.
- [2] N. Ash, I. Sikora and B. Richelle, "Electrofuels for shipping: How synthetic fuels from renewable electricity could unlock sustainable investments in countries like Chile" Environmental Defense Fund, London, 2019.
- [3] Carbon brief, "The Carbon Brief Profile: Indonesia," 2019.
- [4] Trading Economics, "Indonesia GDP," 2020.
- [5] J. Kokarakis, "The case of ammonia as a marine fuel," SAFETY4SEA, 9 April 2020. [Online]. Available: https://safety4sea.com/cm-the-case-of-ammonia-as-a-marine-fuel/?__cf_chl_jschl_tk__=pmd_9GgNPPeAnGERq3Klx0MLZeywBLb53gHIY67ix8yIhiU-1634719113-0-gqNtZGzNAiWjcnBszQd9. [Accessed 20 October 2021].
- [6] N. Frithiof, "Five lessons to learn on hydrogen as ship fuel," DNV, 15 July 2021. [Online]. Available: <https://www.dnv.com/expert-story/maritime-impact/Five-lessons-to-learn-on-hydrogen-as-ship-fuel.html>. [Accessed 20 October 2021].
- [7] World Bank, "Green Hydrogen in Developing Countries," ESMAP, Washington DC, 2020.
- [8] Food and Agriculture Organisation of the United Nations, "Fertilizer use by crop in Indonesia," 2005.
- [9] K. Ando, "Mitsubishi's ammonia fuel project in Indonesia to tap carbon capture," Nikkei Asia, 2021.
- [10] ABS, "Ammonia as Marine Fuel," American Bureau of Shipping, Spring, Texas, 2020.
- [11] Korean Register, "Forecasting the Alternative Marine Fuel - Ammonia," Korean Register, Busan, 2020.
- [12] DNV, "Ammonia as a Marine Fuel: Safety Handbook," DNV, Bærum, 2021.
- [13] Lloyd's Register, "First LR classed hydrogen-powered vessel launched," Lloyd's Register, 20 December 2017. [Online]. Available: <https://www.lr.org/en-gb/latest-news/first-lr-classed-hydrogen-powered-vessel-launched/>. [Accessed 16 April 2021].
- [14] A. Trevistan and B. Rogers, "Fuel Focus - Ammonia," in Ship Energy Summit 2021, Online, 2021.

- [15] J. J. Minnehan and J. W. Pratt, "Practical application limits of fuel cells and batteries for zero emission vessels," SANDIA Report: SAND2017-12665., Albuquerque, NM, 2017.
- [16] University College London, 2018.
- [17] B. Sumiono, "FISHING ACTIVITIES IN RELATION TO COMMERCIAL AND SMALL-SCALE FISHERIES IN INDONESIA," Research Institute For Marine Fisheries, 1994.
- [18] IEA, "Indonesia Country Profile," 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/countries/indonesia>. [Accessed 27 June 2021].
- [19] IISD, "Indonesia's Energy Policy Briefing," 2020.
- [20] M. A. McNeil, N. Karali and V. Letschert, "Forecasting Indonesia's electricity load through 2030 and peak demand reductions from appliance and lighting efficiency," Energy for Sustainable Development, vol. 49, pp. 65-77, 2019.
- [21] World Bank, "Toward Universal Electricity Access: Renewable Energy-Based Geospatial Least-Cost Electrification Planning," World Bank, 2013.
- [22] Foreign & Commonwealth Office, "Indonesia Energy Business Opportunities," 2020.
- [23] IRENA, "Biofuel Potential in Southeast Asia: Raising food yields, reducing food waste and utilizing residues," International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi, 2017.
- [24] "Sun Cable is developing the world's largest solar energy infrastructure network, making it possible to power whole cities with renewable energy," Sun Cable, 2021. [Online]. Available: <https://suncable.sg/>. [Accessed 03 August 2021].
- [25] M. M. D. J. F. [THOMAS HIRSCH, "Guiding Principles & Lessons Learnt For a Just Energy Transition in the Global South," Friedrich Ebert Stiftung, Germany, 2017.
- [26] The Indonesia and Steel Industry Association, "Indonesia Steel Industry: Development & Opportunities," The Indonesia and Steel Industry Association, Paris, 2017.
- [27] "Zero-Emission Shipping," Mission Innovation, 2021. [Online]. Available: <http://www.mission-innovation.net/missions/shipping/>. [Accessed 20 October 2021].
- [28] BPS-Statistics Indonesia, "Statistics of Fishing Port," Statistics Indonesia, 2019.
- [29] pv-magazine, 11 Oct 2018. [Online]. Available: <https://www.pv-magazine.com/2018/10/11/indonesia-reveals-national-plan-for-micro-and-mini-grids/>.
- [30] IEA, "The Future of Hydrogen," International Energy Agency," Paris, 2019.
- [31] N. Rehmatulla, P. Piris-Cabezas, D. Baresic, M. Fricaudet, C. Raucci, M. Cabbia, "Exploring the relevance of ICAO's Sustainable Aviation Fuels framework for the IMO," in Environmental Defense Fund, London, 2020.

- [32] BEIS, "Greenhouse gas reporting: conversion factors 2020," Department for Business, Energy and Industrial Strategy," 09 06 2020. [Online]. Available: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2020>.
- [33] IEAGHG, "Techno-Economic Evaluation of SMR Based Standalone (Merchant) Hydrogen Plant with CCS," IEA Environmental Projects Ltd, Cheltenham, 2017.
- [34] D. Schlissel, "Boundary Dam 3 Coal Plant Achieves Goal of Capturing 4 Million," Institute for Energy Economics and Financial Analysis , Lakewood, 2021.
- [35] P. Balcombe, K. Anderson, J. Speirs, N. Brandon and A. Hawkes, "Methane and CO2 emissions from the natural gas supply chain," Imperial College London, London, 2015.
- [36] IRENA, "Renewable Energy Prospects: Indonesia," IRENA, 2017.
- [37] IESR, Agora Energiewende, LUT University, "Deep decarbonization of Indonesia's energy system: A pathway to zero emissions by 2050," Institute for Essential Services Reform, 2021.
- [38] A. Kusuma, "Ocean energy overview: feasibility study of ocean energy implementation in Indonesia," World Maritime University Dissertations, Malmo, 2018.
- [39] The Republic of Indonesia, Ministry of Energy and Mineral Resources, "Project for the Master Plan Study of Hydropower Development in Indonesia," Japan International Cooperation Agency, 2011.
- [40] World Bank Group, "Global Wind Atlas," 2021.
- [41] UCL Energy Institute and UMAS, "Private Conversations with UCL and UMAS International around Indonesia's maritime activities and emissions,," London, 2021.
- [42] Silalahi, D.F; Blakers, A; Stocks, M; Lu, B; Cheng, C; Hayes, L. Indonesia's Vast Solar Energy Potential. *Energies* 2021, 14, 5424. <https://doi.org/10.3390/en14175424>

Lampiran



Lampiran A: Presentasi asumsi dan hasil analisis multi-kriteria bahan bakar pelayaran nir- dan rendah karbon

Sebagai bagian dari proyek ini, analisis multi-kriteria dilakukan untuk membandingkan kekuatan dan kelemahan berbagai bahan bakar nir- dan rendah karbon. Analisis ini dilakukan pada tataran umum untuk menginformasikan perkembangan materi di bagian utama laporan, dan tidak dimaksudkan untuk mewakili asesmen numerik rinci bahan bakar. Tabel di bawah ini mencakup penilaian untuk setiap kriteria dan bobotnya untuk setiap bahan bakar, dan memaparkan hasil numeriknya.

Skor: Kriteria 1

| Kriteria 1: Perubahan volume penyimpanan bahan bakar dibandingkan dengan bahan bakar fosil | | | | | | | | | | | | |
|---|-------------------|-------------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------|----------------|-----------------|
| Bahan bakar | Kapal curah besar | Kapal curah kecil | Tanker besar | Tanker kecil | Kontainer besar | Kontainer kecil | Pengangkut orang & barang besar | Pengangkut orang & barang kecil | Lepas pantai & jasa | Perikanan lepas pantai | Industri kecil | Perikanan kecil |
| Hidrogen Hijau | 3 | 4 | 3 | 3 | 0 | 4 | 3 | 3 | 3 | 0 | 3 | 3 |
| Amonia Hijau | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | 4 | 3 | 0 | 0 |
| Metanol Hijau | 0 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | 4 | 3 | 4 | 4 |
| Hidrogen Biru | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 0 | 4 | 0 | 3 | 3 |
| Amonia Biru | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | 4 | 3 | 0 | 0 |
| Biometana dari limbah | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Biometanol dari limbah | 0 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 0 | 4 | 3 | 3 | 3 |
| Biodiesel dari limbah | 4 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Baterai | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 4 | 4 |

Definisi nilai

| Nilai | Kriteria 1 |
|----------|---|
| 0 | Kepadatan bahan bakar tidak cukup (dikeluarkan dari analisis) |
| 1 | Tidak digunakan |
| 2 | Tidak digunakan |
| 3 | Peningkatan penyimpanan / perubahan strategi pengisian bahan bakar dibutuhkan |
| 4 | Perubahan tangki bahan bakar tidak diperlukan |

Skor: Kriteria 2 sampai 8

| | Kriteria 2 | Kriteria 3 | Kriteria 4 | Kriteria 5 | Kriteria 6 | Kriteria 7 | Kriteria 8 |
|------------------------|--|---|----------------------------------|---|----------------------------|----------------------------|---|
| Bahan bakar | Kesesuaian dengan infrastruktur penyimpanan bahan bakar yang ada | Teknologi kapal saat ini: <i>Powertrain</i> | Efisiensi energi sumur-ke-tangki | Risiko pelepasan ke lingkungan yang tidak disengaja | Risikp penanganan: NFPA704 | Perubahan iklim: Nirkarbon | Biaya yang diratakan tahun 2030 memperhitungkan efisiensi <i>powertrain</i> |
| Hidrogen Hijau | 1 | 2 | 2 | 4 | 1 | 4 | 2 |
| Amonia Hijau | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 4 | 2 |
| Metanol Hijau | 3 | 3 | 1 | 3 | 3 | 4 | 1 |
| Hidrogen Hijau | 1 | 2 | 3 | 4 | 1 | 0 | 3 |
| Amonia Hijau | 2 | 1 | 2 | 2 | 2 | 0 | 3 |
| Biometana dari limbah | 3 | 4 | 3 | 3 | 2 | 2 | 3 |
| Biometanol dari limbah | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| Biodiesel dari limbah | 4 | 4 | 3 | 1 | 3 | 2 | 2 |
| Baterai | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |

Definisi nilai: Kriteria 2 sampai 8

| Skor | Kriteria 2 | Kriteria 3 | Kriteria 4 | Kriteria 5 | Kriteria 6 | Kriteria 7 | Kriteria 8 |
|------|--|-------------------------------------|----------------------|--|--|--|---------------------------------|
| 0 | Tidak digunakan | Tidak digunakan | Tidak digunakan | Tidak digunakan | Tidak digunakan | Lifecycle emissions > 50% diesel emissions | Tidak digunakan |
| 1 | Perlu pengembangan teknologi | Teknologi sedang dalam fase R&D | $X \leq 50\%$ | Bahayanya parah dan lama | NFPA704 nilai kesehatan 3; nilai mudah terbakar 4 | Tidak digunakan | $X > 100 \$/MWh$ |
| 2 | Mebutuhkan perubahan yang signifikan. Teknologi sudah mapan. | Teknologi dalam tahap demonstrasi | $50\% < X \leq 70\%$ | Bahayanya bertahan lama | NFPA704 Bilai kesehatan 3; nilai mudah terbakar ≤ 3 | Emisi siklus hidup < 50% emisi diesel; emisi pada titik penggunaan | $60 \$/MWh < X \leq 100 \$/MWh$ |
| 3 | Mebutuhkan perubahan. Teknologi yang sudah mapan sudah digunakan | Teknologi tersedia secara komersial | $70\% < X \leq 90\%$ | Bahaya terbatas dalam waktu atau tingkat keparahan | NFPA704 nilai kesehatan ≤ 2 ; nilai mudah terbakar ≤ 3 | Tidak digunakan | $30 \$/MWh < X \leq 60 \$/MWh$ |
| 4 | Kompatibel - Tidak ada perubahan yang dibutuhkan | Teknologi sudah diadopsi luas | $X > 90\%$ | Risiko rendah bagi kehidupan laut atau manusia | NFPA704 nilai kesehatan = 0; nilai mudah terbakar ≤ 1 | Emisi siklus hidup < 50% emisi diesel; tidak ada emisi pada titik penggunaan | $X \leq 30 \$/MWh$ |

Faktor pembobotan

| | Kriteria 1 | Kriteria 2 | Kriteria 3 | Kriteria 4 | Kriteria 5 | Kriteria 6 | Kriteria 7 | Kriteria 8 |
|--|---|--|---|----------------------------------|---|----------------------------|----------------------------|---|
| | Kepadatan energi bahan bakar yang disimpan (GJ/m ³) termasuk tangki silinder + isolasi untuk isolasi H ₂ dan CH ₄ + peralatan untuk NH ₃ | Kesesuaian bahan bakar dengan infrastruktur bunkering yang ada | Teknologi kapal saat ini: <i>Powertrain</i> | Efisiensi energi sumur ke tangki | Risiko pelepasan ke lingkungan yang tidak disengaja | Risiko penanganan: NFPA704 | Perubahan iklim: Nirkarbon | Biaya yang Diratakan - harga 2030 \$/GJ prop (termasuk efisiensi PT) |
| Pengangkut curah: Besar | 0.6 | 0.5 | 0.7 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 1 | 1 |
| Pengangkut curah: Kecil | 0.6 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 1 | 1 |
| Tanker: Besar | 0.6 | 0.5 | 0.7 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 1 | 1 |
| Tanker: Kecil | 0.6 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 1 | 1 |
| Kontainer: Besar | 0.6 | 0.8 | 0.7 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 1 | 1 |
| Kontainer: Kecil | 0.6 | 0.8 | 0.7 | 0.5 | 0.1 | 0.1 | 1 | 1 |
| Pengangkut Orang & Kendaraan: Besar | 0.6 | 0.3 | 0.7 | 0.5 | 0.1 | 0.2 | 1 | 1 |
| Pengangkut Orang & Kendaraan: Kecil | 0.6 | 0.3 | 0.5 | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 1 | 1 |
| Lepas pangtai dan jasa | 0.6 | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 1 | 0.5 |
| Perikanan | 0.6 | 0.5 | 0.5 | 0.5 | 0.1 | 0.5 | 1 | 0.8 |
| Kapal kecil: Industri | 0.6 | 1 | 1 | 0.5 | 0.1 | 1 | 1 | 0.8 |
| Kapal kecil: Perikanan / Kecil | 0.6 | 1 | 1 | 0.5 | 0.1 | 1 | 1 | 0.8 |

Skor dihitung sebagai hasil dari peringkat dan faktor bobot untuk setiap teknologi dan jenis kapal. Peringkat kemudian ditetapkan untuk masing-masing dalam urutan menurun sesuai dengan skor akhir tersebut (di mana skor tertinggi berada di urutan pertama peringkat). Dengan cara ini, analisis memprioritaskan teknologi yang berdampak pada kriteria paling penting untuk setiap jenis kapal.

Hasil pemeringkatan (Pengangkut Curah, Tanker, dan Kontainer)

| Bahan bakar | Pengangkut curah | | Tanker | | Kontainer | |
|------------------------|------------------|-------|--------|-------|-----------|-------|
| | Besar | Kecil | Besar | Kecil | Besar | Kecil |
| Hidrogen Hijau/Biru | 3 | 4 | 5 | 5 | N/A | 5 |
| Amonia Hijau/Biru | 4 | 5 | 4 | 4 | 4 | 5 |
| Metanol Hijau | N/A | 6 | 6 | 6 | 5 | 7 |
| Biometana dari limbah | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 |
| Biometanol dari limbah | N/A | 3 | 3 | 3 | 3 | 4 |
| Biodiesel dari limbah | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 3 |
| Baterai | N/A | N/A | N/A | N/A | N/A | 1 |














Hasil pemeringkatan (Pengangkut Orang & Kendaraan, Lepas Pantai dan Jasa, Perikanan dan Kapal Kecil)

| Bahan bakar | Pengangkut Orang & Kendaraan | | Lepas Pantai dan Jasa | Perikanan | Kapal kecil | |
|------------------------|------------------------------|-------|-----------------------|-----------|-------------|------------------|
| | Besar | Kecil | | | Industri | Perikanan/ kecil |
| Hidrogen Hijau/Biru | 5 | 2 | 6 | N/A | 6 | 6 |
| Amonia Hijau/Biru | 4 | N/A | 4 | 4 | N/A | N/A |
| Metanol Hijau | 6 | N/A | 5 | 5 | 5 | 5 |
| Biometana dari limbah | 1 | N/A | 2 | 2 | 3 | 3 |
| Biometanol dari limbah | 3 | N/A | 3 | 3 | 4 | 4 |
| Biodiesel dari limbah | 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Baterai | N/A | N/A | N/A | N/A | 1 | 1 |

Analisis multi-kriteria menunjukkan bahwa baterai adalah teknologi propulsi nirkarbon yang disukai untuk aplikasi yang memungkinkan, mengingat kepadatan energi yang rendah (opsi yang tidak layak ditandai dengan N/A). Hal ini adalah berkat efisiensi yang tinggi dalam penggunaan energi terbarukan pada baterai dan motor. Analisis juga menunjukkan bahwa semua aplikasi kapal dapat mengadopsi hidrogen hijau atau amonia, dan beberapa cocok mengadopsi keduanya. Karena kepadatan energinya yang tinggi dan kematangan teknologinya, bahan bakar hayati dari limbah umumnya mendapat nilai yang baik. Seperti yang dijelaskan di bagian utama laporan ini, bahan bakar hayati harus menggunakan bahan baku yang berkelanjutan dan peka terhadap lingkungan, dan sumber-sumber seperti itu umumnya terbatas dan sulit ditingkatkan skalanya. Oleh karena itu, bahan bakar hayati diperkirakan tidak akan menjadi bagian penting dari penyediaan bahan bakar rendah karbon untuk sektor pelayaran.

Sebagaimana dirinci dalam Bagian 1 laporan ini, metanol dan bahan bakar biru dikeluarkan dari proyek selebihnya untuk alasan yang lebih luas, namun disajikan di sini sebagai perbandingan.

Lampiran B: Perbandingan bahaya keselamatan dan lingkungan untuk bahan bakar laut terpilih

| | Marine Gas Oil | Gas Alam Cair | Metanol | Hidrogen (Cair) | Amonia (Cair) |
|--|---|---|--|---|--|
| Bahaya Fisik (Physical Hazards) | | | | | |
| Sifat mudah terbakar | Kat. 3  H226 Cairan dan uap yang mudah terbakar | Kat. 1  H220 Gas yang sangat mudah terbakar | Kat. 2  H225 Cairan dan gas yang sangat mudah terbakar | Kat. 1  H220 Gas yang sangat mudah terbakar | Kat. 2 H221 Gas mudah terbakar |
| Gas di bawah tekanan | Tidak diklasifikasikan |  H281 Mengandung gas berpendingin; dapat menyebabkan luka bakar atau cedera kriogenik | Tidak diklasifikasikan |  H281 Mengandung gas berpendingin; dapat menyebabkan luka bakar atau cedera kriogenik |  H280 Berisi gas di bawah tekanan; dapat meledak jika dipanaskan |
| Bahaya Kesehatan (Health Hazards) | | | | | |
| Toksistas akut | Kat. 4  H332 Berbahaya jika terhirup | Tidak diklasifikasikan | Kat. 3  H301 H311 H331 Beracun jika tertelan, kontak dengan kulit, atau terhirup | Tidak diklasifikasikan | Kat. 3  H331 Beracun jika terhirup |
| Bahaya aspirasi | Kat. 1  H304 Dapat berakibat fatal jika tertelan dan memasuki saluran udara | Tidak diklasifikasikan | Tidak diklasifikasikan | Tidak diklasifikasikan | Tidak diklasifikasikan |
| Korosi kulit | Kat. 2  H315 Menyebabkan iritasi kulit | Tidak diklasifikasikan | Tidak diklasifikasikan | Tidak diklasifikasikan | Kat 1/1B  H314 H318 Menyebabkan luka bakar kulit yang parah dan kerusakan mata yang serius |
| Karsinogenisitas | Kat. 2  H350 Dapat menyebabkan kanker | Tidak diklasifikasikan | Tidak diklasifikasikan | Tidak diklasifikasikan | Tidak diklasifikasikan |
| Toksistas organ target spesifik | Kat. 2  H373 Dapat menyebabkan kerusakan pada organ melalui paparan yang lama atau berulang | Tidak diklasifikasikan | Kat. 1  H370 Menyebabkan kerusakan pada organ (paparan tunggal) | Tidak diklasifikasikan | Tidak diklasifikasikan |
| Bahaya Lingkungan (Environmental Hazards) | | | | | |
| Bahaya terhadap lingkungan perairan |  Kategori 2 (kronis): Beracun bagi kehidupan akuatik dengan efek jangka panjang (H411) | Tidak diklasifikasikan | Tidak diklasifikasikan | Tidak diklasifikasikan |  Kategori 1 (Akut): Sangat beracun bagi kehidupan akuatik dengan efek jangka panjang (H400) |
| Rangkuman | | | | | |
| Rangkuman (US NFPA704) |  |  |  |  |  |

Sumber: Sailing on Solar [1]

Bahan bakar hayati diasumsikan memiliki sifat yang mirip dengan bahan bakar laut konvensional berbasis bahan bakar fosil cair dan gas.



Lampiran C: Definisi kategori kapal

| Kategori | Ukuran | Panjang (m) | Jumlah kapal secara global | Kapasitas | Jenis kapal IMO |
|-----------------------------|--------|-------------|----------------------------|------------------------------|--|
| Pengangkut curah | Besar | 195+ | 5308 | >60,000DWT | Pengangkut curah (seperti biji-bijian, batu bara, bijih, gulungan baja dan semen), curah berpendingin dan kargo umum |
| | Kecil | 75-195 | 15410 | <60,000DWT | |
| Tanker | Besar | 195+ | 3571 | >60,000DWT | Tanker gas cair, tanker minyak, tanker cairan lainnya dan tanker kimia |
| | Kecil | 75-195 | 9312 | >60,000DWT | |
| Kontainer | Besar | 260+ | 1554 | >5,000TEU | Kapal kontainer: Pengumpan kecil dan kapal sungai melalui Panamax dan Kapal Kontainer Ultra Besar (<i>Ultra Large Container Vessel</i>). |
| | Kecil | 125-260 | 3604 | <5,000TEU | |
| Pengangkut orang dan barang | Besar | 120-360 | 1306 | Bervariasi berdasarkan jenis | Pesiar, Feri: <i>Roll-on-Roll-off</i> (penumpang), <i>Roll-on-Roll-off</i> (kargo), Yacht, Kendaraan dan feri khusus penumpang |
| | Kecil | 30-205 | 5725 | Bervariasi berdasarkan jenis | |
| Lepas pantai dan jasa | — | 30-290 | 14264 | Bervariasi berdasarkan jenis | Lepas Pantai (layanan & pasokan minyak/gas dan ladang angin), Layanan, Tug, Bunker, lain-lain |
| Perikanan | — | 5-145 | 8220 | Bervariasi berdasarkan jenis | Perikanan: Dari pesisir ke laut lepas |

Sumber: Analisis dan diskusi Ricardo dengan University College London [41]

Lampiran D: Permintaan listrik untuk propulsi nirkarbon pada tahun 2030

Asumsi input - Permintaan

| Deskripsi | Nilai |
|--|--------|
| Pertumbuhan permintaan pelayaran 2018 - 2030 | 2% |
| Peningkatan efisiensi energi 2018 - 2030 | 1.2% |
| Penerimaan penggunaan bahan bakar nir-/rendah karbon pada 2030 | 5% |
| Nilai tukar IDR/USD | 14,418 |
| Biaya diindeks ke tahun ini | 2020 |

Asumsi input – Pasokan energi terbarukan

| Teknologi | Asumsi kontribusi | Faktor kapasitas | Biaya terpasang USDm/MW pada 2030 | |
|--------------------|-------------------|------------------|--|--------------|
| | | | kasus rendah | kasus tinggi |
| Solar PV | 23% | 0.23 | 0.40 | 0.60 |
| CSP | 12% | 0.39 | 1.89 | 2.84 |
| Angin darat | 50% | 0.3 | 0.93 | 1.40 |
| Angin lepas pantai | 15% | 0.45 | 1.53 | 2.30 |
| Referensi | | | IRENA (2021) Global Trends for 2018 costs, reduction to 2030 sesuai IRENA (2020) "Global Renewables Outlook" (hal. 60) | |

Data bahan bakar/penyimpanan dari MCA

| Jeohan bakar | Teknologi powertrain | Efisiensi Powertrain | Efisiensi sumur-ke-tankgi | Jam operasional tahunan pabrik produksi | Catatan |
|--------------------------|----------------------|----------------------|---------------------------|---|----------------------|
| Baterai | Motor listrik | 90% | 95% | 8,760 | |
| Biodiesel (Dari limbah) | ICE - Kompresi | 50% | 80% | 7,446 | |
| Biomeana (Dari limbah) | ICE - Spark | 40% | 100% | 7,446 | |
| Biometanol (Dari limbah) | ICE - Spark | 40% | 77% | 7,446 | |
| Bahan bakar fosil | ICE - Kompresi | 50% | N/A | 8,000 | |
| Amonia Hijau | ICE - Kompresi | 50% | 56% | 8,000 | |
| Hidrogen Hijau | ICE - Kompresi | 50% | 56% | 8,000 | Termasuk likuifikasi |
| Metanol Hijau | ICE - Spark | 40% | 43% | 8,000 | |

Kebutuhan energi terhitung

| Kategori kapal | Bahan bakar/ penyimpanan pilihan dari MCA | Teknologi powertrain | Permintaan energi bahan bakar fosil 2018 | Permintaan energi bahan bakar fosil 2030 | Permintaan energi bahan bakar nol/rendah karbon 2030, serapan 100% | Permintaan energi bahan bakar nol/rendah karbon 2030, asumsi serapan 1% | Permintaan energi bahan bakar nol/rendah karbon 2030, asumsi serapan 5% | Kebutuhan listrik terbarukan 2030, asumsikan penyerapan 100% | Kebutuhan listrik terbarukan 2030, asumsi serapan 1% | Kebutuhan listrik terbarukan 2030, asumsi serapan 5% |
|--|---|----------------------|---|---|--|---|---|--|--|--|
| | | | GWh/thn | GWh/thn | GWh/thn | GWh/thn | GWh/thn | GWh/thn | GWh/thn | GWh/thn |
| Pengangkut curah: besar | Amonia Hijau | ICE - Kompresi | 14,770 | 16,288 | 16,288 | 163 | 814 | 29,086 | 291 | 1,454 |
| Pengangkut curah: kecil | Hidrogen Hijau | ICE - Kompresi | 13,405 | 14,782 | 14,782 | 148 | 739 | 26,397 | 264 | 1,320 |
| Tanker: besar | Amonia Hijau | ICE - Kompresi | 20,079 | 22,143 | 22,143 | 221 | 1,107 | 39,540 | 395 | 1,977 |
| Tanker: kecil | Amonia Hijau | ICE - Kompresi | 11,977 | 13,207 | 13,207 | 132 | 660 | 23,585 | 236 | 1,179 |
| Kontainer: besar | Amonia Hijau | ICE - Kompresi | 572 | 630 | 630 | 6 | 32 | 1,126 | 11 | 56 |
| Kontainer: kecil | Baterai | Motor listrik | 8,060 | 8,888 | 4,938 | 49 | 247 | 5,198 | 52 | 260 |
| Pengangkut orang & kendaraan, besar | Amonia Hijau | ICE - Kompresi | 959 | 1,057 | 1,057 | 11 | 53 | 1,888 | 19 | 94 |
| Pengangkut orang & kendaraan, kecil | Hidrogen Hijau | ICE - Kompresi | 4,838 | 5,336 | 5,336 | 53 | 267 | 9,528 | 95 | 476 |
| Lepas pantai dan jasa | Amonia Hijau | ICE - Kompresi | 2,300 | 2,536 | 2,536 | 25 | 127 | 4,529 | 45 | 226 |
| Perikanan | Amonia Hijau | ICE - Kompresi | 216 | 238 | 238 | 2 | 12 | 426 | 4 | 21 |
| Kapal kecil: Industrial | Baterai | Motor listrik | 31,192 | 34,397 | 19,110 | 191 | 955 | 20,115 | 201 | 1,006 |
| Kapal kecil: Perikanan / kecil | Baterai | Motor listrik | 6,364 | 7,018 | 3,899 | 39 | 195 | 4,104 | 41 | 205 |
| Total seluruhnya | | | 114,731 | 126,521 | 104,164 | 1,042 | 5,208 | 165,520 | 1,655 | 8,276 |
| Total - Baterai | | | | | 27,946 | 279 | 1,397 | 29,417 | 294 | 1,471 |
| Total - Amonia Hijau | | | | | 56,100 | 561 | 2,805 | 100,179 | 1,002 | 5,009 |
| Total - Hidrogen Hijau | | | | | 20,118 | 201 | 1,006 | 35,925 | 359 | 1,796 |

Input untuk perhitungan potensi investasi – Produksi & pengiriman bahan bakar (Kasus rendah pada 2030)

| Jenis bahan bakar | Kebutuhan listrik tahunan | Jam operasional pembangkit produksi per tahun | Kebutuhan kapasitas listrik agregat | Biaya investasi infrastruktur produksi & pengiriman bahan bakar per kapasitas MW | Biaya investasi infrastruktur produksi & pengiriman bahan bakar | Biaya investasi infrastruktur produksi & pengiriman bahan bakar |
|-------------------|---------------------------|---|-------------------------------------|--|---|---|
| | GWh/tahun | Jam/tahun | MW | Kapasitas Juta USD/MW | Juta USD | Miliar rupiah |
| Baterai | 1,471 | 8760 | 168 | 0.15 | 25 | 363,130 |
| Amonia Hijau | 5,009 | 8000 | 626 | 1.58 | 989 | 14,263,191 |
| Hidrogen Hijau | 1,796 | 8000 | 225 | 1.61 | 361 | 5,211,975 |
| Total | 8,276 | | 1,019 | | 1,376 | 19,838,296 |

Input untuk perhitungan potensi investasi - Pembangkit terbarukan (Kasus rendah pada 2030)

| Jenis bahan bakar | Produksi listrik tahunan | Kapasitas yang terpasang | Biaya investasi - Pembangkit terbarukan | Biaya investasi - Pembangkit terbarukan |
|-------------------|--------------------------|--------------------------|---|---|
| | GWh/tahun | MW | Juta USD | Miliar rupiah |
| Solar PV | 5,379 | 2,670 | 1,077 | 15,521,295 |
| Tenaga Air | 1,241 | 363 | 316 | 4,557,932 |
| Angin darat | 414 | 157 | 146 | 2,111,318 |
| Panas bumi | 1,241 | 177 | 266 | 3,834,085 |
| Total | 8,276 | 3,368 | 1,805 | 26,024,630 |

Input untuk perhitungan potensi investasi – Produksi & pengiriman bahan bakar (Kasus tinggi pada 2030)

| Jenis bahan bakar | Kebutuhan listrik tahunan | Jam operasional pembangkit produksi per tahun | Kebutuhan kapasitas listrik agregat | Biaya investasi infrastruktur produksi & pengiriman bahan bakar per kapasitas MW | Biaya investasi infrastruktur produksi & pengiriman bahan bakar | Biaya investasi infrastruktur produksi & pengiriman bahan bakar |
|-------------------|---------------------------|---|-------------------------------------|--|---|---|
| | GWh/tahun | Jam/tahun | MW | Kapasitas Juta USD/MW | Juta USD | Miliar rupiah |
| Baterai | 1,471 | 8760 | 168 | 0.28 | 47 | 677,843 |
| Amonia Hijau | 5,009 | 8000 | 626 | 2.10 | 1,315 | 18,957,405 |
| Hidrogen Hijau | 1,796 | 8000 | 225 | 2.07 | 465 | 6,701,111 |
| Total | 8,276 | | 1,019 | | 1,827 | 26,336,360 |

Input untuk perhitungan potensi investasi - Pembangkit terbarukan (Kasus tinggi pada 2030)

| Jenis bahan bakar | Listrik tahunan yang dihasilkan | Kapasitas terpasang | Biaya investasi - Pembangkit terbarukan | Biaya investasi - Pembangkit terbarukan |
|-------------------|---------------------------------|---------------------|---|---|
| | GWh/tahun | MW | Juta USD | Miliar rupiah |
| Solar PV | 5,379 | 2,670 | 1,615 | 23,281,943 |
| Tenaga air | 1,241 | 363 | 474 | 6,836,898 |
| Angin darat | 414 | 157 | 220 | 3,166,977 |
| Panas bumi | 1,241 | 177 | 399 | 5,751,128 |
| Total | 8,276 | 3,368 | 2,708 | 39,036,945 |

Rangkuman potensi investasi

| | Kasus rendah | Kasus tinggi |
|-----------------------------------|-------------------|-------------------|
| | Miliar rupiah | Miliar rupiah |
| Produksi & pengiriman bahan bakar | 19,838,296 | 26,336,360 |
| Pembangkit terbarukan | 26,024,630 | 39,036,945 |
| Total | 45,862,927 | 65,373,305 |

Lampiran E: Siklus hidup emisi gas rumah kaca dari bahan bakar biru

Seperti dijelaskan di Bagian 1, Hidrogen Hijau adalah istilah yang diterima secara umum untuk produksi hidrogen menggunakan proses *steam methane reforming* (SMR) di mana beberapa emisi karbon dioksida ditangkap dan dicegah agar tidak lepas ke atmosfer. Hidrogen Hijau dan turunannya, Amonia Hijau, dapat memainkan peran penting dalam dekarbonisasi pelayaran. Amonia Hijau memiliki keunggulan karena lebih murah untuk diproduksi daripada Hidrogen Hijau di sebagian besar tempat berdasarkan biaya gas alam saat ini (untuk Hidrogen Hijau) dan energi terbarukan (untuk Hidrogen Hijau) [30].

Siklus hidup emisi gas rumah kaca (GRK) Hidrogen Hijau merupakan pertimbangan penting ketika menilai potensinya sebagai bahan bakar pelayaran rendah karbon. Teknologi penangkapan karbon saat ini tidak menangkap 100% karbon dioksida yang dilepas dari pabrik SMR. Selain itu, ada emisi GRK yang perlu dipertimbangkan dalam rantai pasokan gas alam serta proses di mana karbon dioksida yang ditangkap diangkut dan disimpan. EDF dan UMAS [31] menyarankan bahwa siklus hidup emisi GRK dari bahan bakar pelayaran alternatif harus setidaknya 50% lebih rendah dari siklus hidup emisi bahan bakar konvensional. Oleh karena itu, pengurangan minimal 50% dibandingkan diesel adalah tolok ukur yang berguna untuk menilai kesesuaian bahan bakar biru sebagai opsi rendah karbon untuk sektor perkapalan.

Protokol Gas Rumah Kaca (GRK) digunakan oleh beberapa pemerintah (termasuk pemerintah Inggris) dan perusahaan sebagai standar independen untuk pelaporan emisi GRK. Protokol ini akan digunakan dalam Lampiran ini untuk penilaian siklus hidup emisi GRK Hidrogen Hijau dan diesel. GRK membagi emisi menjadi tiga lingkup terpisah, di mana setiap lingkup mempertimbangkan aspek rantai pasokan yang berbeda. Ini telah diterapkan untuk analisis Hidrogen Hijau dan diesel di bawah ini.

| | Deskripsi | Diesel | Hidrogen biru |
|------------------|--|---------------------------------------|--|
| Lingkup 1 | Emisi langsung pada titik penggunaan | Emisi GRK dari mesin kapal | Emisi GRK dari pembangkit SMR Tidak ada emisi GRK saat hidrogen biru digunakan untuk penggerak kapal) |
| Lingkup 2 | Emisi tidak langsung dari listrik atau panas yang dibeli | Tidak berlaku | Emisi GRK yang terkait dengan listrik yang dikonsumsi oleh pembangkit SMR |
| Lingkup 3 | Emisi rantai nilai termasuk bahan baku | Emisi GRK dalam rantai pasokan diesel | Emisi GRK dalam rantai pasokan gas alam dan proses pengangkutan dan penyimpanan karbon dioksida yang ditangkap |

Emisi Lingkup 1 untuk diesel diberikan dalam Faktor Konversi GRK Pemerintah Inggris untuk Pelaporan Perusahaan 2020 [32] sebagai 0,27 kg CO₂e/kWh¹. Emisi lingkup 1 untuk Hidrogen Hijau dihitung berdasarkan jumlah gas alam yang dikonsumsi oleh pabrik SMR, yang tergantung pada desain pabrik (yaitu efisiensi konversinya).

¹ Dalam Lampiran ini, kecuali dinyatakan lain, semua satuan yang mengacu pada kandungan energi bahan bakar dikutip berdasarkan nilai kalor yang lebih rendah (nilai kalor bersih)

Laporan oleh IEAGHG [33] memberikan gambaran yang berguna tentang desain pabrik yang berbeda dan akan digunakan sebagai dasar untuk analisis di sini. Efisiensi konversi pabrik tergantung pada teknologi penangkapan karbon karena umumnya membutuhkan lebih banyak energi untuk meningkatkan proporsi karbon dioksida yang ditangkap.

Saat ini ada sejumlah kecil proyek penangkapan karbon di dunia yang sudah didemonstrasikan pada skala industri. Sebagian besar telah digunakan di sektor pembangkit listrik fosil. Proyek-proyek ini umumnya kesulitan untuk mencapai tingkat penangkapan sebagaimana dikehendaki pada tahap desain. Satu contoh penting di Kanada berhasil mengurangi tingkat tangkapan target menjadi 65% setelah beberapa tahun beroperasi, setelah awalnya direncanakan mencapai tangkapan 90% ketika pabrik dirancang dan dibangun [34]. Karena itu, kasus-kasus yang dianalisis untuk SMR akan mengasumsikan tingkat penangkapan sekitar 60% karena angka ini mewakili keadaan teknologi saat ini. Kasus desain 1A dan 1B dalam laporan IEAGHG memiliki tingkat tangkapan masing-masing 55,7% dan 66,9%, yang akan digunakan sebagai kasus rendah dan tinggi. Berdasarkan tingkat tangkapan ini, emisi karbon dihitung, masing-masing, pada 4,41 dan 3,47 kg CO₂e/kg hidrogen untuk kasus 1A dan 1B. Berdasarkan kandungan energi, ini adalah setara 0,13 dan 0,10 kg CO₂e/ kWh hidrogen.

Emisi Lingkup 2 tidak berlaku untuk kedua kasus IEAGHG karena pembangkit listrik akan mengeksport listrik, bukan mengimpornya.

Menurut perangkat lunak analisis siklus hidup SimaPro, rerata global emisi lingkup 3 untuk diesel adalah 0,49 kg CO₂e/kg, yang setara dengan 0,041 kg CO₂e/kWh².

Ada berbagai perkiraan untuk emisi lingkup 3 dari gas alam, yang mencerminkan berbagai metode ekstraksi dan yurisdiksi (beberapa dengan peraturan ketat mengenai emisi dan lainnya dengan peraturan yang lebih longgar). Balcombe et. Al. [35] melakukan tinjauan luas terhadap faktor emisi dari rantai pasokan gas alam yang diterbitkan dalam berbagai literatur dari seluruh dunia. Berdasarkan tinjauan mereka atas bukti yang ada, mereka mengusulkan kisaran representatif 0,0031 hingga 0,038 kg CO₂e/MJ HHV10 tanpa pencairan, meningkat menjadi 0,007 hingga 0,058 kg CO₂e/MJ HHV dengan pencairan. Konversi angka-angka ini memberikan kisaran emisi lingkup 3 sebesar 0,013 hingga 0,16 kg CO₂e/kWh gas alam (0,03 hingga 0,25 kg CO₂e/kWh jika gas alam dicairkan dan diregasifikasi).

Untuk kasus 1A di mana efisiensi termal adalah 73,5%, ini menghasilkan rentang lingkup 3 untuk hidrogen 0,017 hingga 0,21 kg CO₂e/kWh; sedangkan untuk kasus 1B di mana efisiensi termal adalah 69,7%, rentang lingkup 3 adalah 0,018 sampai 0,22 kg CO₂e/kWh hidrogen. Kisaran ini mengasumsikan bahwa gas alam tidak dicairkan; jika ya, maka emisi lingkup 3 juga meningkat.

Tabel di bawah ini merangkum hasil-hasil ini di mana gas alam tidak dicairkan untuk transportasi dan diregasifikasi untuk digunakan.

| Hidrogen biru kasus emisi rendah (1B) | Diesel | Hidrogen biru kasus emisi rendah (1B) | Hidrogen biru kasus emisi tinggi (1A) |
|---------------------------------------|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Lingkup 1 | 0.27 | 0.10 | 0.13 |
| Lingkup 3 | 0.041 | 0.018 | 0.21 |
| Total | 0.31 | 0.12 | 0.34 |

² Nilai kalor hidrogen yang lebih rendah = 33.3 kWh/kg

Tabel di bawah ini merangkum hasil yang setara, namun untuk kasus di mana gas alam dicairkan untuk transportasi dan diregasifikasi untuk digunakan.

| kg CO ₂ e/kWh hidrogen | Diesel | Hidrogen biru kasus emisi rendah (1B) | Hidrogen biru kasus emisi tinggi (1A) |
|-----------------------------------|--------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Lingkup 1 | 0.27 | 0.10 | 0.13 |
| Lingkup 3 | 0.041 | 0.04 | 0.32 |
| Total | 0.31 | 0.14 | 0.45 |

Maka, berdasarkan analisis di atas, siklus hidup emisi hidrogen biru adalah antara 39% dan 110% dari emisi siklus hidup diesel, tergantung pada desain pabrik SMR dan rantai pasokan gas alam. Angka ini naik menjadi 45% hingga 145% jika rantai pasokan gas alam melibatkan pencairan dan regasifikasi, sesuatu yang khas jika gasnya diimpor.

Kisaran ini sebagian besar melebihi ambang pengurangan emisi 50% yang disebutkan di atas. Lebih lanjut, perlu dicatat bahwa analisis di atas tidak termasuk emisi GRK yang terkait dengan kompresi, pengangkutan, dan penyimpanan karbon dioksida yang ditangkap untuk memastikan bahwa karbon dioksida pada akhirnya tidak lepas ke atmosfer.

Jika teknologi penangkapan ditingkatkan dan didemonstrasikan mampu mencapai tingkat penangkapan 90% pada skala industri, maka emisi lingkup 1 akan berada di urutan 0,03 kg CO₂e/kWh (Kasus 3 dalam [33]). Dengan asumsi median emisi lingkup 3 tidak termasuk pencairan gas alam dari [35] (0,015 kg CO₂e/MJ HHV), emisi siklus hidup total untuk kasus penangkapan 90% akan menjadi 0,12 kg CO₂e/kWh hidrogen. Ini adalah 39% dari emisi siklus hidup diesel. Untuk kasus yang setara di mana gas alam cair digunakan dengan tingkat penangkapan 90%, emisi siklus hidup adalah 0,17 kg CO₂e/kWh hidrogen (55% solar). Sekali lagi, perkiraan ini mengecualikan emisi yang terkait dengan kompresi, pengangkutan, dan penyimpanan karbon dioksida yang ditangkap.

Sebagai perbandingan dalam konteks Inggris, Komite Perubahan Iklim Inggris [30] memberikan kisaran 0,05 hingga 0,12 kg CO₂e/kWh hidrogen dengan asumsi tingkat penangkapan 95% dan Sadler et al [31] menghitung nilai median 0,13 kg CO₂e/kWh berdasarkan tingkat penangkapan 90%.

Analisis ini menunjukkan bahwa dengan perbaikan teknologi, hidrogen biru dapat memenuhi ambang pengurangan emisi 50% di masa depan, apabila ketentuan berikut terpenuhi:

- i. Tingkat penangkapan yang tinggi secara konsisten pada tingkat 90% telah ditunjukkan dalam praktik pada skala industri;
- ii. Peraturan dan pemantauan yang efektif diterapkan untuk memastikan bahwa emisi dari rantai pasokan gas alam berada dalam batas yang dapat diterima; dan
- iii. Emisi yang terkait dengan penanganan, pengangkutan, dan penyimpanan karbon dioksida yang ditangkap termasuk dalam penghitungan.

Analisis multikriteria pada Lampiran A mencerminkan kenyataan bahwa prasyarat tersebut belum terpenuhi.

Lampiran F: Ringkasan proses untuk berbagai proses produksi bahan bakar hayati

| Biodiesel | Bioetanol | Bio-oil | Biometana |
|--|---|---|--|
| Titik emisi utama terjadi saat bahan bakar dibakar. Biodiesel dapat mencakup FAME, syn-diesel dan HVO jika dikombinasikan dengan hidrogen | Titik emisi utama terjadi ketika bahan bakar dibakar, namun, CO ₂ adalah produk sampingan dari fermentasi, dengan kebutuhan energi yang signifikan untuk distilasi | Titik emisi utama terjadi saat bahan bakar dibakar. Jika pirogas dipancarkan ke atmosfer, itu dapat berkontribusi pada emisi siklus hidup. | LNG dari digestion akan mengeluarkan emisi terutama saat pembakaran, namun, emisi selama digestion dan rantai pasokan dapat berkontribusi pada emisi siklus hidup. |
| Bahan baku | Bahan baku | Bahan baku | Bahan baku |
| Minyak sawit, minyak nabati, minyak goreng | Tanaman dan sisa tanaman (novel) | Berbagai jenis | Biomassa kadar air tinggi |
| Proses Transesterification TRL9 | Proses Fermentation TRL8 | Proses Flash pyrolysis TRL9 | Proses Anaerobic digestion TRL9 |
| Minyak dicampur dengan alkohol (metanol) dan basa kuat (misalnya NaOH) untuk membentuk campuran yang dimurnikan menjadi biodiesel. Gliserol adalah produk sampingan dari proses ini. | Bahan baku digiling dan diproses, membutuhkan sejumlah besar air. Kaldu difermentasi menggunakan ragi dan bakteri. Larutan hasil fermentasi didistilasi untuk menghasilkan bioetanol. | Biomassa diolah terlebih dahulu dengan uap dan kemudian direaksikan dalam lingkungan endotermik dengan oksigen minimal. Produk dipadamkan untuk membentuk prygas dan bio-oil. Arang juga diperoleh kembali. | Biomassa diproduksi dalam biodigester yang dikontrol pH, yang mengandung bakteri. Metana yang dihasilkan dari reaksi disimpan untuk digunakan. Sebagai alternatif, syngas dapat dihasilkan dari biomassa kayu. |
| Biodiesel | Bioetanol | Bio-oil | Biometana |
| Karakteristik serupa dengan diesel konvensional - cocok sebagai bahan bakar pelayaran "drop-in" untuk mesin diesel kecil. | Dapat digunakan sebagai pengganti bensin, untuk pembangkit listrik atau memasak. Aplikasi terbatas untuk sektor pelayaran. | Memerlukan pemrosesan lebih lanjut untuk menghasilkan bio-crude, yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik atau diproses untuk menghasilkan hidrokarbon sintetis lainnya. | Bio-metana dapat disimpan sebagai gas alam terkompresi atau gas alam cair dan digunakan untuk pengiriman dengan mesin yang sesuai. |



Tentang Getting to Zero Coalition

Koalisi Getting to Zero adalah platform yang dipimpin industri untuk kolaborasi yang menyatukan pemangku kepentingan terkemuka dari seluruh rantai nilai maritim dan bahan bakar, sektor keuangan, dan lainnya yang berkomitmen untuk mewujudkan kapal tanpa emisi yang layak secara komersial menjadi kenyataan dengan skala luas pada tahun 2030.

Lebih lanjut di:

www.globalmaritimeforum.org/getting-to-zero-coalition

2021 Seluruh hak cipta

