

POLICY PAPER

Kontribusi Industri Sawit dalam Upaya Dekarbonisasi Sektor Penerbangan: Sebuah Update Perkembangan



POLICY PAPER

Kontribusi Industri Sawit dalam Upaya Dekarbonisasi Sektor Penerbangan: Sebuah *Update* Perkembangan

Indonesia Palm Oil Strategic Studies
2025

Ringkasan Eksekutif

Indonesia memiliki potensi strategis untuk menjadi produsen utama *Sustainable Aviation Fuel* (SAF) global, seiring perannya sebagai penghasil minyak sawit terbesar dunia. Dengan produksi tahunan sekitar 50 juta ton CPO dan jutaan ton produk samping serta limbah, industri sawit Indonesia menyimpan cadangan bahan baku melimpah untuk berbagai jalur konversi SAF yang telah diakui secara internasional.

Terdapat tiga jalur teknologi utama yang sesuai dengan karakteristik hasil olahan kelapa sawit:

1. Hydroprocessed Esters and Fatty Acids (HEFA), jalur paling matang secara komersial, cocok untuk bahan baku seperti CPO, PFAD, RBDPKO, minyak POME, dan UCO.
2. Alcohol-to-Jet (ATJ), menggunakan gliserol serta biomassa sawit (seperti tandan kosong, pelepah, dan batang) yang difermentasi menjadi bioalkohol.
3. Fischer-Tropsch (FT), mengonversi biomassa sawit melalui gasifikasi menjadi syngas, lalu disintesis menjadi bahan bakar jet berkualitas tinggi.

Data menunjukkan potensi total bahan baku SAF dari industri sawit Indonesia dapat mencapai lebih dari 470 juta ton per tahun, termasuk produk utama, sampingan, dan limbah. Beberapa bahan baku seperti PFAD (20,7 gCO₂e/MJ) dan UCO (13,9 gCO₂e/MJ) telah diakui oleh ICAO memenuhi standar *CORSIA* karena nilai emisinya yang rendah. Sementara itu, bahan baku seperti CPO hanya dapat dianggap berkelanjutan jika diproses menggunakan teknologi *methane capture* untuk menekan emisi. Indonesia juga telah secara aktif mengusulkan pengakuan minyak dari POME sebagai bahan baku SAF ke ICAO. Proses ini melibatkan kerja sama lintas kementerian, pelibatan pakar LCA, dan pendampingan teknis dari mitra internasional. Langkah ini sangat penting agar potensi bahan baku dari limbah sawit dapat diakui secara global dan memperoleh nilai emisi default yang kompetitif. Dengan infrastruktur industri sawit yang telah berkembang, dukungan kebijakan pemerintah, dan meningkatnya kebutuhan SAF global, Indonesia memiliki peluang besar untuk memimpin pasar SAF berkelanjutan berbasis kelapa sawit. Perluasan riset, percepatan pengembangan teknologi konversi, dan penguatan posisi dalam forum internasional menjadi kunci keberhasilan strategi ini.

Kata kunci:

Kelapa Sawit, Sustainable Aviation Fuel, HEFA, Biomassa Sawit, CORSIA

Daftar Isi

Ringkasan Eksekutif	2
Latar Belakang	4
Permasalahan	7
<i>Eligible Fuel</i> SAF	8
Teknologi Konversi SAF	9
Nilai <i>Default</i> Emisi Bahan Baku SAF	11
Tantangan Mewujudkan <i>Eligible Fuel</i> SAF bagi Industri Sawit Indonesia	12
Metode Neraca Massa Sawit untuk Perhitungan Potensi Bahan Baku SAF	14
Potensi Bahan Baku SAF dari Kelapa Sawit	16
<i>Update</i> Perkembangan Pengusulan POME sebagai Bahan Baku SAF	18
Kesimpulan :	20
Referensi	22

Latar Belakang

Dalam upaya dekarbonisasi sektor penerbangan, IPOSS telah melakukan serangkaian kajian mendalam untuk menegaskan posisi industri sawit Indonesia dalam mendukung upaya tersebut. Menurut data dari *International Energy Agency* (IEA), pada tahun 2023, sektor penerbangan menyumbang sekitar 2,5% dari total emisi CO₂ terkait energi secara global, dengan total emisi mencapai hampir 950 juta ton CO₂ (IEA, 2024). Meskipun kontribusinya terhadap emisi global relatif kecil, penerbangan merupakan salah satu sektor yang paling menantang untuk didekarbonisasi karena ketergantungannya pada bahan bakar cair berenergi tinggi dan keterbatasan teknologi alternatif yang tersedia saat ini (*International Energy Agency*, 2024a).

Salah satu pendekatan utama dalam dekarbonisasi penerbangan adalah pengembangan bahan bakar penerbangan berkelanjutan (*Sustainable Aviation Fuel/SAF*). Namun, produksi SAF menghadapi tantangan signifikan, termasuk keterbatasan bahan baku berkelanjutan dan tingginya biaya produksi (*Roundtable on Sustainable Biomaterials*, 2024). Di kawasan Asia Tenggara, termasuk Indonesia, limbah pertanian dan residu industri kelapa sawit telah diidentifikasi sebagai bahan baku potensial untuk SAF, dengan catatan bahwa sumber tersebut memenuhi prinsip-prinsip keberlanjutan (*Roundtable on Sustainable Biomaterials*, 2024).

Indonesia telah menunjukkan kemajuan dalam pengembangan SAF berbasis kelapa sawit. Studi kasus di Indonesia menunjukkan bahwa produk seperti J2.0 dan J2.4 yang dikembangkan dari kelapa sawit mampu mengurangi emisi dan berpotensi memenuhi spesifikasi aviasi internasional (Nugroho et al., 2024). SAF menarik karena kompatibilitasnya langsungnya dengan infrastruktur penerbangan yang ada dan potensinya dalam mendukung target emisi nol bersih (*net zero*).

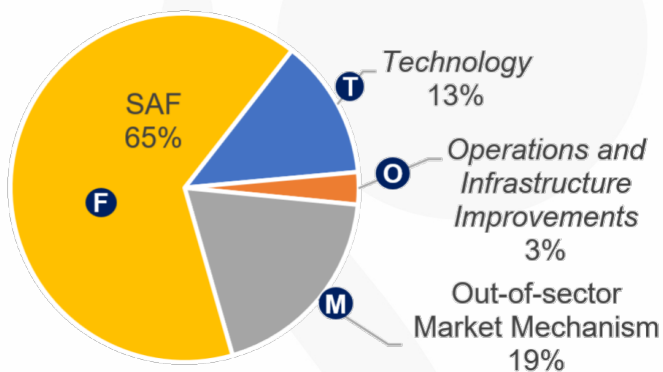
Namun demikian, dekarbonisasi sektor penerbangan tetap menjadi tantangan besar. Menurut Clean Air Task Force (2022), upaya ini menuntut kebijakan yang koheren dan ambisius, termasuk insentif untuk mempercepat pengembangan dan adopsi bahan bakar alternatif rendah karbon, serta kolaborasi lintas sektor dan lintas negara.

SAF adalah bahan bakar terbarukan yang menurut International Civil Aviation Organization (ICAO, 2024a) telah memenuhi standar keberlanjutan melalui skema CORSIA. SAF dapat diproduksi dari limbah lemak, minyak bekas, residu pertanian, limbah padat kota, dan tanaman non-pangan (IATA, 2023a; ICAO, 2024b). Menurut perkiraan International Air Transport Association (IATA,

2023b), SAF memiliki potensi untuk mengurangi emisi karbon hingga 80% dibandingkan bahan bakar jet fosil. IATA (2023b) juga memperkirakan bahwa SAF dapat menyumbang hingga 65% dari total pengurangan emisi yang dibutuhkan untuk mencapai target net zero emisi sektor penerbangan pada tahun 2050. Namun demikian, produksi SAF masih berada pada tahap awal dan perlu peningkatan kapasitas secara drastis untuk memenuhi permintaan global (IATA, 2024b). ICAO (2024c) telah menerbitkan panduan kebijakan global untuk mendorong investasi dan implementasi SAF. Sejumlah studi juga menyatakan bahwa SAF memainkan peran penting dalam strategi dekarbonisasi sektor penerbangan, termasuk kontribusinya terhadap pengurangan emisi siklus hidup bahan bakar (Grimme, 2024; Staples et al., 2018; Pavlenko et al., 2019). Selain itu, SAF dianggap sebagai solusi yang kompatibel dengan infrastruktur penerbangan yang ada tanpa memerlukan modifikasi besar pada mesin pesawat atau sistem logistik (U.S. Department of Energy, 2020; Salkeld et al., 2020).

Berdasarkan perkiraan *International Air Transport Association* (IATA, 2024a), bahan bakar SAF dapat berkontribusi sekitar 65% dari total pengurangan emisi yang dibutuhkan untuk mencapai emisi nol bersih (*net zero*) sektor penerbangan jika diterapkan secara penuh pada tahun 2050 (Gambar 1).

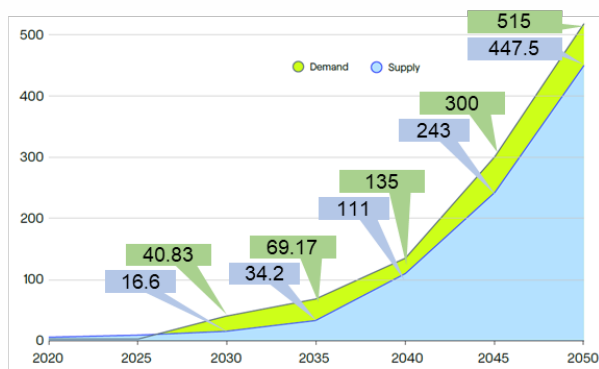
Gambar 1. Kontributor pengurangan Emisi Sektor Penerbangan



Sumber : IATA (2024a)

Permintaan global untuk SAF diperkirakan akan mengalami pertumbuhan tahunan sebesar 26,2% (CAGR) dari tahun 2022 hingga 2050 (Topsoe, 2023; Transparency Market Research, 2024). World Economic Forum (2024) memperkirakan bahwa pada tahun 2030, permintaan global SAF akan mencapai 17 juta ton per tahun, yang mewakili sekitar 4-5% dari total konsumsi bahan bakar jet. Namun, produksi saat ini belum mencukupi untuk memenuhi permintaan tersebut, menunjukkan perlunya investasi dan kebijakan yang mendukung untuk meningkatkan kapasitas produksi SAF secara global.

Gambar 2. Prediksi Demand SAF Global, 2020-2050 (juta ton)



Sumber : Topsoe (2023)

Dalam dokumen ICAO berjudul *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels*, dijelaskan bahwa ICAO telah menetapkan nilai default emisi karbon untuk bahan bakar yang memenuhi syarat CORSIA (ICAO, 2024d). CORSIA, singkatan dari *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*, merupakan skema pengimbangan dan pengurangan emisi karbon untuk penerbangan internasional yang diinisiasi oleh ICAO (ICAO, 2024e). Tujuan utama CORSIA adalah untuk menstabilkan emisi karbon dari sektor penerbangan global dengan mengimbangi emisi yang tidak dapat dihindari melalui pembelian kredit karbon (IATA, 2024c). Dengan adanya skema ini, maka industri penerbangan akan terdorong untuk berinovasi dalam penggunaan teknologi dan praktik operasional yang dapat mengurangi emisi karbon (Eco-Act, 2024).

Permasalahan

Dalam upaya dekarbonisasi sektor penerbangan, skema Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA) yang dikembangkan oleh International Civil Aviation Organization (ICAO) memberikan mekanisme bagi operator penerbangan internasional untuk mengklaim pengurangan emisi karbon melalui penggunaan bahan bakar penerbangan berkelanjutan (SAF). Perhitungan emisi dalam skema ini dapat didasarkan pada nilai emisi siklus hidup default (Default Life Cycle Emissions) yang ditetapkan ICAO (ICAO, 2024d) maupun nilai emisi siklus hidup aktual (Actual Life Cycle Emissions) dengan mengikuti metodologi yang ditetapkan oleh ICAO (ICAO, 2024f).

Indonesia, sebagai produsen kelapa sawit terbesar di dunia, memiliki potensi yang sangat besar untuk memenuhi permintaan SAF global, baik melalui produk utama seperti Crude Palm Oil (CPO) maupun produk limbah seperti palm oil mill effluent (POME). Oleh karena itu, tulisan ini akan mengeksplorasi sejauh mana potensi bahan baku dari industri sawit Indonesia untuk memenuhi permintaan SAF dunia, khususnya dalam konteks keberterimaan internasional berdasarkan metodologi penilaian siklus hidup yang diterapkan oleh ICAO (ICAO, 2024f; Pavlenko et al., 2019; Nugroho et al., 2024). Selain itu, penting untuk dikaji seberapa besar penghematan emisi karbon yang dapat diperoleh dari pemanfaatan produk kelapa sawit tersebut, jika digunakan secara luas di sektor penerbangan internasional sesuai dengan standar CORSIA (ICAO, 2024f; IATA, 2023; U.S. Department of Energy, 2020). Tulisan ini juga bertujuan untuk menyampaikan update mengenai perkembangan pengusulan POME sebagai salah satu feedstock SAF potensial di Indonesia yang akan dikaji nilai default Life Cycle Assessment (LCA) bersama Committee on Aviation Environmental Protection (CAEP) ICAO untuk dipublikasikan dalam CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels (ICAO, 2024g).

Eligible Fuel SAF

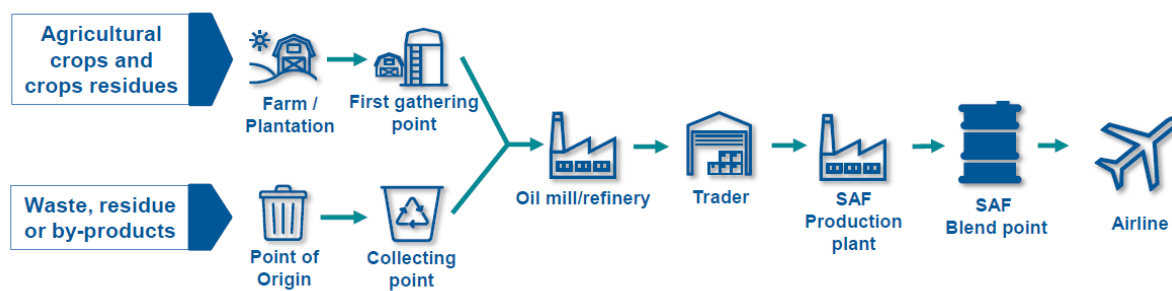
Dalam kerangka skema CORSIA, ICAO menetapkan bahwa suatu bahan bakar dapat dikategorikan sebagai SAF apabila memenuhi persyaratan pengurangan emisi gas rumah kaca (GRK) minimal 10% dibandingkan dengan bahan bakar jet konvensional, berdasarkan penilaian siklus hidup (ICAO, 2024h).

Sejak 2019, ICAO telah menerbitkan dokumen *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels* yang mencantumkan nilai default emisi untuk berbagai kombinasi bahan baku dan jalur teknologi konversi SAF. Nilai-nilai default ini ditetapkan oleh Dewan ICAO berdasarkan pendekatan atribusi dalam LCA, yang menghitung aliran massa dan energi di sepanjang rantai nilai produksi bahan bakar, tanpa mempertimbangkan efek perpindahan yang terkait dengan produk sampingan; emisi dialokasikan ke seluruh produk sampingan berdasarkan kandungannya (ICAO, 2024d ; ICAO, 2024f).

Sebaliknya, untuk menghitung emisi yang disebabkan oleh perubahan penggunaan lahan (*Induced Land Use Change / ILUC*), ICAO menggunakan pendekatan konsekuensial, yang mempertimbangkan dampak tidak langsung dari produksi bahan bakar terhadap perubahan penggunaan lahan. Nilai total emisi GRK siklus hidup (*Life Cycle Emission Factor / LCEF*) untuk SAF tertentu diperoleh dengan menjumlahkan nilai emisi dari 'Core LCA' dan 'ILUC' (ICAO, 2024f).

'Core LCA' mencakup seluruh tahapan produksi SAF, mulai dari budidaya bahan baku, panen, ekstraksi, transportasi, proses konversi menjadi bahan bakar, distribusi, hingga pembakaran di mesin pesawat (ICAO, 2024g). Dapat dilihat pada Gambar di bawah ini.

Gambar 3. Siklus Hidup Produksi SAF



Sumber : ICAO (2024g)

Sementara itu, ILUC memperhitungkan emisi gas rumah kaca yang timbul akibat perubahan penggunaan lahan secara tidak langsung, sebagai konsekuensi dari meningkatnya permintaan terhadap bahan baku biomassa untuk produksi SAF. Misalnya, pembukaan hutan atau konversi lahan gambut menjadi lahan pertanian untuk menanam tanaman energi dapat menghasilkan emisi tambahan yang signifikan, dan hal ini dikategorikan sebagai dampak ILUC (Searchinger et al., 2008; ICAO, 2024f). Namun demikian, ICAO secara eksplisit menetapkan bahwa bahan baku yang berasal dari limbah, residu industri, dan produk samping, termasuk Palm Oil Mill Effluent (POME), limbah pertanian, dan minyak goreng bekas, tidak dikenakan faktor ILUC. Hal ini disebabkan karena bahan-bahan tersebut tidak memicu permintaan lahan baru dan oleh karena itu dianggap tidak berkontribusi terhadap perubahan tata guna lahan secara langsung maupun tidak langsung (ICAO, 2024f; Carraro et al., 2016). Pendekatan ini memberikan keunggulan strategis bagi negara-negara produsen limbah pertanian & perkebunan seperti Indonesia, karena memungkinkan bahan baku seperti POME digunakan sebagai SAF tanpa beban tambahan emisi dari ILUC, sehingga berpotensi menghasilkan nilai intensitas karbon yang lebih rendah.

Teknologi Konversi SAF

Setiap bahan bakar penerbangan alternatif yang memenuhi syarat menurut skema CORSIA harus mematuhi standar teknologi konversi bahan bakar yang ditetapkan oleh ASTM International. Salah satu standar utama dalam proses ini adalah ASTM D4054, yang merupakan pedoman untuk evaluasi dan persetujuan bahan bakar turbin penerbangan baru, bahan bakar campuran serta aditif (ASTM International, 2022).

ASTM D4054 memberikan kerangka kerja yang sistematis bagi produsen bahan bakar untuk mengembangkan data yang diperlukan dalam mendukung peninjauan dan persetujuan oleh anggota ASTM. Proses ini mencakup

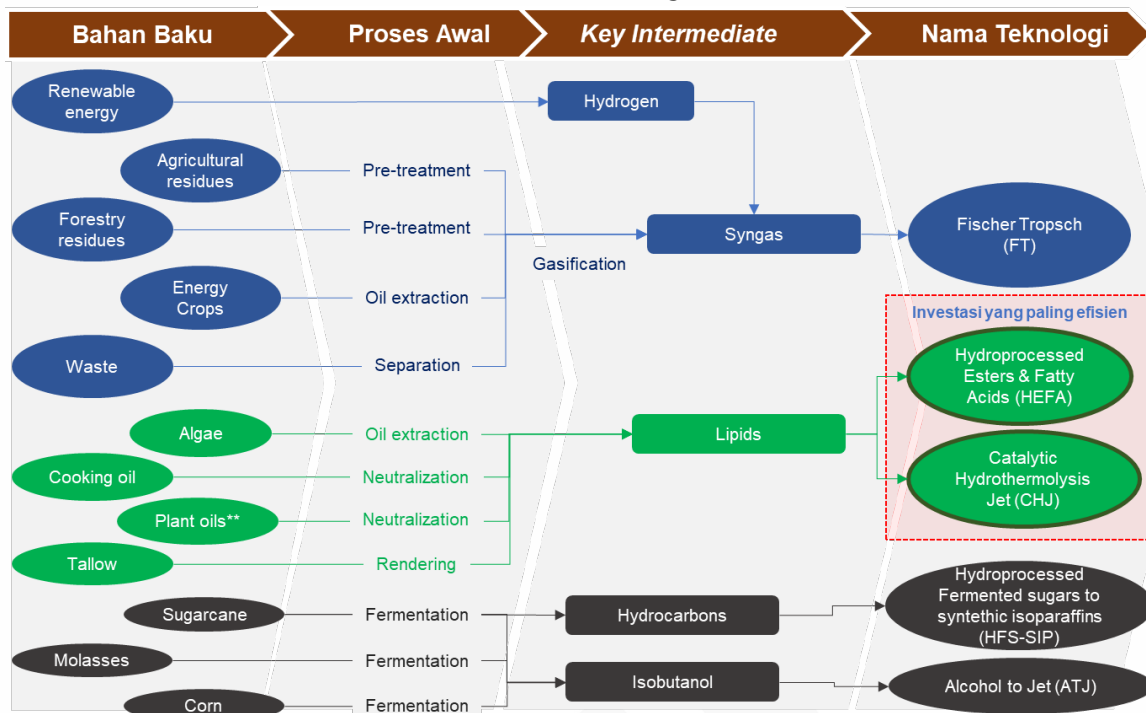
pengujian laboratorium, uji rig, dan uji mesin, serta interaksi dengan produsen peralatan asli (OEM) dan otoritas penerbangan sipil seperti FAA dan EASA. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa bahan bakar baru atau aditif tidak hanya memenuhi spesifikasi teknis tetapi juga kompatibel dengan infrastruktur penerbangan yang ada dan tidak menimbulkan risiko terhadap keselamatan operasional (ASTM International, 2022).

Proses evaluasi dalam ASTM D4054 terdiri dari beberapa tahapan, termasuk pengujian sifat fisik dan kimia, kompatibilitas dengan material sistem bahan bakar, serta kinerja dalam kondisi operasional yang representatif. Data yang dihasilkan dari proses ini digunakan untuk mendukung pengembangan dan penerbitan spesifikasi baru atau revisi spesifikasi yang ada, seperti ASTM D7566 untuk bahan bakar turbin penerbangan yang mengandung hidrokarbon sintesis (SkyNRG, 2022). Dengan demikian, kepatuhan terhadap standar ASTM D4054 merupakan langkah krusial dalam memastikan bahwa bahan bakar penerbangan alternatif, termasuk SAF, dapat diintegrasikan secara aman dan efisien ke dalam sistem penerbangan global yang ada.

Dengan kata lain, tidak semua bahan bakar yang lolos ASTM D4054 otomatis memenuhi syarat CORSIA; hanya bahan bakar yang telah terverifikasi secara lingkungan maupun teknis yang dapat diklaim dalam kerangka pengurangan emisi penerbangan internasional (ICAO, 2024f). Untuk saat ini, telah ada 6 proses teknologi konversi SAF yang memenuhi ASTM D4054, antara lain:

1. ASTM D7566 Annex 1 - **Fischer-Tropsch** hydroprocessed synthesized paraffinic kerosene (**FT**)
2. ASTM D7566 Annex 2 - Synthesized paraffinic kerosene dari **hydroprocessed esters and fatty acids (HEFA)**
3. ASTM D7566 Annex 3 - **Synthesized iso-paraffins** dari hydroprocessed fermented sugars (**SIP**)
4. ASTM D7566 Annex 4 - **Synthesized kerosene with aromatics** diturunkan dari alkylation of light aromatics dari non-petroleum sources (FT-SKA)
5. ASTM D7566 Annex 5 - **Alcohol to jet** synthetic paraffinic kerosene (**ATJ-SPK**)
6. ASTM D1655. **Co-processing HEFA** di mana bahan baku lemak, oli, dan *grease* diolah sekaligus bersamaan dengan proses pemurnian minyak bumi di kilang.

Gambar 4. Jalur Teknologi Konversi SAF



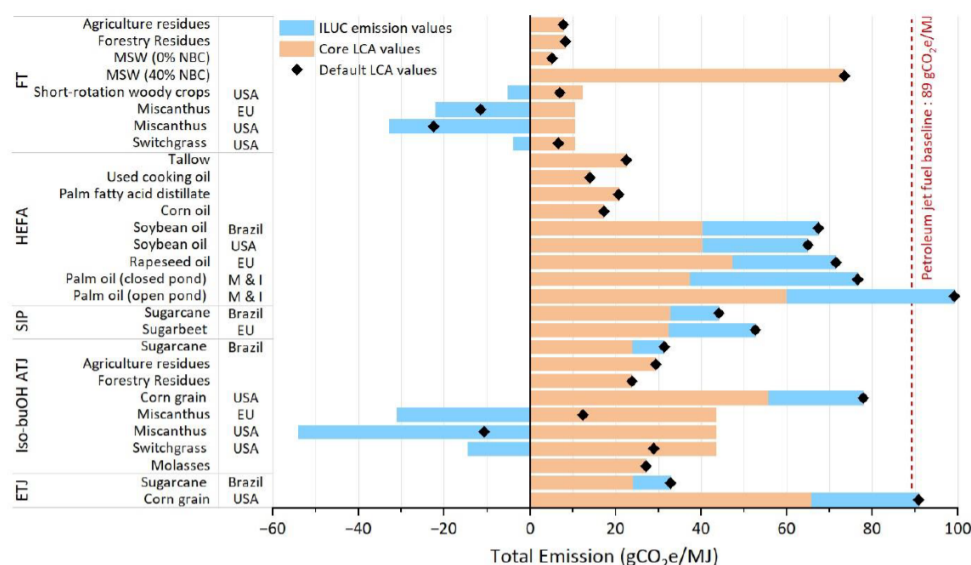
Sumber : Rolland Berger (2020)

Nilai *Default* Emisi Bahan Baku SAF

Dari masing-masing jalur teknologi pengolahan SAF yang telah disertifikasi oleh ASTM melalui standar D4054, ICAO kemudian melakukan proses evaluasi terhadap setiap usulan bahan baku yang digunakan dalam produksi SAF. Proses ini mencakup penilaian apakah bahan baku tersebut tidak hanya layak secara teknis untuk digunakan dalam penerbangan, tetapi juga memenuhi standar keberlanjutan yang ditetapkan dalam skema CORSIA. Hanya bahan baku yang lolos dari kedua aspek tersebut, teknis dan lingkungan, yang kemudian dapat diklasifikasikan sebagai CORSIA Eligible Fuels (CEF) (ICAO, 2024h; ASTM International, 2022).

Selanjutnya, ICAO menetapkan nilai emisi siklus hidup untuk setiap kombinasi bahan baku dan jalur teknologi pengolahan SAF melalui dokumen *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels* (ICAO, 2024h). Nilai ini dihitung berdasarkan metodologi LCA yang telah dikembangkan oleh CAEP ICAO, yang terdiri dari dua komponen utama, yaitu core LCA emissions dan Induced Land Use Change (ILUC) emissions (ICAO, 2024d). Penetapan nilai emisi siklus hidup ini memungkinkan operator penerbangan untuk mengklaim pengurangan emisi berdasarkan perhitungan ilmiah dan standar internasional yang transparan, baik menggunakan nilai default maupun nilai aktual yang dikembangkan oleh penyedia bahan bakar (ICAO, 2024i).

Gambar 5. Grafik Nilai Emisi LCA Berdasarkan Teknologi dan Bahan Baku SAF



Sumber : ICAO (2024g)

Dari grafik di atas dapat dilihat nilai emisi total merupakan penjumlahan dari nilai emisi Core LCA dan ILUC. Nilai emisi diukur dalam satuan gram CO₂ ekuivalen per megajoule (gCO₂e/MJ) yang artinya emisi yang dihasilkan dari setiap energi yang dihasilkan dari bahan bakar. Sebagai contoh, soybean oil atau minyak kacang kedelai yang menjadi bahan baku SAF diolah dengan teknologi HEFA di regional Brazil memiliki nilai Core LCA sebesar 40.4 gCO₂e/MJ ditambah ILUC sebesar 27.0 gCO₂e/MJ, maka total nilai emisi sebesar 67.4 gCO₂e/MJ. Jika dibandingkan dengan *palm oil (close pond)* atau minyak sawit yang menggunakan teknik *methane capture* di kolam limbahnya dapat dilihat nilai Core LCA ditetapkan defaultnya sebesar 37.4 gCO₂e/MJ dan ILUC 39.1 gCO₂e/MJ, sehingga total emisi menjadi 76.5 gCO₂e/MJ. Berdasarkan kriteria 1.1 CORSIA Sustainability, bahan bakar SAF membutuhkan persyaratan yakni harus ada pengurangan emisi minimal 10% dibandingkan dengan CORSIA *baseline*, artinya total emisi bahan baku SAF tersebut sebesar maksimal 80.1 gCO₂e/MJ (10% di bawah 89 gCO₂e/MJ untuk *jet fuel*).

Oleh karena itu, ketika dievaluasi, tidak semua bahan baku dapat memenuhi kriteria keberlanjutan CORSIA. Misalnya CPO yang diolah tanpa *methane capture (open pond)*, memiliki total nilai default emisi sebesar 99.1 gCO₂e/MJ dan corn grain (global) sebesar 85.5 gCO₂e/MJ.

Tantangan Mewujudkan *Eligible Fuel* SAF bagi Industri Sawit Indonesia

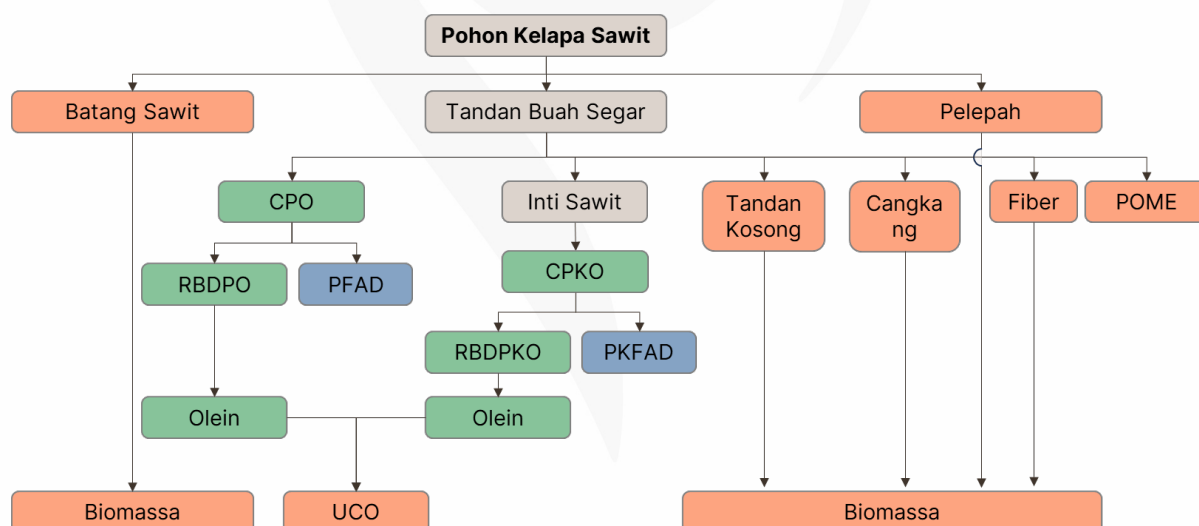
Sebagai produsen minyak sawit terbesar di dunia, Indonesia mampu menghasilkan produksi sekitar 50 juta ton CPO per tahun dan CPKO sebesar 4.8 juta ton (GAPKI, 2024). Jumlah tersebut mencapai hampir 60% dari produksi

minyak sawit dunia atau sekitar 24% dari total minyak nabati dunia. Volume produksi yang cukup besar tersebut dihasilkan dari pengelolaan lahan kelapa sawit yang mencapai 16,38 juta hektar (Kementerian Pertanian, 2019).

Potensi besar produksi minyak sawit Indonesia tidak hanya menjadikannya sebagai kontributor utama dalam pemenuhan kebutuhan pangan dan industri oleokimia global, tetapi juga membuka peluang strategis untuk penyediaan bahan baku dalam produksi SAF. Dengan melibatkan teknologi konversi mutakhir seperti *Hydroprocessed Esters and Fatty Acids* (HEFA), *Alcohol-to-Jet* (ATJ), dan *Fischer-Tropsch* (FT), industri sawit nasional memiliki peran penting dalam mendukung transisi energi menuju dekarbonisasi sektor penerbangan internasional (IEA, 2022; Pavlenko et al., 2019; ICAO, 2024f).

Proses produksi kelapa sawit secara alamiah menghasilkan beragam output yang diklasifikasikan ke dalam produk utama, produk sampingan (*by-product*), serta limbah (*waste*). Produk utama seperti *Crude Palm Oil* (CPO), *Crude Palm Kernel Oil* (CPKO), serta turunannya, seperti olein, merupakan komoditas yang telah digunakan luas dalam sektor pangan dan industri (GAPKI, 2024). Sementara itu, Palm Fatty Acid Distillate (PFAD) dan Palm Kernel Fatty Acid Distillate (PKFAD) merupakan hasil sampingan dari proses pemurnian yang memiliki potensi tinggi sebagai *feedstock* SAF karena sifatnya yang tidak bersaing langsung dengan pangan (*non-food grade*) dan ketersediaannya dalam skala yang cukup besar, yakni 4% dari volume CPO (Carraro et al., 2021; Pavlenko, et al., 2019).

Gambar 6. Pengklasifikasian Jenis Produk Pohon Kelapa Sawit



Keterangan :

Main Product Waste By-Product

Sumber : IPOSS (2025)

Tak hanya itu, sektor hilir kelapa sawit juga menghasilkan limbah dalam bentuk cair dan padat. Limbah cair berupa *Palm Oil Mill Effluent* (POME) yang dikumpulkan dalam kolam limbah merupakan hasil proses pengolahan kelapa sawit yang sebelumnya lebih dikenal sebagai sumber metana (CH_4), namun kini sedang dikembangkan sebagai bahan baku potensial SAF, terutama karena tidak menginduksi perubahan penggunaan lahan (*zero ILUC*) (ICAO, 2024f; Topsoe, 2023). Sedangkan limbah padat dalam bentuk biomassa seperti tandan kosong (*empty fruit bunches*), cangkang, serat (fiber), pelepah, dan batang sawit berpotensi dikonversi menjadi bahan bakar melalui jalur teknologi termokimia seperti FT atau pirolisis (U.S. Department of Energy, 2020).

Menariknya, sisa dari aktivitas konsumen berupa *Used Cooking Oil* (UCO) yang berasal dari *olein* juga telah terbukti layak sebagai *feedstock* SAF dan bahkan saat ini menjadi salah satu bahan baku utama dalam produksi SAF berbasis limbah di Eropa dan Amerika Serikat (European Commission, 2023; IATA, 2023c). Dengan demikian, sistem nilai sawit Indonesia, dari hulu hingga hilir, termasuk residu dan limbahnya dapat menawarkan potensi yang strategis dalam mendukung agenda global dekarbonisasi transportasi udara.

Metode Neraca Massa Sawit untuk Perhitungan Potensi Bahan Baku SAF

Konversi SAF dari berbagai bahan baku baik yang mengandung minyak dan lemak baik dari produk utama maupun *by product* dan limbah ataupun dari biomassa tergantung pada jalur teknologi yang digunakan. Metode HEFA (ASTM D7566 Annex 2) dan Co-HEFA (ASTM D1655) dapat diterapkan untuk mengubah golongan minyak dari industri sawit seperti CPO, RBDPO, CPKO, RBDPKO, PFAD, POME Oil serta UCO menjadi SAF. Sedangkan metode FT (ASTM D7566 Annex 1) dan ATJ (ASTM D7566 Annex 5) dapat diterapkan pada biomassa sawit baik melalui proses gasifikasi maupun proses bioalkohol.

Teknologi HEFA, merupakan jalur konversi bahan bakar berkelanjutan yang saat ini paling matang secara komersial dan telah diadopsi luas dalam produksi SAF. Salah satu keunggulan utama dari HEFA adalah kompatibilitasnya yang tinggi terhadap bahan baku yang mengandung trigliserida, termasuk minyak nabati dan lemak hewani (ICAO, 2024f; Pavlenko et al., 2019). Dalam konteks ini, minyak sawit mentah (*Crude Palm Oil* atau CPO) dan turunannya sangat cocok untuk digunakan dalam proses hidrotreating dan hydrocracking yang menjadi inti dari jalur HEFA. Minyak inti sawit (CPKO), meskipun lebih banyak dimanfaatkan untuk industri makanan dan kosmetik, juga memiliki karakteristik kimia yang sesuai untuk proses hidrotreating setelah dimurnikan menjadi RBDPKO. PT Pertamina telah melakukan uji coba produksi SAF menggunakan metode Co-HEFA di kilang Dumai dan Plaju dengan

menggunakan bahan baku dari industri sawit, salah satunya adalah RBDPKO (*Refined Bleached Deodorized Palm Kernel Oil*). Proses ini melibatkan pencampuran RBDPKO dengan minyak bumi dalam unit hidrotreater untuk menghasilkan bahan bakar jet yang dapat digunakan langsung setelah pemisahan fraksi (Pertamina, 2023). Keberhasilan uji coba ini tidak hanya membuktikan kelayakan teknis RBDPKO sebagai bahan baku SAF, tetapi juga memperlihatkan potensi besar dari teknologi co-processing HEFA dalam mendukung target dekarbonisasi sektor energi dan transportasi udara nasional (ESDM, 2023). Namun demikian, potensi RBDPKO sebagai *feedstock* SAF secara kuantitatif lebih terbatas dibandingkan CPO. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa volume inti sawit (*kernel*) hanya sekitar 4,5% dari total Tandan Buah Segar (TBS), dan dari volume tersebut, hanya sekitar 50% dapat dikonversi menjadi RBDPKO setelah proses ekstraksi dan pemurnian (Gapki, 2024).

Selain itu, produk sampingan dari pengolahan CPO seperti *Palm Fatty Acid Distillate* (PFAD), asam lemak bebas, dan gliserol memiliki potensi besar sebagai *feedstock* alternatif, mengingat karakteristiknya yang mengandung senyawa hidrokarbon rantai panjang yang sesuai untuk konversi menjadi bahan bakar. PFAD, misalnya, telah diakui sebagai bahan baku berkelanjutan oleh ICAO karena merupakan produk samping yang tidak secara langsung bersaing dengan kebutuhan pangan dan tidak dibebani dengan ILUC sehingga ditetapkan nilai default emisi yang rendah (20.7 gCO₂e/MJ). Potensi PFAD dapat diperkirakan sebesar 5% dari CPO yang diolah. Gliserol, sebagai hasil samping dari proses transesterifikasi dalam produksi biodiesel, dapat dikonversi menjadi bioalkohol seperti etanol dan isobutanol, yang selanjutnya dapat digunakan dalam proses ATJ untuk menghasilkan SAF. Potensi Gliserol diperkirakan sekitar 8% dari volume CPO yang diolah menjadi Biodiesel.

Selain itu, limbah cair industri sawit seperti *palm oil mill effluent* (POME) yang selama ini menjadi sumber pencemaran lingkungan di air sungai maupun di udara melalui pelepasan gas rumah kaca, dapat dimanfaatkan minyak yang terkandung di dalamnya untuk dikonversi menjadi SAF melalui jalur HEFA. Besaran potensi minyak di dalam POME bervariasi, sekitar 0,35%-0,87% terhadap volume TBS. Ini akan memberikan solusi ganda, yakni mengurangi dampak lingkungan dan meningkatkan nilai tambah limbah menjadi energi terbarukan.

Tak kalah penting, biomassa kelapa sawit seperti tandan kosong (EFB), cangkang, serat dan batang kelapa sawit dapat dikonversi menjadi bioalkohol melalui proses biokimia maupun termokimia sebagai bahan baku jalur ATJ. Pengembangan teknologi ini, meskipun masih menghadapi tantangan teknis dan ekonomis, menunjukkan potensi signifikan dalam jangka menengah hingga panjang untuk diversifikasi sumber SAF.

Jalur konversi Fischer-Tropsch (FT) juga menawarkan potensi signifikan dalam pemanfaatan sumber daya sawit Indonesia untuk produksi SAF. Proses FT merupakan teknologi termokimia yang mengubah sintesis gas (syngas) campuran hidrogen dan karbon monoksida yang diperoleh dari gasifikasi biomassa menjadi hidrokarbon rantai panjang yang dapat disuling menjadi bahan bakar jet.

Dalam konteks industri sawit, biomassa padat seperti tandan kosong (EFB), fiber, cangkang kelapa sawit dan bahkan batang kelapa sawit merupakan *feedstock* yang ideal untuk dikonversi menjadi syngas melalui proses gasifikasi. Indonesia yang menghasilkan ratusan juta ton biomassa sawit setiap tahun memiliki keunggulan komparatif untuk mendukung jalur FT secara berkelanjutan. Dengan pengolahan yang tepat, biomassa ini tidak hanya membantu dekarbonisasi sektor energi, tetapi juga mengurangi emisi metana dan CO₂ dari pembusukan limbah organik di lapangan. Integrasi jalur FT dalam industri sawit juga membuka peluang co-production, di mana produk samping seperti wax, pelumas, atau bahan kimia khusus juga dapat dihasilkan, memberikan nilai ekonomi tambahan. Tantangan utama saat ini adalah investasi awal yang tinggi dan skala ekonomi, namun dengan meningkatnya tuntutan pasar terhadap SAF dan insentif global untuk teknologi hijau, potensi ini semakin relevan untuk dikembangkan di Indonesia.

Dalam menghitung potensi biomassa sawit dari limbah tersebut dapat digunakan asumsi sebagai berikut :

- Luas areal kelapa sawit : 16,38 juta hektar
- Volume TBS per tahun : 250 juta ton
- Rasio peremajaan per tahun : 4%
- Rendemen Kernel : 4.5% dari TBS
- Rendemen minyak inti sawit : 50% dari kernel
- Rendemen tandan kosong : 21% dari TBS
- Rendemen cangkang : 6.4% dari TBS
- Rendemen Fiber : 14.4% dari TBS
- Kerapatan pohon rata-rata : 120 pohon per hektar
- Jumlah pelepah per tahun yang dipotong : 20 pelepah
- Berat pelepah : 7 kg per pelepah
- Berat basah batang sawit : 400 kg / pohon

Potensi Bahan Baku SAF dari Kelapa Sawit

Ketersediaan bahan baku SAF dari industri kelapa sawit sangat besar jumlahnya. Diperkirakan potensi ketersediaan bahan baku dapat mencapai 474 juta ton per tahun dengan rincian 60,8 juta ton sudah mendapat nilai default

emisi dari ICAO, 0,87 juta ton sedang dalam proses pengusulan dan sisanya belum diajukan. Adapun daftar bahan baku potensial adalah sebagai berikut.

Tabel 1. Daftar Potensi Bahan Baku SAF dari Kelapa Sawit

Kategori	Nama Produk	Volume per Tahun (ton)	Jalur Teknologi	Nilai Default Emisi (gCO ₂ e/MJ)	Sumber data Emisi
Produk Utama	- Minyak Sawit Mentah (CPO)	50,000,000	HEFA	<i>Open Pond</i> : 99.1 <i>Close Pond</i> : 76.5	ICAO, 2024
	- RBDPKO	5,062,500	HEFA & Co-HEFA	<i>Open Pond</i> : 99.1 <i>Close Pond</i> : 76.5	ICAO, 2024
Produk Samping	- PFAD	2,500,000	HEFA	20.7	ICAO, 2024
	- Glycerol	1,085,760	ATJ	-	-
Produk Limbah	- Minyak POME	874,500	HEFA	Pengusulan	-
	- UCO	3,295,264	HEFA	13.9	ICAO, 2024
			Co-HEFA	16.7	ICAO, 2024
	- Tandan Kosong	52,500,000	ATJ & FT	-	-
	- Cangkang	16,000,000	ATJ & FT	-	-
	- Fiber / serat	36,000,000	ATJ & FT	-	-
	- Pelepah	275,184,000	ATJ & FT	-	-
	- Batang Sawit	31,449,600	ATJ & FT	-	-

Sumber : Analisa Data IPOSS dan Dokumen ICAO

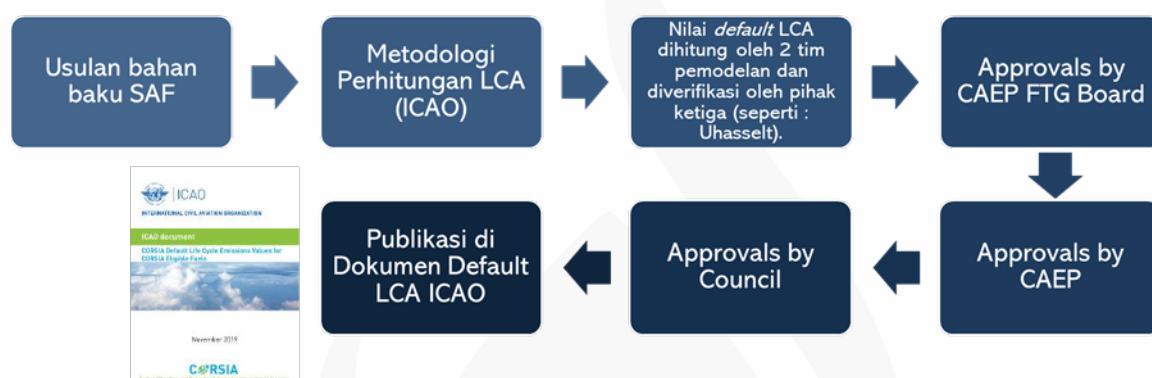
Berdasarkan tabel di atas dapat dilihat nilai default SAF berbahan baku palm oil, akan didapati nilai emisi default sebesar 76.5 gCO₂e/MJ jika menggunakan sistem *close pond* di mana gas *methane* (CH₄) yang terlepas dari kolam ditangkap dengan *lagoon* (*methane captured*). Sedangkan jika tidak menggunakan sistem *close pond*, maka nilai emisi default ditetapkan lebih besar menjadi 99.1 gCO₂e/MJ. Tentu saja kondisi ini menggambarkan minyak sawit baik CPO maupun CPKO sebagai produk utama tidak layak secara lingkungan, karena masih terlalu tinggi nilai emisi yang ditetapkan oleh ICAO.

Walaupun demikian, dari jalur produk samping maupun limbah, potensi dari industri sawit masih sangat besar. Dengan ekosistem industri yang telah mapan, dan infrastruktur yang luas, Indonesia memiliki peluang besar untuk menjadi pemain utama global dalam produksi SAF berbasis kelapa sawit, baik dari produk utama, turunannya hingga limbah dan biomassa sawit. Peningkatan riset dan investasi pada teknologi konversi perlu dilakukan untuk mendorong adanya peningkatan berbagai jenis bahan baku alternatif sebagai substitusi avtur sehingga dapat ikut menurunkan emisi.

***Update* Perkembangan Pengusulan POME sebagai Bahan Baku SAF**

Mengingat bahan bakar penerbangan yang berkelanjutan tersebut harus mendapatkan persetujuan oleh *Council* ICAO agar diperoleh nilai default emisinya, maka untuk beberapa produk yang potensial seperti POME, Indonesia perlu menyampaikan usulan agar POME khususnya minyak di dalam POME dapat ditetapkan nilai default emisi oleh ICAO. Adapun proses pengusulan di ICAO dapat digambarkan pada diagram berikut.

Gambar 7. Proses Pengusulan Bahan Baku SAF



Sumber : ICAO (2024g)

Berdasarkan panduan yang diberikan ICAO, maka pemerintah Indonesia telah mulai menyampaikan usulan POME untuk menjadi bahan baku SAF ke ICAO dan saat ini sudah masuk dalam proses di ICAO. Adapun tahapan yang sudah dilakukan berupa kegiatan koordinasi dan penyampaian surat sebelum mulai dilakukannya proses perhitungan LCA secara resmi. Adapun tahapan dan kegiatan yang sudah dilakukan dalam rangka pengusulan POME sebagai bahan baku SAF dapat dilihat pada Tabel berikut.

Tabel 2. Rangkaian Kegiatan dalam Proses Pengusulan SAF Berbahan Baku POME

Tanggal	Kegiatan
21 Nov 2024	Penyampaian <i>Working Paper</i> dan Surat Usulan POME sebagai Bahan Baku SAF kepada Direktur Jenderal Perhubungan Udara - Kementerian Perhubungan RI
25 Nov 2025	Penyampaian surat Partisipasi Indonesia dalam Pertemuan CAEP/13 and <i>Working Paper</i> ke secretariat ICAO oleh Direktur Jenderal Perhubungan Udara

Tanggal	Kegiatan
17 Feb 2025	Penyampaian Dukungan Teknis IPOSS terkait Pengusulan Default LCA POME kepada Direktur Jenderal Perhubungan Udara - Kementerian Perhubungan RI
21 Feb 2025	Pertemuan CAEP Member di Montreal, Canada, dihadiri Bpk. Syamsu Rizal (CAEP Member ICAO dari Direktur Jenderal Perhubungan Udara - Kementerian Perhubungan RI)
06 Mar 2025	Pertemuan Online koordinasi dengan Prof. Robert Malina (ICAO), dan Alessandro Matuli (Univ. Hasselt)
19 Mar 2025	Workshop LCA bersama Nextchem dan Tripatra
09 Apr 2025	Pengajuan 4 Nama nominasi untuk terdaftar sebagai expert dalam Working Group 5 ke Kemenhub RI
15 Apr 2025	Pendaftaran 4 nama nominee diterima ICAO dan sudah dapat mengakses ke portal Working Group 5 https://portal.icao.int/Pages/default.aspx
25 Apr 2025	Pertemuan online dengan Prof. Robert Malina (ICAO), tim Univ Hasselt, IPOSS, Tripatra dan Nextchem. Penjelasan tentang metode LCA termasuk penggunaan database ecoinvent. Kesimpulannya ecoinvent dapat diterima. Tindak Lanjut perhitungan LCA . • 2 Team modelling : Tim Expert Indonesia dan Tim Universitas Husselt (Prof. Alessandro) • 2 Model/database : Ecoinvent dan Greet • Lokasi Refinery : 1. Pabrik di Kawasan Industri Sei Mangkei (Sumut), dan 2. Pabrik di Italia • Lokasi Sumber POME : 1. Sumber POME Indonesia untuk Supply Pabrik di Indonesia (Sumut), dan 2. Sumber POME Indonesia dan Malaysia untuk Supply ke Pabrik di Italia
29 Apr 2025	Pengiriman Information Paper oleh CAEP Member Indonesia, Bapak Syamsu Rizal (Kemenhub RI) ke Sekretariat ICAO
01-10 Mei 25	Persiapan Bahan Presentasi Information Paper
12-16 Mei 25	Presentasi Information Paper di WG5 ICAO (online)
Mei - Oct 25	Perhitungan LCA sesuai skenario
Oct 2025	Presentasi Working Group di CAEP FTG - ICAO (Brazil)
Des 2025	Pertemuan CAEP Steering Group (Singapura)
End of 2025	Approval Council

Kesimpulan :

1. Industri Sawit Indonesia Memiliki Potensi Besar sebagai Penyedia Bahan Baku SAF

Indonesia, sebagai produsen minyak sawit terbesar dunia, memiliki potensi pasokan bahan baku SAF yang sangat besar, tidak hanya dari produk utama seperti CPO dan RBDPKO, tetapi juga dari produk samping (PFAD, gliserol) dan limbah (POME, UCO, dan biomassa limbah seperti tankos, cangkang, fiber, pelepah, dan batang sawit). Total potensi bahan baku mencapai 474 juta ton per tahun, menjadikan Indonesia sangat kompetitif untuk memasok *feedstock* SAF secara global.

2. Beragam Jalur Teknologi SAF Dapat Dimanfaatkan dari Produk Sawit

Industri sawit Indonesia dapat berkontribusi pada produksi SAF melalui tiga jalur teknologi utama yang telah diakui ASTM Internasional, yaitu :

- HEFA : untuk bahan baku berbasis minyak (CPO, PFAD, POME oil, UCO).
- ATJ : untuk feedstock berbasis bioalkohol seperti gliserol dan biomassa fermentasi.
- Fischer-Tropsch (FT) : untuk biomassa padat seperti EFB, cangkang, dan pelepah yang dikonversi menjadi syngas.

Ketiga jalur ini memberikan fleksibilitas dalam memanfaatkan berbagai jenis output dari rantai pasok sawit.

3. Perlu Dukungan Kebijakan dan Pengakuan Internasional agar Bahan Baku Sawit Dapat Diakui sebagai SAF Berkelanjutan

Meskipun produk utama sawit seperti CPO memiliki tantangan terkait nilai emisi LCA, tetapi produk samping dan limbah (seperti PFAD dan UCO) telah diakui memiliki emisi rendah dan memenuhi standar CORSIA. Maka dari itu, untuk meningkatkan jumlah *feedstock* sawit yang *eligible* sebagai SAF berkelanjutan dibutuhkan dukungan riset lebih lanjut, juga ketersediaan regulasi yang mendukung, dan penguatan posisi di forum internasional. Termasuk untuk membahas kembali nilai *default* LCA dari produk utama minyak sawit yakni CPO yang dianggap masih terlalu tinggi baik dari nilai Core LCA maupun ILUC.

4. Proses pengusulan POME sebagai bahan baku SAF ke ICAO sedang berlangsung

Sebagai bagian dari strategi Indonesia menjadi produsen SAF dunia. Maka diperlukan dukungan tim perhitungan dan pemodelan LCA dari Indonesia untuk menindaklanjuti dan mendukung penguatan usulan POME sebagai bahan baku SAF yang sedang berlangsung di ICAO.

5. Bagi para pelaku industri POME, proses pengusulan POME ini agar dapat dipahami bahwa Limbah ini akan mendapatkan penetapan nilai default LCA oleh ICAO. Sehingga momen hal ini perlu dimanfaatkan dalam konteks bisnis, sehingga baik bahan baku maupun industri SAF dapat lebih dioptimalkan pemanfaatannya oleh industri dalam negeri.



Referensi

- ASTM International. (2022). *Standard Practice for Evaluation of New Aviation Turbine Fuels and Fuel Additives (ASTM D4054-22)*. <https://www.astm.org/d4054-22.html>
- Braun, Matthias & Grimme, Wolfgang & Oesingmann, Katrin. (2024). Pathway to net zero: Reviewing sustainable aviation fuels, environmental impacts and pricing. *Journal of Air Transport Management*, Elsevier, vol. 117(C). <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2024.102580>
- Carraro C., Searle S., Baldino C. (2021). Waste and residue availability for advanced biofuel production in the European Union and the United Kingdom. Working Paper 2021-39. *International Council on Clean Transportation*. <https://theicct.org/publication/waste-and-residue-availability-for-advanced-biofuel-production-in-the-european-union-and-the-united-kingdom/>
- Clean Air Task Force. (2022). *Decarbonizing aviation: Challenges and opportunities for emerging economies*. <https://cdn.catf.us/wp-content/uploads/2022/09/13101935/decarbonizing-aviation.pdf>
- Eco-Act. (2024). *Navigating CORSIA: An Introduction to Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*. <https://eco-act.com/blog/navigating-corsia/>
- ESDM. (2023). *Pertamina Berhasil Produksi SAF dari Minyak Nabati di Kilang Dumai dan Plaju*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia. <https://www.esdm.go.id/>
- European Commission. (2023). *Renewable Energy Directive II (RED II): Annex IX Feedstocks*. <https://energy.ec.europa.eu>
- Gabungan Pengusaha Kelapa Sawit Indonesia (GAPKI). (2024). Siaran Pers Kinerja Industri Minyak Sawit Tahun 2023 & Prospek Tahun 2024. <https://gapki.id/news/2024/02/27/kinerja-industri-minyak-sawit-tahun-2023-prospek-tahun-2024/>
- ICAO. (2024a). *Sustainable Aviation Fuels (SAF)*. <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/SAF.aspx>
- ICAO. (2024b). *Sustainable feedstock pathways for SAF*. <https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/feedstocks.aspx>
- ICAO. (2024c). *Guidance on policy measures for SAF deployment*. https://www.icao.int/environmental-protection/Pages/saf_guidance_potential_policies.aspx
- ICAO. (2024d). *CORSIA Default Life Cycle Emissions Values for CORSIA Eligible Fuels*. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO_document_06.pdf
- ICAO. (2024e). *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)*. <https://www.icao.int/environmental-protection/pages/market-based-measures.aspx>
- ICAO. (2024f). *Corsia Supporting Document CORSIA Eligible Fuels - Life Cycle Assessment Methodology*. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/CORSIA_Supporting_Document_CORSIA%20Eligible%20Fuels_LCA_Methodology_V5.pdf

- ICAO. (2024g). *ICAO methodologies and tools for life cycle assessment. ACT SAF*. <https://www.icao.int/environmental-protection/Documents/ACT-SAF/ACT-SAF%20Series%2010%20-%20ICAO%20methodologies%20for%20Core%20LCA.pdf>
- ICAO. (2024h). *CORSIA Sustainability Criteria for CORSIA Eligible Fuels*. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Sustainability_Criteria.pdf
- ICAO. (2024i). *Methodology for Calculating Actual Life Cycle Emissions Values*. https://www.icao.int/environmental-protection/CORSIA/Documents/CORSIA_Eligible_Fuels/ICAO_document_07.pdf
- International Air Transport Association (IATA). (2023a). *Fact sheet: Sustainable Aviation Fuels*. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-sustainable-aviation-fuels/>
- International Air Transport Association (IATA). (2023b). *Net Zero Roadmap*. <https://www.iata.org/en/programs/environment/net-zero/>
- International Air Transport Association (IATA). (2024a). *Net zero 2050: sustainable aviation fuels*. <https://www.iata.org/en/iata-repository/pressroom/fact-sheets/fact-sheet-sustainable-aviation-fuels/>
- International Air Transport Association (IATA). (2024b). *SAF production to triple in 2024*. <https://www.iata.org/en/pressroom/2024-releases/2024-06-02-03/>
- International Air Transport Association (IATA). (2024c). *Offsetting CO2 Emissions with CORSIA*. <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/corsia/>
- International Air Transport Association. (2023c). *Sustainable Aviation Fuel: Review and Outlook*. <https://www.iata.org/en/programs/sustainability/sustainable-aviation-fuels/>
- International Energy Agency. (2024). *Aviation*. <https://www.iea.org/energy-system/transport/aviation>
- Kementerian Pertanian. (2019). *Keputusan Menteri Pertanian Nomor 833/KPTS/SR.020/M/12/2019 tentang Penetapan Luas Tutupan Kelapa Sawit Indonesia Tahun 2019*. <https://peraturan.bpk.go.id/Details/162359/keputusan-no-833kptssr020m122019-tahun-2019>
- Nugroho D.A., Sitompul M.R., and Widadi N. (2024). *Sustainable aviation fuel development: Case study in Indonesia. 4th International Symposium on Transportation Studies in Developing Countries*. IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/1294/1/012032/pdf>
- Pavlenko, N., Searle, S., & Christensen, A. (2019). *The cost of supporting alternative jet fuels in the European Union. International Council on Clean Transportation*. <https://theicct.org/publication/the-cost-of-supporting-alternative-jet-fuels-in-the-eu/>
- Pertamina. (2023). *Pertamina Produces Sustainable Aviation Fuel (SAF) through Co-Processing Technology*. <https://pertamina.com/id/news-room/news-release>
- Roland Berger (2020). *Sustainable Aviation Fuels*. Roland Berger LTD. United Kingdom. https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/roland_berger_sustainable_aviation_fuels.pdf

- Roundtable on Sustainable Biomaterials. (2024). *Sustainable aviation fuel production in Southeast Asia: Feedstock assessment*. <https://rsb.org/wp-content/uploads/2024/09/rsb-sustainable-feedstock-assessment-saf-in-southeast-asia.pdf>
- Searchinger, T., Heimlich, R., Houghton, R. A., Dong, F., Elobeid, A., Fabiosa, J., Tokgoz, S., Hayes D., and Yu, T. H. (2008). Use of U.S. Croplands for Biofuels Increases Greenhouse Gases Through Emissions from Land-Use Change. *Science*, 319(5867), 1238–1240. <https://doi.org/10.1126/science.1151861>
- SkyNRG. (2022). *Sustainable Aviation Fuel Certification and ASTM International: What is it & Why Does it Matter?* <https://skynrg.com/sustainable-aviation-fuel-certification-and-astm-international-what-is-it-why-does-it-matter/>
- Staples, M. D., Malina, R., & Barrett, S. R. H. (2018). The limits of bioenergy for mitigating global life-cycle greenhouse gas emissions from fossil fuels. *Nature Energy*, 3(5), 447–452. <https://doi.org/10.1038/nenergy.2016.202>
- Topsoe, 2023. *Voices From the Sky: The Outlook for SAF*. <https://www.topsoe.com/sustainable-aviation-fuel/saf-outlook>
- Transparency Market Research. (2024). *Sustainable Aviation Fuel Market Size to Hit USD 402.0 Billion by 2050, Grow at a 26.2% CAGR*. <https://www.transparency-marketresearch.com/sustainable-aviation-fuel-market.html>
- U.S. Department of Energy (2020). *Sustainable Aviation Fuel: Review of Technical Pathways*. Bioenergy Technologies Office. <https://doi.org/10.2172/1660415>
- World Economic Forum. (2024). *Financing Sustainable Aviation Fuels: Case Studies and Implications for Investment*. <https://www.weforum.org/publications/financing-sustainable-aviation-fuels-case-studies-and-implications-for-investment/>



Indonesia Palm Oil Strategic Studies (IPOSS)

Sahid Sudirman Center, Lantai 16.A
Jalan Jenderal Sudirman Kav. 86
Jakarta Pusat 10220

www.iposs.co.id