

ANALISIS SENSITIVITAS *SMALL-SCALE LNG* DAN *SUSTAINABLE AVIATION FUEL* TERHADAP EMISI KARBON

Akmal Yoda Saputro¹, Nano Koes Ardhiyanto^{2*}, Diyah Rosiani¹

¹Teknik Produksi Migas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl Gajah Mada No.38, Cepu, Blora 58315

²Logistik Migas, Politeknik Energi dan Mineral Akamigas, Jl Gajah Mada No.38, Cepu, Blora 58315

E-mail: nano.ardhiyanto@esdm.go.id

ABSTRAK

Transisi energi Indonesia menuju energi bersih memerlukan evaluasi komprehensif terhadap skenario blending bahan bakar alternatif yang praktis dan implementable. Penelitian ini menganalisis sensitivitas sembilan skenario *blending small-scale LNG* (ssLNG) dan *Sustainable Aviation Fuel* (SAF) dengan diesel konvensional terhadap emisi karbon menggunakan metode *Simple Additive Weighting* (SAW). Skenario yang dievaluasi mencakup *binary blending* (diesel dengan satu bahan bakar alternatif) dan *ternary blending* (kombinasi ketiga bahan bakar) berdasarkan lima kriteria: faktor emisi, kandungan energi, biaya relatif, kelayakan teknis, dan persentase pengurangan emisi. Hasil analisis menunjukkan bahwa *ternary blending* dengan komposisi 25% LNG + 25% SAF + 50% diesel menempati peringkat tertinggi dengan skor SAW 0,8756, menghasilkan pengurangan emisi sebesar 28,80% dengan biaya relatif 1,312 dan kelayakan teknis 6/10. *Ternary blends* secara konsisten mengungguli *binary blends* dengan rata-rata pengurangan emisi 23,27% dibandingkan 11,52%. Penelitian ini memberikan rekomendasi praktis bahwa *ternary blending* merupakan solusi optimal untuk implementasi near-term yang menyeimbangkan pengurangan emisi signifikan dengan kelayakan ekonomi dan teknis dalam konteks transisi energi Indonesia

Kata kunci: *Small-scale LNG, Sustainable Aviation Fuel, Blending scenarios, Emisi karbon, Simple Additive Weighting*

1. PENDAHULUAN

Sektor energi dan transportasi berkontribusi lebih dari 60% terhadap emisi gas rumah kaca global, dengan pembangkitan listrik berbasis bahan bakar fosil menjadi kontributor utama[1]. Indonesia, sebagai negara berkembang dengan pertumbuhan ekonomi pesat, menghadapi tantangan kompleks dalam menyeimbangkan kebutuhan energi yang meningkat dengan komitmen pengurangan emisi sesuai Perjanjian Paris. Pemerintah Indonesia menargetkan bauran Energi Baru Terbarukan (EBT) sebesar 23% pada tahun 2025 dan mencapai *net-zero emissions* pada tahun 2060 [2].

Kapasitas Pembangkit Listrik Tenaga Diesel (PLTD) PLN mencapai 3.425,90 MW pada tahun 2024, setara dengan 7,32% dari total kapasitas[3]. Penggunaan diesel dalam jumlah besar ini menghasilkan emisi karbon signifikan dengan faktor emisi 2,64-2,68 kg CO₂/liter[4]. Transisi dari diesel murni menuju bahan bakar alternatif yang lebih bersih menjadi prioritas strategis untuk mencapai target dekarbonisasi nasional.

Small-scale LNG (ssLNG) dan *Sustainable Aviation Fuel* (SAF) merupakan dua kandidat bahan bakar alternatif yang menjanjikan. ssLNG menawarkan solusi untuk memanfaatkan gas alam dengan teknologi modular dan efisien, menghasilkan emisi lebih rendah (52,91-53,11 kg CO₂e/MMBtu) dibandingkan diesel[5]. SAF berbasis *Used Cooking Oil* (UCO) dapat mengurangi emisi gas rumah kaca hingga 80% dibandingkan bahan bakar jet konvensional[6].

Namun, adopsi penuh (100%) bahan bakar alternatif menghadapi barriers signifikan dalam hal infrastruktur, biaya, dan kesiapan teknologi.

Blending atau pencampuran penerepan bahan bakar konvensional dengan alternatif blmerupakan strategi transisi yang pragmatis dan telah diterapkan di berbagai negara[7]. *Binary blending* (diesel dengan satu bahan bakar alternatif) menawarkan *simplicity* implementasi, sementara ternary blending (kombinasi tiga jenis bahan bakar) membuka potensi optimasi yang lebih kompleks. Namun, pertanyaan fundamental tetap belum terjawab secara komprehensif: proporsi blending mana yang memberikan *balance* optimal antara pengurangan emisi, kelayakan ekonomi, dan *feasibility* tekni.

Penelitian terdahulu sebagian besar fokus pada aspek teknis atau ekonomi secara terpisah. Beberapa studi menganalisis potensi LNG sebagai bahan bakar maritim, sementara penelitian lain mengkaji kelayakan SAF untuk penerbangan. Namun, kesenjangan penelitian masih ada dalam hal evaluasi sistematis berbagai proporsi blending menggunakan metode pengambilan keputusan multi-kriteria yang *rigorous*, perbandingan komprehensif antara *binary* dan *ternary blending scenarios*, analisis sensitivitas untuk memvalidasi robustness hasil dalam konteks perubahan prioritas stakeholder dan rekomendasi praktis untuk implementasi di Indonesia[8].

Penelitian ini bertujuan menganalisis sensitivitas sembilan skenario blending praktis (tanpa *pure fuel*) terhadap emisi karbon menggunakan metode *Simple Additive Weighting (SAW)*. Fokus pada *blending scenarios* (bukan *pure fuel*) dipilih karena Skenario blending lebih relevan dengan implementasi jangka pendek (*near-term implementation*), yang berarti strategi ini dapat segera diadopsi mengingat keterbatasan infrastruktur dan teknologi yang sudah ada di Indonesia. Implementasi jangka pendek ini merujuk pada pemanfaatan jaringan distribusi bahan bakar dan mesin eksisting tanpa perlu modifikasi besar, sehingga blending menjadi solusi transisi sebelum penggunaan bahan bakar alternatif secara penuh dapat dilakukan di masa depan. Hal ini memberikan peluang besar untuk menurunkan emisi karbon dalam waktu dekat serta dapat dijalankan tanpa beban investasi yang besar pada perubahan infrastruktur maupun perangkat.. Metode SAW dipilih karena kesederhanaan, transparansi, dan efektivitas dalam menangani *multiple criteria* dengan sifat berbeda.

2. METODE

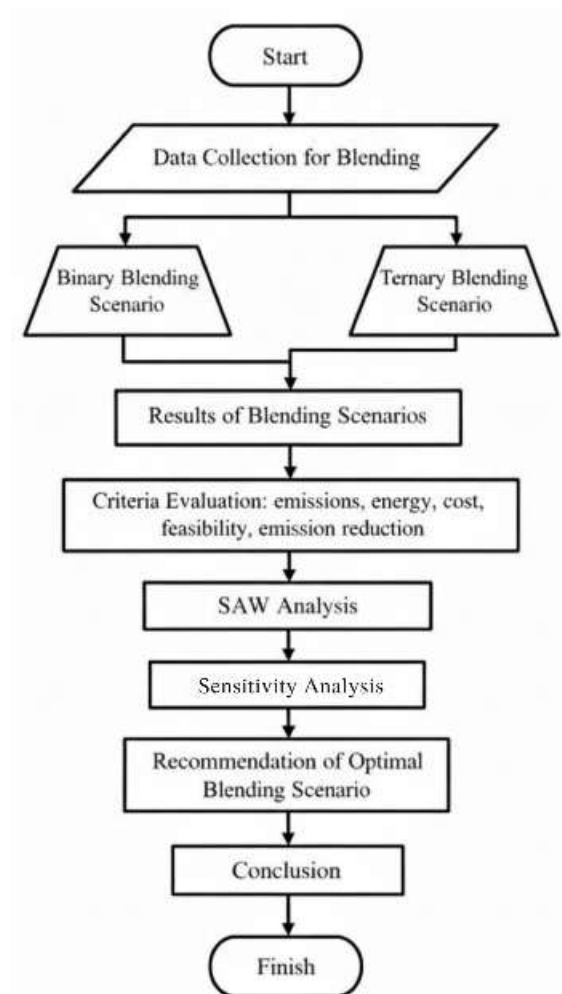
Penelitian ini menganalisis enam skenario blending praktis yang terdiri dari kombinasi diesel, *small-scale LNG (ssLNG)*, dan *Sustainable Aviation Fuel (SAF)* berbasis *Used Cooking Oil*. Skenario dirancang untuk mencakup dua kategori utama yaitu *binary blending* dan *ternary blending*.

Binary Blending Scenarios terdiri dari enam skenario yang mengkombinasikan diesel dengan satu jenis bahan bakar alternatif:

- Diesel-LNG blends: 90-10%, 80-20%, dan 70-30%
- Diesel-SAF blends: 90-10%, 80-20%, dan 70-30%

Ternary Blending Scenarios terdiri dari tiga skenario yang mengkombinasikan ketiga jenis bahan bakar:

- LNG-SAF-Diesel (30-10-60): *High LNG, Low SAF*
- LNG-SAF-Diesel (20-20-60): *Balanced LNG-SAF*
- LNG-SAF-Diesel (25-25-50): *Equal LNG-SAF, Lower Diesel*



Gambar 1. Diagram Alir Metodologi

Dalam hal ini, konsep *binary blending* dan *ternary blending* digunakan untuk merepresentasikan strategi penggabungan penggunaan beberapa jenis bahan bakar dalam proses logistik dan operasional. Binary blending mengacu pada pola distribusi atau penggunaan dua jenis bahan bakar, seperti penggunaan diesel dan ssLNG atau diesel dan SAF secara bergantian atau berdasarkan kebutuhan rute dan ketersediaan bahan bakar di lapangan. Sementara itu, ternary blending melibatkan penggabungan tiga jenis bahan bakar (diesel, ssLNG, dan SAF) dalam satu sistem operasional, sehingga memungkinkan fleksibilitas dan optimasi emisi maupun efisiensi distribusi energi secara lebih luas.

Kedua pendekatan blending tersebut dianalisis menggunakan metode *Multiple Criteria Decision Making* (MCDM) Simple Additive Weighting (SAW), dengan menyusun proporsi penggunaan masing-masing bahan bakar pada setiap scenario. Setiap skenario kemudian dievaluasi berdasarkan kriteria utama seperti pengurangan emisi, kandungan energi, biaya relatif, dan kelayakan teknis, sehingga hasil analisis merefleksikan keunggulan dan keterbatasan pola penggunaan bahan bakar yang paling sesuai[9].

3. PEMBAHASAN

A. Penjelasan Hasil Penelitian

Analisis *Simple Additive Weighting* terhadap sembilan skenario blending praktis menghasilkan ranking yang memberikan insight signifikan mengenai *optimal fuel mixing strategies*[10]. Tabel 1 menunjukkan hasil lengkap analisis SAW untuk semua skenario blending.

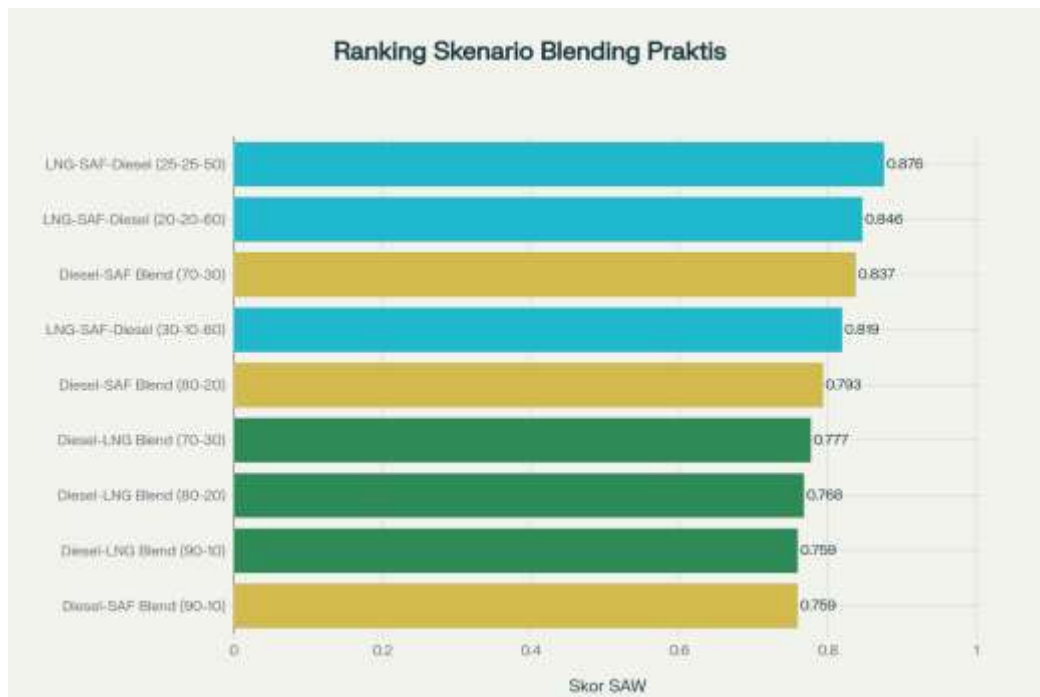
Tabel 1. Hasil Ranking Skenario Blending

Rank	Fuel Type	SAW Score	Diesel %	LNG %	SAF %	Emission Factor	Emission Reduction %
1	LNG-SAF-Diesel (25-25-50)	0.8756	50	25	25	1.894	28.8
2	LNG-SAF-Diesel (20-20-60)	0.8464	60	20	20	2.047	23.05
3	Diesel-SAF Blend (70-30)	0.8373	70	0	30	1.998	24.89
4	LNG-SAF-Diesel (30-10-60)	0.8192	60	30	10	2.182	17.97
5	Diesel-SAF Blend (80-20)	0.7932	80	0	20	2.219	16.58
6	Diesel-LNG Blend (70-30)	0.777	70	30	0	2.402	9.7
7	Diesel-LNG Blend (80-20)	0.7677	80	20	0	2.488	6.47
8	Diesel-LNG Blend (90-10)	0.7593	90	10	0	2.574	3.23
9	Diesel-SAF Blend (90-10)	0.759	90	0	10	2.44	8.27

Faktor emisi (*emission factor*) untuk setiap bahan bakar (diesel, ssLNG, SAF) diperoleh dari literatur standar dan basis data nasional/internasional (seperti EPA, EIA, IPCC), kemudian dihitung kembali berdasarkan proporsi penggabungan penggunaan di setiap skenario blending[11]. Pengurangan emisi (*emission reduction*) dihitung dengan cara membandingkan total emisi dari masing-masing skenario blending terhadap baseline emisi diesel murni hasilnya dinyatakan sebagai persentase pengurangan emisi[12]. Formula umum yang digunakan yaitu:

$$\text{Emission Reduction (\%)} = \left(\frac{\text{Emission}_{\text{Diesel}} - \text{Emission}_{\text{scenario}}}{\text{Emission}_{\text{Diesel}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

Tabel 1 memuat hasil ranking dan komposisi masing-masing skenario blending berdasarkan analisis metode Simple Additive Weighting (SAW), sedangkan untuk Gambar 2 mendukung data pada tabel dengan visualisasi skor SAW masing-masing skenario, sehingga tren performa dan peringkat blending bisa langsung diidentifikasi secara grafis. Hasil analisis menunjukkan bahwa ternary blending dengan komposisi 25% LNG + 25% SAF + 50% diesel menempati peringkat tertinggi dengan skor SAW 0,8756. Skenario ini menghasilkan pengurangan emisi substansial sebesar 28,80% dibandingkan diesel murni, dengan faktor emisi 1,894 kg COe/liter. Dari perspektif emisi, komposisi 25-25-50 memanfaatkan sinergi antara LNG dan SAF, LNG berkontribusi pada pengurangan emisi moderate dengan *cost-effectiveness* tinggi, sementara SAF memberikan *deep emission cuts* (faktor emisi sangat rendah 0,455 kg/L).



Gambar 2. Hasil dari perhitungan menggunakan metode *Simple Additive Weighting*

B. Analisis Sensitivitas terhadap Variasi Prioritas

Analisis sensitivitas dilakukan untuk memastikan rekomendasi skenario blending tetap relevan ketika prioritas stakeholder beragam. Dalam penelitian ini, bobot masing-masing kriteria pada metode SAW diubah-ubah sesuai enam kombinasi, mulai dari skenario yang menitik beratkan pengurangan emisi, biaya, hingga kelayakan implementasi.

Tabel 2. Sensitivitas Ranking terhadap Variasi Bobot Kriteria (Top 5 Scenarios)

Rank	Skenario	Baseline	High Emission	Cost Priority	Balanced	Tech Focus	Energy Priority	Avg Rank
1	LNG-SAF-Diesel (25-25-50)	1	1	2	1	3	1	1.5
2	LNG-SAF-Diesel (20-20-60)	2	2	1	2	1	2	1.7
3	Diesel-SAF Blend (70-30)	3	3	5	3	5	3	3.7
4	LNG-SAF-Diesel (30-10-60)	4	4	3	4	2	4	3.7
5	Diesel-SAF Blend (80-20)	5	5	4	5	4	5	4.5

Tabel 2 berisi hasil analisis sensitivitas ranking terhadap variasi bobot kriteria pada metode SAW. Angka-angka pada tabel ini diperoleh dengan setiap skenario blending dinilai berdasarkan lima kriteria utama *High Emission Priority*, *Cost Priority*, *Balanced*, *Tech Focus*, dan, *Energy Priority*. Pada setiap kombinasi bobot, seluruh nilai skenario dikalkulasi ulang menggunakan rumusan SAW. Hasil kalkulasi inilah yang menentukan posisi (ranking) setiap skenario pada tiap kondisi bobot spesifik, menghasilkan angka-angka yang ditampilkan di Tabel 2.

Hasil analisis menunjukkan bahwa dua skenario *ternary blend*, yaitu campuran 25% ssLNG + 25% SAF + 50% diesel dan 20% ssLNG + 20% SAF + 60% diesel, secara konsisten menempati posisi teratas di sebagian besar variasi bobot penilaian. Kedua skenario ini selalu menawarkan keseimbangan terbaik antara pengurangan emisi, biaya yang masih masuk akal, dan kelayakan teknis yang stabil. Ketika prioritas difokuskan pada biaya termurah, skenario 20-20-60 lebih unggul karena proporsi diesel dan LNG yang tinggi menghasilkan biaya lebih rendah. Sementara itu, pada skenario yang memprioritaskan pengurangan emisi secara maksimum, skenario 25-25-50 mendapatkan skor tertinggi.

Analisis sensitivitas ini menegaskan bahwa hasil rekomendasi tidak hanya bersifat statis, melainkan adaptif terhadap perubahan kebutuhan atau tujuan. Dengan demikian, pemilihan skenario blending dapat disesuaikan dengan konteks lapangan baik berdasarkan ketersediaan anggaran, target emisi, maupun kesiapan infrastruktur tanpa kehilangan validitas hasil penelitian.

4. SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan blending antara tiga jenis bahan bakar yaitu diesel, *small-scale LNG (ssLNG)*, dan *Sustainable Aviation Fuel (SAF)* merupakan strategi yang paling menjanjikan untuk menekan emisi karbon dari sektor energi di Indonesia, khususnya pada masa transisi menuju energi yang lebih bersih. Dari serangkaian skenario yang dianalisis, *ternary blend* dengan proporsi 25% ssLNG, 25% SAF, dan 50% diesel dinilai sebagai opsi paling optimal berdasarkan lima kriteria utama, yaitu efisiensi emisi, kandungan energi, biaya, kelayakan teknis, dan persentase penurunan emisi.

Pendekatan blending yang digunakan dalam studi ini memungkinkan fleksibilitas optimal dalam distribusi dan penggunaan bahan bakar, sehingga dapat langsung diimplementasikan tanpa perubahan besar pada infrastruktur yang telah ada. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa rekomendasi blending tetap konsisten dan relevan meski terjadi perubahan prioritas stakeholder, baik fokus pada pengurangan emisi, efisiensi ekonomi, maupun kesiapan teknologi.

Hasil sensitivitas membuktikan bahwa *ternary blend* tetap unggul di berbagai variasi prioritas stakeholder, sehingga dapat menjadi solusi optimal untuk implementasi jangka pendek yang relevan dengan keterbatasan infrastruktur dan kesiapan teknologi di Indonesia. Penelitian ini menjawab tujuan utama, yaitu menemukan strategi blending yang paling optimal untuk menyeimbangkan pengurangan emisi, efisiensi ekonomi, dan technical feasibility di masa transisi energi nasional.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] IPCC, "Climate Change 2023: Synthesis Report," Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva, 2023.
- [2] United Nations, "Indonesia's Enhanced Nationally Determined Contribution," Paris Agreement, 2022.
- [3] PLN Statistics, "Indonesian Power Plant Capacity and Energy Production 2022-2024," PT PLN (Persero), Jakarta, 2024. [4] Carbonclick, "How does SAF reduce emissions," October 2024.
- [4] U.S. EPA, "Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories," Washington DC, April 2024.
- [5] LNG Industry, "Small scale LNG to the rescue," Special Report, April 2024.
- [6] Neste, "Sustainable Aviation Fuel Technical Documentation," Neste Corporation, 2025.
- [7] M. Setiyo et al., "Alternative fuels in Indonesia," Journal of Mechanical Engineering, 2022.
- [8] Berkeley Research Group, "LNG Lifecycle GHG Assessment," Global LNG Hub, 2024.
- [9] H. Taherdoost, "Analysis of SAW Method," SSRN Journal, February 2023.

- [10] H. Zhang, et al., “LCA and sensitivity analysis carbon emissions,” Scientific Reports, vol. 15, 2025.
- [11] Energy Clean Air, “Indonesia’s RUPTL 2025–2034,” Sep. 2025.
- [12] M. I. Panjaitan, et al., “SAW method in Scholarship Selection,” Int. J. Sci. Res. (IJSR), vol. 8, no. 5, 2019.