

ANALISIS TEKNO-EKONOMI DAN PEMILIHAN TEKNOLOGI BIOGAS UPGRADING DENGAN METODE ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS STUDI KASUS PT XYZ

Setyoadi Purwanto¹ dan Tri Widjaja²

¹Sekolah Interdisiplin Manajemen dan Teknologi, Program Studi Manajemen Proyek, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Kampus ITS Tjokroaminoto Jl. Cokroaminoto 12A, Surabaya 60264, Indonesia

*Penulis korespondensi: tri.widjaja@its.ac.id

Abstrak. Industri minyak sawit menghadapi tantangan lingkungan yang signifikan terkait dengan pengelolaan Limbah Pabrik Minyak Sawit (POME) dan emisi gas rumah kaca. Studi ini bertujuan untuk memilih teknologi pemurnian biogas yang optimal, serta mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi pengembangan Bio-CNG menggunakan pendekatan interdisipliner terintegrasi. Penelitian ini menggunakan Analytical Hierarchy Process (AHP), dan Techno-Economic Analysis (TEA). Hasil analisis AHP menunjukkan bahwa Membrane Separation (MS) adalah teknologi peningkatan yang paling optimal karena kemurnian metana yang tinggi, kehilangan metana yang lebih rendah, dan kinerja lingkungan yang lebih baik. Hasil Techno-Economic Analysis (TEA) pada teknologi terpilih MS menunjukkan bahwa proyek Bio-CNG layak secara ekonomi, ditunjukkan oleh Net Present Value (NPV) yang positif, Tingkat Pengembalian Internal (IRR) yang menarik, dan periode pengembalian yang dapat diterima.

Kata kunci: Bio-CNG; Palm Oil Mill Effluent (POME); Analytical Hierarchy Process (AHP); Techno-Economic Analysis (TEA)

Abstract. The palm oil industry faces significant environmental challenges related to the management of Palm Oil Mill Effluent (POME) and greenhouse gas emissions. This study aims to select the optimal biogas upgrading technology and evaluate the technical and economic feasibility of Bio-CNG development using an integrated interdisciplinary approach. This study uses the Analytical Hierarchy Process (AHP) and Techno-Economic Analysis (TEA). The results of the AHP analysis indicate that Membrane Separation (MS) is the most optimal upgrading technology due to its high methane purity, lower methane loss, and better environmental performance. The TEA results on the MS technology option indicate that the Bio-CNG project is economically feasible, indicated by a positive Net Present Value (NPV), an attractive Internal Rate of Return (IRR), and an acceptable payback period.

Keywords: Bio-CNG; Palm Oil Mill Effluent (POME); Analytical Hierarchy Process (AHP); Techno-Economic Analysis (TEA)

1. Pendahuluan

Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor strategis nasional yang memiliki kontribusi besar terhadap pertumbuhan ekonomi Indonesia, namun pada saat yang sama menghadapi tantangan serius terkait pengelolaan limbah cair *Palm Oil Mill Effluent* (POME) dan emisi gas rumah kaca. Dalam perspektif interdisiplin manajemen dan teknologi, analisis tekno-ekonomi dan pemilihan teknologi biogas upgrading menjadi pendekatan

penting untuk mengintegrasikan aspek rekayasa proses dan pengambilan keputusan strategis perusahaan. Biogas upgrading merupakan proses pemurnian kualitas biogas melalui pemisahan karbon dioksida (CO_2), hidrogen sulfida (H_2S), dan senyawa pengotor lainnya sehingga dihasilkan biomethane atau *Bio-Compressed Natural Gas* (Bio-CNG) dengan kandungan metana tinggi yang dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif rendah emisi [1,2, 13]. Penelitian ini mengintegrasikan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang ditindaklanjuti dengan *Techno-Economic Analysis* (TEA) untuk menentukan teknologi *upgrading* yang paling optimal, dan layak secara ekonomi pada pengembangan proyek Bio-CNG di PT XYZ.

Topik penelitian ini menjadi penting karena sebagian besar pengolahan POME di Indonesia masih menggunakan sistem *open lagoon* yang menghasilkan emisi metana dalam jumlah besar. Metana diketahui memiliki *Global Warming Potential* (GWP) lebih tinggi dibandingkan karbon dioksida sehingga menjadi salah satu kontributor utama emisi gas rumah kaca pada industri kelapa sawit [3]. Di sisi lain, tuntutan global terhadap praktik industri rendah emisi semakin meningkat sejalan dengan target *Net Zero Emission* (NZE) 2060 dan komitmen Indonesia dalam Paris Agreement [4,10, 12]. Pemanfaatan POME menjadi Bio-CNG tidak hanya mampu menurunkan emisi metana hingga 80–90%, tetapi juga menciptakan nilai tambah ekonomi melalui substitusi bahan bakar fosil serta mendukung implementasi ekonomi sirkular berbasis limbah industri [5,6]. Oleh sebab itu, diperlukan pendekatan ilmiah yang mampu mengintegrasikan aspek teknologi dan ekonomi secara simultan agar implementasi Bio-CNG dapat diterapkan secara berkelanjutan di industri kelapa sawit nasional.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa berbagai studi telah membahas pemanfaatan POME sebagai sumber energi terbarukan dan produksi biomethane. Ng dkk. mengembangkan model optimasi produksi biomethane dari POME menggunakan pendekatan *multi-objective optimization* dan menemukan bahwa kombinasi teknologi upgrading tertentu mampu menghasilkan profit ekonomi tinggi sekaligus menurunkan emisi gas rumah kaca secara signifikan [7]. Febijanto dkk. juga melakukan *techno-enviro-economic assessment* terhadap pengembangan Bio-CNG berbasis POME untuk sektor transportasi dan menunjukkan bahwa integrasi skema perdagangan karbon mampu meningkatkan keekonomian proyek secara substansial [5]. Selain itu, Hasanudin dan Haryanto menegaskan bahwa penerapan teknologi *methane capture* pada pengolahan POME mampu menghasilkan energi terbarukan sekaligus menurunkan emisi gas rumah kaca secara signifikan pada industri kelapa sawit [8].

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini tidak semata-mata terletak pada penggunaan metode AHP dan TEA secara bersamaan, melainkan pada integrasi keduanya dalam suatu kerangka pengambilan keputusan yang bersifat berurutan (*sequential integrated framework*) untuk pengembangan proyek pabrik Bio-CNG berbasis POME. Berbeda dengan penelitian terdahulu yang umumnya menggunakan AHP hanya untuk seleksi teknologi atau TEA hanya untuk evaluasi kelayakan ekonomi secara terpisah, penelitian ini menghubungkan hasil AHP sebagai dasar pemilihan teknologi pemurnian biogas terbaik, yang selanjutnya menjadi satu-satunya objek evaluasi dalam TEA untuk memvalidasi kelayakan teknis dan ekonominya. Dengan demikian, kontribusi utama penelitian ini

adalah menghadirkan kerangka evaluasi yang mengintegrasikan proses seleksi teknologi berbasis multikriteria dengan validasi kelayakan investasi secara sistematis, sehingga menghasilkan rekomendasi teknologi yang tidak hanya unggul dari aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan, tetapi juga layak diimplementasikan pada industri kelapa sawit berbasis POME [9,10]. Selain itu, penelitian terkait pemilihan teknologi upgrading biogas menggunakan metode AHP pada industri kelapa sawit di Indonesia masih sangat terbatas, khususnya yang mempertimbangkan parameter teknis, dan ekonomi secara simultan seperti *Technology Readiness Level* (TRL), *methane loss*, *methane purity*, *investment cost*, *carbon footprint*, *land footprint*, dan *water footprint* [11, 12].

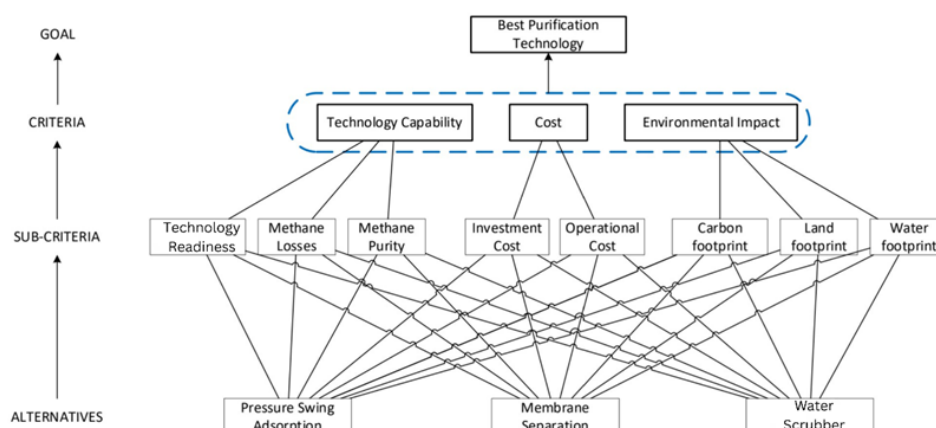
Berdasarkan *research gap* tersebut, penelitian ini berupaya menghadirkan pendekatan integratif yang menggabungkan metode AHP dan TEA dalam satu kerangka analisis interdisiplin manajemen dan teknologi. Integrasi kedua metode tersebut diharapkan mampu memberikan dasar ilmiah yang lebih komprehensif dalam menentukan teknologi pemurnian biogas yang paling optimal, menilai kelayakan investasi proyek Bio-CNG, serta mengukur kontribusi pengurangan emisi gas rumah kaca secara kuantitatif [13]. Penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi model pengembangan proyek Bio-CNG pada industri kelapa sawit nasional serta mendukung strategi dekarbonisasi industri dan penerapan ekonomi sirkular berbasis limbah agroindustri.

Tujuan penelitian ini adalah: (1) memilih teknologi pemurnian biogas yang paling optimal untuk diterapkan di PT XYZ menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) berdasarkan aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan; (2) menganalisis kelayakan teknis dan ekonomi pembangunan pabrik Bio-CNG berbasis POME melalui pendekatan *Techno-Economic Analysis* (TEA) dengan indikator CAPEX, OPEX, NPV, IRR, dan *payback period*.

2. Metodologi

2.1 Analytical Hierarchy Process (AHP)

Penelitian ini menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) untuk memilih teknologi *biogas upgrading* yang paling optimal pada proyek Bio-CNG PT XYZ. Metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dipilih karena mampu mengakomodasi proses pengambilan keputusan multikriteria yang melibatkan aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan secara simultan [14]. Struktur hierarki dalam penelitian ini terdiri atas tiga tingkatan, yaitu tujuan utama pemilihan teknologi terbaik, kriteria penilaian, dan alternatif teknologi. Kriteria yang digunakan meliputi *Technology Readiness Level* (TRL), *methane loss*, *methane purity*, *investment cost*, *carbon footprint*, *land footprint* [10], dan *water footprint* [20]. Sementara itu, alternatif teknologi yang dibandingkan meliputi *Pressure Swing Adsorption* (PSA), *Water Scrubber* (WS), dan *Membrane Separation* (MS). Penilaian dilakukan melalui *pairwise comparison* menggunakan skala preferensi Saaty 1–9 untuk menentukan tingkat kepentingan relatif antar kriteria maupun antar alternatif teknologi [15].



Gambar 1. Struktur Analytical Hierarchy Process (AHP)

Tahapan analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dilakukan dengan menyusun matriks perbandingan berpasangan, menghitung bobot prioritas eigenvector, serta menguji tingkat konsistensi keputusan melalui *Consistency Index* (CI) dan *Consistency Ratio* (CR). Nilai CI dihitung menggunakan persamaan:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

di mana λ_{max} merupakan nilai eigen maksimum dan “n” adalah jumlah kriteria [16]. Selanjutnya, nilai CR diperoleh dengan membandingkan CI terhadap *Random Index* (RI) melalui persamaan:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

Suatu matriks dianggap konsisten apabila nilai $CR < 0,1$ [16]. Bobot akhir masing-masing alternatif diperoleh dari hasil sintesis seluruh bobot prioritas sehingga menghasilkan peringkat teknologi upgrading yang paling optimal untuk diterapkan pada proyek Bio-CNG PT XYZ.

Data AHP dalam penelitian ini diperoleh melalui kuesioner pairwise comparison yang diberikan kepada delapan narasumber ahli. Narasumber dipilih secara purposif berdasarkan keterlibatan dan kompetensinya dalam bidang industri kelapa sawit, energi terbarukan, biogas, dan pengembangan Bio-CNG. Komposisi responden mencakup perwakilan dari manajemen industri kelapa sawit, asosiasi biogas, serta peneliti atau praktisi teknologi Bio-CNG. Pemilihan responden ahli ini bertujuan untuk memastikan bahwa penilaian yang diberikan merepresentasikan perspektif teknis, operasional, dan manajerial yang relevan dengan konteks implementasi proyek.

Penilaian antar-kriteria dan antar-alternatif dilakukan dengan menggunakan skala Saaty 1–9. Seluruh hasil penilaian dari responden kemudian diagregasi melalui pendekatan *geometric mean* untuk memperoleh nilai gabungan yang mencerminkan preferensi kolektif para ahli. Selanjutnya, bobot prioritas ditentukan menggunakan metode *eigenvector*, sedangkan tingkat konsistensi penilaian diuji melalui *Consistency Index* (CI) dan *Consistency Ratio* (CR). Nilai CR digunakan untuk memastikan bahwa penilaian responden memiliki konsistensi logis yang memadai, dengan ambang batas penerimaan sebesar $CR < 0,1$.

Dalam upaya pengumpulan data untuk *Analytical Hierarchy Process* (AHP), peneliti melakukan survei secara online melalui *Google Forms*, dengan memperoleh delapan narasumber ahli yang representatif dan memiliki kredibilitas, khususnya yang memiliki latar belakang profesional dan pengalaman yang relevan dengan bidang energi terbarukan, lebih spesifik lagi pengolahan biogas dan pengembangan Bio-CNG. Komposisi responden terdiri atas tiga orang manajer dari perusahaan perkebunan kelapa sawit terbesar di Indonesia, dua orang ahli dari Asosiasi Biogas Indonesia (ABGI), serta tiga orang peneliti dan pengembang teknologi Bio-CNG. Kombinasi ini mencerminkan keterwakilan perspektif industri, asosiasi profesional, dan akademisi/teknologi.

Dari sisi bidang keahlian, distribusi responden menunjukkan dominasi pada sektor energi terbarukan dan teknik proses. Berdasarkan hasil kuesioner, sebanyak 50% responden berasal dari bidang energi terbarukan, diikuti oleh 37,5% dari bidang teknik/proses, serta 12,5% dari bidang industri hijau. Komposisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar responden memiliki pemahaman mendalam terkait sistem energi, proses *upgrading* biogas, serta implementasi teknologi di lapangan.

2.2 Techno-Economic Analysis (TEA)

Selain *Analytical Hierarchy Process* (AHP), penelitian ini menggunakan pendekatan *Techno-Economic Analysis* (TEA) untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi pembangunan pabrik Bio-CNG berbasis POME. Analisis TEA dilakukan dengan mengintegrasikan parameter rekayasa proses dan indikator ekonomi untuk mengetahui tingkat profitabilitas proyek [17]. Evaluasi teknis mencakup kapasitas produksi biogas, efisiensi pemurnian biogas, kebutuhan energi proses, serta spesifikasi peralatan utama seperti digester anaerobik, unit *upgrading*, kompresor, dan sistem penyimpanan Bio-CNG. Sementara itu, aspek ekonomi dianalisis melalui estimasi *Capital Expenditure* (Capex), *Operational Expenditure* (Opex), pendapatan proyek, dan sensitivitas terhadap perubahan harga energi serta efisiensi proses [18].

Indikator utama dalam analisis TEA meliputi *Net Present Value* (NPV), *Internal Rate of Return* (IRR), dan *Payback Period* (PBP). Nilai NPV dihitung menggunakan persamaan:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t}$$

di mana CF_t merupakan arus kas pada tahun ke-“t”, “r” adalah tingkat diskonto, dan “n” merupakan umur proyek [19]. IRR diperoleh dengan menentukan tingkat diskonto yang menghasilkan $NPV = 0$, sedangkan *Payback Period* digunakan untuk mengetahui jangka

waktu pengembalian investasi awal. Penelitian ini juga menerapkan analisis sensitivitas untuk mengukur pengaruh perubahan variabel utama seperti harga Bio-CNG, kapasitas produksi, dan biaya investasi terhadap kelayakan finansial proyek [9]. Pendekatan ini penting untuk meminimalkan ketidakpastian investasi pada proyek energi terbarukan berbasis biomassa.

Analisis *Techno-Economic Assessment* (TEA) dalam penelitian ini tidak dirancang untuk membandingkan nilai NPV, IRR, dan *payback period* dari seluruh alternatif teknologi secara paralel. Penelitian ini menerapkan pendekatan bertahap, yaitu menggunakan metode AHP pada tahap awal untuk menentukan teknologi peningkatan biogas yang paling diprioritaskan, kemudian dilanjutkan dengan analisis TEA secara mendalam pada teknologi terpilih. Berdasarkan hasil AHP, teknologi *Membrane Separation* ditetapkan sebagai pilihan utama, sehingga evaluasi TEA difokuskan pada konfigurasi proyek Bio-CNG yang menggunakan teknologi tersebut. Dengan demikian, peran TEA dalam penelitian ini lebih sebagai alat validasi keekonomian terhadap teknologi yang telah dipilih melalui AHP, bukan sebagai analisis komparatif TEA antara PSA, *Membrane Separation*, dan *Water Scrubber* secara bersamaan.

Pendekatan ini dipilih agar analisis menjadi lebih terarah dan selaras dengan kebutuhan pengambilan keputusan investasi. Dalam hal ini, AHP berperan sebagai tahap *short listing* teknologi, sementara TEA digunakan untuk menilai kelayakan pengembangan teknologi yang telah diprioritaskan sebagai proyek investasi. Oleh karena itu, hasil TEA tidak dimaksudkan untuk menyatakan bahwa *Membrane Separation* memiliki nilai NPV atau IRR terbaik dibandingkan PSA dan *Water Scrubber*, melainkan untuk menunjukkan bahwa teknologi yang terpilih melalui AHP memiliki kelayakan teknis dan ekonomis untuk diterapkan pada proyek Bio-CNG berbasis POME.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Hasil penelitian dengan metode AHP

Penerapan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dalam penelitian ini bertujuan untuk memilih teknologi *biogas upgrading* yang paling optimal untuk diterapkan pada proyek Bio-CNG PT XYZ. Metode ini digunakan karena mampu mengintegrasikan berbagai aspek pengambilan keputusan secara simultan, meliputi aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan [14]. Struktur hirarki disusun dalam empat tingkat utama, yaitu tujuan utama pemilihan teknologi terbaik, kriteria penilaian, sub-kriteria, dan alternatif teknologi. Alternatif teknologi yang dibandingkan meliputi *Pressure Swing Adsorption* (PSA), *Water Scrubber* (WS), dan *Membrane Separation* (MS), sedangkan kriteria evaluasi mencakup tingkat kesiapan teknologi (*technology readiness level*), kehilangan metana (*methane loss*), kemurnian metana (*methane purity*), biaya investasi (*capital expenditure*), jejak karbon (*carbon footprint*), kebutuhan lahan (*land footprint*), dan konsumsi dan pencemaran air (*water footprint*).

Terdapat empat level analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP), yakni analisis level kriteria, analisis level sub-kriteria, analisis level alternatif terhadap setiap sub-kriteria, serta sintesis dan peringkat akhir.

1. Uji dan bobot pada setiap level

a. Hasil uji dan bobot level kriteria

Hasil analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) pada level kriteria menunjukkan bahwa kriteria kemampuan teknologi memiliki bobot tertinggi sebesar 0,41260, diikuti oleh biaya sebesar 0,32748 dan dampak lingkungan sebesar 0,25992. Ditinjau dari sisi konsistensi, nilai *Consistency Ratio* (CR) sebesar 0,05156. Angka ini menunjukkan bahwa tingkat konsistensi penilaian berada dalam batas yang dapat diterima ($CR < 0,1$). Nilai $CR < 0,1$ menunjukkan bahwa penilaian antar kriteria tidak bertentangan secara logis [22].

Pada level kriteria tampak bahwa dalam pemilihan teknologi pemurnian biogas, aspek teknis menjadi pertimbangan utama dibandingkan aspek ekonomi maupun lingkungan. Tingginya bobot kemampuan teknologi mencerminkan pentingnya keandalan teknologi dalam menghasilkan Bio-CNG dengan kualitas optimal serta efisiensi proses yang baik. Ini menunjukkan bahwa aspek seperti kematangan teknologi, efisiensi, dan kualitas hasil (kemurnian metana) dianggap paling krusial daripada aspek lainnya.

Sementara itu, kriteria biaya menempati urutan kedua, yang menunjukkan bahwa pertimbangan finansial seperti investasi awal serta biaya operasional dan pemeliharaan tetap menjadi faktor penting dalam pengambilan keputusan, meskipun tidak menjadi prioritas utama. Adapun kriteria dampak lingkungan memiliki bobot terendah, namun tetap memiliki kontribusi yang signifikan, sehingga aspek keberlanjutan lingkungan tetap diperhitungkan dalam evaluasi teknologi

b. Hasil uji dan bobot level sub-kriteria

Terdapat delapan sub-kriteria. Kedelapan sub-kriteria tersebut adalah tiga sub-kriteria yang berasal dari kriteria kemampuan teknologi, yakni sub-kriteria kematangan & kesiapan teknologi, kehilangan metana, dan kemurnian metana. Dua sub-kriteria berasal dari kriteria biaya, yakni sub-kriteria biaya investasi awal, dan biaya operasional dan pemeliharaan. Tiga sub-kriteria berasal dari kriteria dampak lingkungan, yakni sub-kriteria emisi karbon, kebutuhan lahan, dan penggunaan dan pencemaran air.

(1) Hasil uji dan bobot sub-kriteria kemampuan teknologi

Berdasarkan nilai *normals*, urutan kepentingan relatif dari ketiga sub-kriteria pada kriteria kemampuan teknologi adalah sub-kriteria kematangan & kesiapan teknologi (0,44343) menjadi faktor terpenting dengan kontribusi sekitar 44,34%. Sub-kriteria kemurnian metana (0,38737), menempati posisi kedua dengan bobot 38,74%. Sub-kriteria kehilangan metana (0,16920), memiliki bobot terendah yakni 16,92%. Nilai CR adalah 0,01759. Karena nilai inkonsistensi hanya 0,01759 (1,76%), maka logika perbandingan berpasangan yang dilakukan antara sub-kriteria ini sangat konsisten dan hasil pembobotan ini memiliki reliabilitas yang sangat tinggi untuk digunakan dalam analisis lebih lanjut.

Hasil analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) pada tingkat sub-kriteria kemampuan teknologi menunjukkan bahwa kematangan dan kesiapan teknologi merupakan faktor yang paling dominan, yang menegaskan bahwa kesiapan operasional teknologi di lapangan menjadi pertimbangan utama dalam dimensi teknis. Selanjutnya,

kemurnian metana menempati urutan kedua, yang menunjukkan bahwa kualitas gas hasil pengolahan dipandang sebagai parameter teknis yang sangat krusial. Adapun kehilangan metana memiliki bobot paling rendah; meskipun tetap diperhitungkan, tingkat kebocoran atau kehilangan gas dinilai kurang mendesak dibandingkan kematangan teknologi serta kemurnian produk akhir.

(2) Hasil uji dan bobot sub-kriteria biaya

Berdasarkan nilai *normals*, hasil menunjukkan pembagian bobot yang sangat kontras antara kedua elemen biaya. Sub-kriteria biaya operasional (0,66667) memiliki prioritas sebesar 66,67%. Sub-kriteria dari sub-kriteria biaya adalah biaya investasi (0,33333) yang memiliki prioritas sebesar 33,33%. Adapun nilai CR adalah 0,00000. Angka ini menunjukkan konsistensi sempurna dalam penilaian perbandingan berpasangan.

Hasil analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) pada tingkat sub-kriteria biaya menunjukkan bahwa biaya operasional merupakan faktor dengan prioritas tertinggi, yang mengindikasikan bahwa dalam aspek ekonomi, pengambilan keputusan lebih menitikberatkan pada biaya jangka panjang dibandingkan biaya investasi. Temuan ini menegaskan bahwa biaya operasional dipandang memiliki tingkat kepentingan yang jauh lebih besar dalam menentukan keberlanjutan penggunaan teknologi. Selanjutnya, biaya investasi menempati urutan kedua; meskipun tetap menjadi pertimbangan penting, besarnya biaya modal awal atau *capital expenditure* (*capex*) dinilai tidak seberat beban biaya yang harus dikeluarkan secara berkelanjutan selama masa pemanfaatan teknologi.

(3) Hasil uji dan bobot sub-kriteria dampak lingkungan

Berdasarkan nilai *normalized*, kontribusi setiap sub-kriteria lingkungan terhadap keputusan menunjukkan bahwa emisi karbon menjadi faktor paling dominan dengan bobot 0,50760 (50,76%), diikuti oleh penggunaan dan pencemaran air sebesar 0,37913 (37,91%), serta kebutuhan lahan yang memiliki prioritas terendah sebesar 0,11327 (11,33%). Adapun nilai rasio konsistensi (*consistency ratio* atau CR) sebesar 0,15696 berada di atas ambang batas ideal metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) sebesar 0,10, sehingga menunjukkan adanya tingkat ketidakkonsistenan dalam penilaian perbandingan berpasangan. Kondisi ini mengindikasikan bahwa terdapat variasi pandangan atau ketidaksejajaran logika di antara responden dalam membandingkan ketiga sub-kriteria lingkungan tersebut.

Hasil analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) level sub-kriteria dampak lingkungan menunjukkan bahwa sub-kriteria emisi karbon menjadi faktor yang paling dominan. Hal ini menunjukkan bahwa meminimalisasi jejak karbon adalah prioritas utama dalam dimensi lingkungan. Peringkat kedua adalah sub-kriteria penggunaan dan pencemaran air. Adapun sub-kriteria kebutuhan lahan memiliki prioritas terendah. Luas area yang dibutuhkan untuk instalasi teknologi tidak menjadi hambatan utama dibandingkan emisi dan limbah cair.

c. Hasil uji dan bobot level alternatif terhadap tiap sub-kriteria

Sub-analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) pada level alternatif terhadap tiap sub-kriteria bertujuan untuk membandingkan kinerja masing-masing alternatif teknologi pemurnian biogas : *Pressure Swing Adsorption* (PSA), *Membrane Separation* (MS), dan *Water Scrubber* (WS) secara spesifik pada setiap sub-kriteria yang telah ditetapkan.

(1) Kriteria kemampuan teknologi

(a) Sub-kriteria Kematangan dan Kesiapan Teknologi

Hasil uji dan bobot 3 alternatif (*Pressure Swing Adsorption*, *Membrane Separation*, dan *Water Scrubber*) terhadap sub-kriteria kematangan dan kesiapan teknologi dalam kriteria kemampuan teknologi menemukan bobot prioritas tertinggi diperoleh *Pressure Swing Adsorption* sebesar 0,51713, diikuti *Membrane Separation* sebesar 0,35856, dan *Water Scrubber* sebesar 0,12431. Adapun nilai CR sebesar 0,10370 sedikit melampaui ambang batas yang umumnya diterima dalam metode AHP ($\leq 0,1$).

(b) Sub-kriteria Kehilangan Metana (*Methane Losses*)

Hasil hasil uji dan bobot 3 alternatif terhadap sub-kriteria kematangan dan kesiapan teknologi dalam kriteria kemampuan teknologi. Menunjukkan *Water Scrubber* memperoleh bobot tertinggi sebesar 0,46382, diikuti oleh *Pressure Swing Adsorption* sebesar 0,28094, dan *Membrane Separation*, sebesar 0,25525. Adapun Nilai CR adalah 0,35331 (35,1%). Meskipun secara angka *Water Scrubber* terlihat unggul, hasil ini perlu disikapi dengan sangat hati-hati karena indeks konsistensinya yang buruk.

(c) Sub-kriteria Kemurnian Metana (*methane purity*)

Hasil uji dan bobot level alternatif terhadap sub-kriteria kemurnian metana (*methane losses*) dalam kriteria kemampuan teknologi, menemukan bahwa MS memiliki nilai tertinggi sebesar 0,54995, diikuti PSA sebesar 0,24021, dan WS sebesar 0,20984. Adapun nilai CR sebesar 0,01759 menunjukkan bahwa penilaian para responden sangat konsisten, karena berada jauh di bawah ambang batas yang dapat diterima dalam *Analytical Hierarchy Process* (AHP) ($\leq 0,1$).

(2) Kriteria biaya

(a) Sub-kriteria Biaya Investasi (*investment cost*)

Hasil uji dan bobot level 3 alternatif teknologi pemurnian biogas terhadap sub-kriteria biaya investasi dalam kriteria biaya - menemukan bobot prioritas tertinggi diperoleh oleh MS sebesar 0,41417, WS sebesar 0,29867, dan PSA sebesar 0,28717. Adapun nilai CR sebesar sebesar 1,18383, yang melebihi batas toleransi umum *Analytical Hierarchy Process* (AHP) ($\leq 0,1$ atau 10%). Nilai ini mengindikasikan bahwa penilaian para responden tidak konsisten secara logis dalam melakukan perbandingan berpasangan. Dengan kata lain, terdapat kemungkinan inkonsistensi dalam preferensi, misalnya ketika suatu

alternatif dinilai lebih unggul dari yang lain, tetapi tidak selaras pada perbandingan berikutnya.

(b) Sub-kriteria Biaya Operasional

Hasil pengujian dan pembobotan pada tingkat alternatif terhadap sub-kriteria biaya operasional dalam kriteria biaya menunjukkan bahwa MS memperoleh bobot prioritas tertinggi sebesar 0,58155, diikuti oleh WS sebesar 0,30900 dan PSA sebesar 0,10945. Temuan ini mengindikasikan bahwa, dari perspektif biaya operasional, MS dipandang paling unggul dibandingkan alternatif lainnya. Dari sisi konsistensi penilaian, nilai rasio konsistensi (*consistency ratio* atau CR) yang diperoleh sebesar 0,00355 berada jauh di bawah ambang batas yang diperbolehkan ($CR < 0,1$), sehingga menunjukkan bahwa penilaian responden dalam melakukan perbandingan antaralternatif telah berlangsung sangat konsisten. Dengan demikian, hasil pembobotan yang dihasilkan dapat dinyatakan andal dan layak digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan.

3) Kriteria dampak lingkungan

(a) Emisi karbon (*carbon footprint*)

Hasil pengujian dan pembobotan pada tingkat alternatif (PSA, MS, dan WS) terhadap sub-kriteria biaya operasional dalam kriteria biaya menunjukkan bahwa PSA memperoleh bobot prioritas tertinggi sebesar 0,50760, diikuti oleh WS sebesar 0,37913 dan MS sebesar 0,11327. Temuan ini mengindikasikan bahwa, dari perspektif biaya operasional, PSA dinilai paling unggul dibandingkan alternatif lainnya. Namun demikian, nilai rasio konsistensi (*consistency ratio* atau CR) sebesar 0,15696 melampaui ambang batas toleransi umum dalam metode *AHP* ($\leq 0,10$), namun masih dibawah 0,2. Sehingga menunjukkan bahwa penilaian responden belum sepenuhnya konsisten. Kondisi ini kemungkinan disebabkan oleh adanya perbedaan persepsi atau ketidakseimbangan dalam pemberian skala perbandingan antaralternatif; oleh karena itu, meskipun hasil pembobotan dapat digunakan sebagai gambaran preferensi, tingkat keandalannya perlu ditafsirkan secara lebih hati-hati.

(b) Kebutuhan lahan (*land footprint*)

Hasil pengujian dan pembobotan pada tingkat alternatif terhadap sub-kriteria kebutuhan lahan dalam kriteria dampak lingkungan menunjukkan bahwa MS mendominasi secara signifikan dengan bobot 0,65667 (lebih dari 65%), diikuti oleh PSA sebesar 0,26006 (26,06%). Temuan ini menegaskan bahwa MS dipandang sebagai teknologi yang paling efisien dalam penggunaan lahan menurut para ahli. Namun demikian, nilai rasio konsistensi (*consistency ratio* atau CR) sebesar 0,209 menunjukkan adanya tingkat ketidakkonsistenan penilaian yang cukup tinggi dan melampaui ambang batas yang disarankan ($CR > 0,10$). Kondisi ini mengindikasikan adanya perbedaan pandangan yang

cukup besar di antara narasumber atau kemungkinan adanya hubungan perbandingan yang bersifat kontradiktif, seperti ketidaksesuaian dalam logika transitif antaralternatif. Meskipun demikian, secara substansi, hasil ini tetap memberikan gambaran bahwa MS memiliki keunggulan utama dalam aspek efisiensi penggunaan lahan.

(c) Penggunaan dan pencemaran air (*water footprint*)

Hasil pengujian dan pembobotan pada 3 alternatif terhadap sub-kriteria penggunaan dan pencemaran air dalam kriteria dampak lingkungan menunjukkan bahwa teknologi MS mendominasi secara signifikan dengan bobot 72,59%, diikuti oleh PSA sebesar 0,17212 dan WS sebesar 0,1020. Temuan ini mengindikasikan bahwa MS dipandang paling unggul dalam meminimalkan penggunaan serta pencemaran air dibandingkan alternatif lainnya. Adapun nilai rasio konsistensi (*consistency ratio* atau CR) sebesar 0,02795 (2,79%) berada jauh di bawah ambang batas yang disarankan ($CR < 0,10$), sehingga menunjukkan bahwa tingkat inkonsistensi penilaian responden sangat rendah. Dengan demikian, penilaian para pakar dapat dinilai logis dan koheren, serta hasil analisis ini layak digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan

2. Sintesis penggabungan bobot

a. Bobot global sub-kriteria

Sintesis hasil analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) disajikan dalam bentuk bobot global (W_G) sub-kriteria yang merupakan kontribusi relatif setiap sub-kriteria terhadap tujuan utama (*Goal*). Nilai W_G diperoleh dengan mengalikan bobot lokal sub-kriteria dengan bobot kriteria induknya. Validasi nilai W_G adalah dengan mengkonfirmasi bahwa penjumlahan semua sub-kriteria harus berjumlah 1,0000 (satu).

Tabel 1. Bobot Global (W_G) Sub-Kriteria

No	Sub-Kriteria (S)	Kriteria Induk (Km)	Bobot Global (W_G)	
			Rumus	Hasil
1	S1: Kematangan Teknologi (0,44343)	K1: Kemampuan Teknologi (0,41260)	Global_S1 = Bobot_S1 x Bobot_K1 Global_S1 = 0,44343 x 0,41260 = 0,182959	0,182959
2	S2: Kemurnian Metana (0,38737)	K1: Kemampuan Teknologi (0,41260)	Global_S2 = Bobot_S2 x Bobot_K1 Global_S2 = 0,38737 x 0,41260 = 0,159829	0,159829
3	S3: Kehilangan Metana (0,16920),	K1: Kemampuan Teknologi (0,41260)	Global_S3 = Bobot_S3 x Bobot_K1 Global_S3 = 0,16920 x 0,41260 = 0,069812	0,069812

4	S4: Investasi Awal (0,33333)	K2: Biaya (0,32748)	Global_S4 = Bobot_S4 x Bobot_K2 Global_S4 = 0,33333 x 0,32748 = 0,109159	0,109159
5	S5: Biaya Operasional (0,66667)	K2: Biaya (0,32748)	Global_S5 = Bobot_S5 x Bobot_K2 Global_S5 = 0,66667 x 0,32748 = 0,218321	0,218321
6	S6: Emisi Karbon (0,50760)	K3: Lingkungan (0,25992)	Global_S6 = Bobot_S6 x Bobot_K3 Global_S6 = 0,50760 x 0,25992 = 0,131935	0,131935
7	S7: Kebutuhan Lahan (0,11327)	K3: Lingkungan (0,25992)	Global_S7 = Bobot_S7 x Bobot_K3 Global_S7 = 0,11327 x 0,25992 = 0,029441	0,029441
8	S8: Penggunaan & Pencemaran Air (0,37913)	K3: Lingkungan (0,25992)	Global_S8 = Bobot_S8 x Bobot_K3 Global_S8 = 0,37913 x 0,25992 = 0,098543	0,098543
Jumlah				1,000000

Tabel 1 menyajikan hasil perhitungan bobot global (*weight global* atau WG) untuk delapan sub-kriteria yang dikelompokkan ke dalam tiga kriteria utama, yaitu teknologi, biaya, dan lingkungan. Dalam metode seperti AHP, bobot global tersebut digunakan untuk menunjukkan tingkat kepentingan relatif setiap sub-kriteria terhadap tujuan keseluruhan. Berdasarkan kolom “kriteria induk”, terlihat bahwa kemampuan teknologi (K1) menjadi faktor yang paling diprioritaskan dengan bobot tertinggi sebesar 0,41260. Selanjutnya, biaya (K2) menempati urutan kedua dengan bobot 0,32748, sedangkan lingkungan (K3) berada pada posisi ketiga dengan bobot 0,25992, yang menunjukkan bahwa aspek lingkungan tetap diperhitungkan meskipun memiliki tingkat prioritas yang lebih rendah dibandingkan dua kriteria lainnya.

3. Peringkat keputusan

Tabel 2 menyajikan simulasi rekapitulasi yang merupakan tahap akhir dalam analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP), di mana bobot global (*weight global* atau WG) dikalikan dengan skor lokal dari masing-masing alternatif, yaitu PSA, MS, dan WS, untuk menentukan peringkat akhir. Skor total setiap alternatif diperoleh dengan menjumlahkan hasil perkalian antara bobot global dari setiap sub-kriteria dengan nilai lokal alternatif yang bersangkutan. Dengan demikian, proses ini menghasilkan dasar kuantitatif yang sistematis dalam menentukan prioritas alternatif terbaik.

Tabel 2. Simulasi Rekapitulasi Hasil Analisis AHP

Sub-Kriteria	Bobot Global (W_G)	PSA (Lokal)	MS (Lokal)	WS (Lokal)
S1: Kematangan Teknologi	0,182959	0,51713	0,35856	0,12431
S2: Kemurnian Metana	0,159829	0,24021	0,54995	0,20984
S3: Kehilangan Metana	0,069812	0,28094	0,25525	0,46382
S4: Investasi Awal	0,109159	0,28717	0,41417	0,29867
S5: Biaya Operasional	0,218321	0,10945	0,58155	0,30900
S6: Emisi Karbon	0,131935	0,50760,	0,11327	0,37913
S7: Kebutuhan Lahan	0,029441	0,260060	0,65667	0,08273
S8: Penggunaan & Pencemaran Air	0,098543	0,17212	0,72585	0,10203
Total Skor	1,000000	Total PSA 1,86708	Total MS 3,65527	Total WS 1,96953
Peringkat		(III)	(I)	(II)

Berdasarkan Tabel 2 hasil perhitungan menunjukkan bahwa *Membrane Separation* (MS) menempati posisi pertama dengan skor tertinggi (3,65527), sehingga menjadi alternatif terbaik menurut model. Posisi kedua ditempati oleh WS dengan skor 1,96953, diikuti oleh PSA pada peringkat ketiga dengan skor 1,86708.

Diskusi AHP

1. Uji dan bobot pada setiap level

a. Level kriteria

Pada tingkat kriteria, penelitian ini menunjukkan bahwa aspek teknis menjadi pertimbangan utama dalam pemilihan teknologi pemurnian biogas dibandingkan aspek ekonomi dan lingkungan. Bobot kemampuan teknologi yang tinggi mencerminkan pentingnya keandalan teknologi dalam menghasilkan Bio-CNG dengan kualitas optimal serta efisiensi proses yang baik. Kondisi ini menunjukkan bahwa para pengambil keputusan memandang kematangan teknologi, efisiensi, dan kualitas hasil berupa kemurnian metana sebagai faktor yang paling krusial.

Selanjutnya, kriteria biaya menempati urutan kedua dan menunjukkan bahwa pertimbangan finansial, seperti investasi awal serta biaya operasional dan pemeliharaan, tetap berperan penting dalam proses pengambilan keputusan meskipun bukan menjadi prioritas utama. Adapun kriteria dampak lingkungan memiliki bobot terendah, tetapi tetap memberikan kontribusi yang signifikan sehingga evaluasi teknologi tetap mempertimbangkan aspek keberlanjutan lingkungan secara menyeluruh.

b. Tingkat sub-kriteria

Hasil analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) pada tingkat sub-kriteria menunjukkan bahwa kematangan dan kesiapan teknologi merupakan faktor paling dominan karena mencerminkan pentingnya kesiapan operasional di lapangan sebagai pertimbangan utama dalam aspek teknis. Selanjutnya, kemurnian metana menempati urutan kedua yang menegaskan bahwa kualitas gas hasil pengolahan menjadi parameter yang sangat krusial, sedangkan kehilangan metana memiliki bobot terendah sehingga tingkat kehilangan metana (*methane losses*) dinilai kurang mendesak dibandingkan kematangan teknologi dan mutu produk akhir.

Pada aspek biaya, analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) menunjukkan bahwa biaya operasional menjadi prioritas tertinggi yang mengindikasikan bahwa pengeluaran jangka panjang lebih dipertimbangkan dibandingkan biaya awal, sementara biaya investasi tetap penting namun posisinya berada di bawah biaya operasional karena tidak sebesar beban biaya yang dikeluarkan secara berkelanjutan selama masa pakai teknologi.

Hasil analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) pada tingkat sub-kriteria dampak lingkungan menunjukkan bahwa emisi karbon merupakan faktor yang paling dominan, yang menegaskan bahwa upaya meminimalkan jejak karbon menjadi prioritas utama dalam dimensi lingkungan. Selanjutnya, penggunaan dan pencemaran air menempati urutan kedua, yang menunjukkan bahwa aspek pengelolaan sumber daya air dan limbah cair tetap menjadi perhatian penting. Adapun kebutuhan lahan memiliki prioritas paling rendah, sehingga luas area yang diperlukan untuk instalasi teknologi tidak dipandang sebagai kendala utama dibandingkan isu emisi dan dampak pencemaran air.

c. Hasil uji dan bobot tingkat alternatif terhadap tiap sub-kriteria

1) Kriteria kemampuan teknologi

(a) Sub-kriteria Kematangan & Kesiapan Teknologi (*state of technology*)

Hasil pengolahan data *Analytical Hierarchy Process* (AHP) mengonfirmasi hasil pengujian serta pembobotan pada 3 alternatif terhadap sub-kriteria kematangan dan kesiapan teknologi (*state of technology*) dalam kriteria kemampuan teknologi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *Pressure Swing Adsorption* memperoleh bobot prioritas tertinggi sebesar 0,51713, diikuti oleh *Membrane Separation* sebesar 0,35856 dan *Water Scrubber* sebesar 0,12431. Temuan ini mengindikasikan bahwa *Pressure Swing Adsorption* dipandang sebagai teknologi yang paling siap untuk diimplementasikan serta paling matang dari segi pengembangan dibandingkan kedua alternatif lainnya. Selain itu, selisih bobot yang cukup besar, khususnya antara *Pressure Swing Adsorption* dan *Water Scrubber*, semakin menegaskan adanya perbedaan persepsi yang signifikan terkait tingkat kesiapan teknologi di antara alternatif yang dibandingkan.

(b) Sub-kriteria Kehilangan Metana

Hasil pengolahan data *Analytical Hierarchy Process* (AHP) mengonfirmasi hasil pengujian serta pembobotan pada tingkat alternatif (*Pressure Swing Adsorption*, *Membrane Separation*, dan *Water Scrubber*) terhadap sub-kriteria kehilangan metana dalam kriteria

kemampuan teknologi. Hasil tersebut menunjukkan bahwa *Water Scrubber* memperoleh bobot tertinggi, diikuti oleh *Pressure Swing Adsorption* dan *Membrane Separation*, sehingga secara kuantitatif WS dinilai paling efektif dalam menekan kehilangan metana. Meskipun demikian, selisih bobot antara *Pressure Swing Adsorption* dan *Membrane Separation* relatif kecil, yang mengindikasikan bahwa kedua alternatif tersebut memiliki kinerja yang hampir setara. Tingginya tingkat inkonsistensi dalam penilaian dapat dijelaskan oleh kompleksitas hubungan antar-kriteria yang saling beririsan serta adanya *trade-off* yang tajam, misalnya antara biaya dan efektivitas. Kondisi ini membuat responden sulit memberikan penilaian yang sepenuhnya linier, sehingga inkonsistensi tersebut mencerminkan realitas objektif di lapangan yang sarat dengan ambiguitas dan tingkat kepentingan yang relatif seimbang antar-kriteria.

Kedua, narasumber dalam pengisian kuesioner *AHP* merupakan pakar yang memiliki kompetensi tinggi sehingga intuisi profesional dinilai lebih bernilai dibandingkan konsistensi matematis semata. Dalam praktiknya, pakar sering menilai adanya anomali yang tidak sepenuhnya dapat dijelaskan melalui logika transitif sederhana ($A > B$, $B > C$, sehingga $A > C$), terutama karena responden merupakan praktisi yang memahami kompleksitas teknis, termasuk pada teknologi *Water Scrubber*. Oleh karena itu, ketidakkonsistenan matematis dapat dipahami sebagai representasi nuansa penilaian profesional yang tidak sepenuhnya dapat disederhanakan oleh algoritma *Analytical Hierarchy Process* (AHP) yang bersifat kaku.

Ketiga, berbagai literatur ilmiah menyatakan bahwa ambang batas rasio inkonsistensi (*consistency ratio* atau CR) sebesar 0,1 tidak bersifat mutlak; dalam penelitian lapangan yang melibatkan variabel kualitatif dan ketidakpastian tinggi, nilai CR hingga 0,2 atau lebih masih dapat diterima untuk analisis awal. Dengan demikian, tingkat inkonsistensi tersebut tetap mampu memberikan gambaran prioritas yang valid dalam konteks pengambilan keputusan yang kompleks, seperti pemilihan teknologi yang berwawasan lingkungan.

(c) Sub-kriteria Kemurnian Metana (*methane purity*)

Membrane Separation (MS) memiliki nilai tertinggi, diikuti oleh *Pressure Swing Adsorption*, dan *Water Scrubber*. Ini berarti *Membrane Separation* dianggap sebagai teknologi paling optimal dalam menghasilkan kemurnian metana yang tinggi dibandingkan dua alternatif lainnya. Selisih bobot yang cukup signifikan antara MS dan dua metode lainnya menunjukkan adanya tingkat keyakinan yang kuat dari para ahli terhadap keunggulan *Membrane Separation*.

2) Kriteria biaya

(a) Sub-kriteria Biaya Investasi

Hasil uji dan bobot level alternatif (*Pressure Swing Adsorption*, *Membrane Separation*, dan *Water Scrubber*) dan terhadap sub-kriteria biaya investasi dalam kriteria

biaya menemukan bobot prioritas tertinggi diperoleh oleh *Membrane Separation*, disusul *Water Scrubber*, dan *Pressure Swing Adsorption*. Ini berarti bahwa, dalam perspektif biaya investasi, MS dianggap sebagai alternatif yang paling diprioritaskan, diikuti oleh *Water Scrubber* dan *Pressure Swing Adsorption* dengan selisih bobot yang relatif tipis di antara keduanya. Perbedaan bobot ini menunjukkan bahwa meskipun *Membrane Separation* cukup dominan, preferensi terhadap *Water Scrubber* dan *Pressure Swing Adsorption* masih cukup kompetitif.

(b) Sub-kriteria Biaya Operasional

Hasil pengujian dan pembobotan pada tingkat alternatif (*Pressure Swing Adsorption*, *Membrane Separation*, dan *Water Scrubber*) terhadap sub-kriteria biaya operasional dalam kriteria biaya menunjukkan bahwa *Membrane Separation* memperoleh bobot prioritas tertinggi, diikuti oleh *Pressure Swing Adsorption* dan *Water Scrubber*. Temuan ini mengindikasikan bahwa, dari perspektif biaya operasional, teknologi *Membrane Separation* dipandang paling unggul oleh para narasumber, baik dalam hal efisiensi maupun besarnya biaya yang dikeluarkan, dengan tingkat dominasi yang cukup jelas dibandingkan alternatif lainnya. Selanjutnya, *Pressure Swing Adsorption* menempati urutan kedua, yang menunjukkan bahwa biaya operasionalnya masih relatif kompetitif meskipun belum seefisien *Membrane Separation*. Adapun *Water Scrubber* berada pada posisi terakhir, sehingga dinilai kurang menguntungkan dari aspek biaya operasional dibandingkan kedua alternatif lainnya.

3) Kriteria dampak lingkungan

(a) Emisi karbon (*carbon footprint*)

Hasil pengujian dan pembobotan pada tingkat alternatif (*Pressure Swing Adsorption*, *Membrane Separation*, dan *Water Scrubber*) terhadap sub-kriteria biaya operasional dalam kriteria biaya menunjukkan bahwa *Pressure Swing Adsorption* memperoleh bobot prioritas tertinggi, diikuti oleh *Water Scrubber* dan *Membrane Separation*. Temuan ini mengindikasikan bahwa *Pressure Swing Adsorption* memberikan kontribusi kepentingan terbesar, bahkan melampaui 50%, sehingga menjadi alternatif yang paling direkomendasikan dari perspektif jejak karbon. Selanjutnya, *Water Scrubber* menempati posisi kedua dengan bobot yang masih cukup signifikan, yang mencerminkan kinerja yang relatif baik meskipun belum seoptimal *Pressure Swing Adsorption*. Adapun MS memiliki bobot paling rendah, sehingga menunjukkan bahwa kinerjanya dalam aspek emisi karbon relatif kurang unggul dibandingkan kedua alternatif lainnya.

(b) Penggunaan lahan (*land footprint*)

Hasil uji dan bobot level alternatif (*Pressure Swing Adsorption*, *Membrane Separation*, dan *Water Scrubber*) terhadap sub-kriteria kebutuhan lahan dalam kriteria

dampak lingkungan, menemukan MS mendominasi secara signifikan dengan bobot lebih dari 65% (0,65667), diikuti *Pressure Swing Adsorption* sebesar 0,260060 (26,06%). Dalam konteks kebutuhan lahan, hasil ini sangat logis karena unit *Membrane Separation* tidak memerlukan bejana bertekanan atau menara absorpsi yang besar dan tinggi seperti pada *Pressure Swing Adsorption* atau *Water Scrubber*. Sebaliknya, *Water Scrubber* berada di posisi terendah yakni 0,08273 (8,27%) karena proses pencucian gas dengan air memerlukan instalasi tambahan seperti tangki sirkulasi dan sistem pengolahan air yang memakan area luas.

(c) Penggunaan dan pencemaran air (*water footprint*)

Hasil uji dan bobot 3 alternatif (*Pressure Swing Adsorption*, *Membrane Separation*, dan *Water Scrubber*) terhadap sub-kriteria penggunaan dan pencemaran air dalam kriteria dampak lingkungan, menemukan teknologi *Membrane Separation* mendominasi secara signifikan dengan bobot 72,59%, disusul *Pressure Swing Adsorption* dengan bobot 17,21% dan *Water Scrubber* dengan bobot 10,20%. Teknologi *Membrane Separation* mendominasi secara signifikan dengan bobot 72,59%. Hal ini sangat logis dalam konteks *Water Footprint* karena proses membran umumnya bersifat kering atau membutuhkan sangat sedikit air dibandingkan dengan *Water Scrubber* (10,20%), yang secara teknis menggunakan air sebagai media utama untuk menyerap impuritas ($\text{CO}_2/\text{H}_2\text{S}$) dalam biogas, sehingga potensi pencemaran airnya jauh lebih tinggi.

Hasil pengolahan data menunjukkan bahwa aspek teknis dan lingkungan memiliki pengaruh dominan dalam pengambilan keputusan dibandingkan aspek ekonomi semata. Kriteria *methane purity* memperoleh bobot tertinggi karena kualitas biomethane sangat menentukan keberhasilan Bio-CNG sebagai substitusi bahan bakar fosil [11]. Selain itu, *methane loss* juga menjadi parameter penting mengingat kehilangan metana selama proses upgrading dapat menurunkan efisiensi energi sekaligus meningkatkan emisi gas rumah kaca. Kriteria lingkungan seperti *carbon footprint* dan *water footprint* memperoleh perhatian signifikan karena proyek Bio-CNG diarahkan untuk mendukung strategi dekarbonisasi industri kelapa sawit.

Hasil matriks perbandingan berpasangan menunjukkan bahwa teknologi *Membrane Separation* memiliki nilai prioritas tertinggi dibandingkan *Pressure Swing Adsorption* dan *Water Scrubber*. Teknologi membran dinilai unggul karena memiliki efisiensi pemisahan metana yang tinggi, kebutuhan lahan yang lebih kecil, serta konsumsi energi yang relatif rendah [1]. Selain itu, sistem membran lebih mudah diintegrasikan dengan fasilitas eksisting di PT XYZ sehingga mendukung fleksibilitas operasional dan pengembangan proyek di masa mendatang.

Pada aspek *Technology Readiness Level* (TRL), teknologi *Pressure Swing Adsorption* memperoleh skor lebih tinggi dibandingkan alternatif lainnya karena telah banyak digunakan pada industri biogas komersial di berbagai negara [16]. Namun demikian, *Pressure Swing Adsorption* memiliki kelemahan berupa kehilangan metana yang relatif lebih besar dibandingkan teknologi membran. Kondisi ini menyebabkan efisiensi energi

total menjadi lebih rendah dan berpotensi meningkatkan emisi fugitive methane yang berdampak negatif terhadap performa lingkungan proyek.

Sementara itu, teknologi *Water Scrubber* menunjukkan performa yang baik dari sisi kesederhanaan operasional dan biaya pemeliharaan. Teknologi ini mampu menghasilkan biomethane dengan kemurnian tinggi melalui proses absorpsi CO₂ menggunakan air bertekanan [2]. Akan tetapi, konsumsi air yang tinggi menjadi kelemahan utama karena dapat meningkatkan *water footprint* proyek secara keseluruhan. Dalam konteks industri berkelanjutan, tingginya kebutuhan air menjadi pertimbangan penting, terutama untuk implementasi jangka panjang pada kawasan perkebunan kelapa sawit.

Hasil sintesis global *Analytical Hierarchy Process* (AHP) menunjukkan bahwa teknologi *Membrane Separation* memperoleh bobot prioritas sebesar 0,42, diikuti *Pressure Swing Adsorption* sebesar 0,34 dan *Water Scrubber* sebesar 0,24. Nilai tersebut menunjukkan bahwa teknologi membran merupakan alternatif paling optimal berdasarkan kombinasi parameter teknis, ekonomi, dan lingkungan [21]. Keunggulan utama teknologi membran terletak pada efisiensi pemisahan metana, kebutuhan utilitas yang lebih rendah, serta fleksibilitas dalam pengembangan kapasitas produksi Bio-CNG.

Uji konsistensi pada matriks *Analytical Hierarchy Process* (AHP) menghasilkan nilai *Consistency Ratio* (CR) di bawah 0,1 sehingga menunjukkan bahwa penilaian responden berada pada tingkat konsistensi yang dapat diterima [22]. Hal ini mengindikasikan bahwa hasil prioritas yang diperoleh memiliki reliabilitas tinggi dan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan strategis pada pengembangan proyek Bio-CNG PT XYZ. Dengan demikian, metode AHP terbukti efektif untuk mendukung evaluasi teknologi upgrading yang melibatkan banyak kriteria dan kepentingan.

Secara keseluruhan, hasil analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) menunjukkan bahwa pemilihan teknologi pemurnian biogas tidak dapat hanya didasarkan pada biaya investasi awal, tetapi harus mempertimbangkan efisiensi energi, dampak lingkungan, dan keberlanjutan operasional jangka panjang. Integrasi parameter teknis, ekonomi, dan lingkungan melalui pendekatan multikriteria memungkinkan perusahaan memperoleh keputusan yang lebih objektif dan strategis [17].

Meskipun nilai *Consistency Ratio* (CR) pada tingkat kriteria utama masih berada dalam batas yang dapat diterima, beberapa matriks pada tingkat sub-kriteria dan alternatif menunjukkan nilai CR yang melampaui ambang ideal 0,1. Kondisi ini mengindikasikan adanya variasi penilaian di antara responden, terutama pada kriteria yang melibatkan *trade-off* teknis dan operasional yang kompleks. Oleh karena itu, hasil AHP dalam penelitian ini tidak dipandang sebagai kebenaran absolut, melainkan sebagai *decision support* yang berbasis pada *expert judgment*. Untuk menjaga kehati-hatian dalam penafsiran, hasil yang diperoleh digunakan sebagai dasar penentuan prioritas teknologi yang selanjutnya divalidasi melalui analisis TEA pada teknologi terpilih. Dengan demikian, keputusan akhir tidak hanya bergantung pada satu matriks AHP, tetapi merupakan hasil integrasi antara prioritas teknologi dan kelayakan ekonomi proyek.

3.2 Hasil penelitian dengan metode TEA

Analisis *Techno-Economic Analysis* (TEA) dilakukan untuk mengevaluasi kelayakan teknis dan ekonomi pembangunan proyek Bio-CNG berbasis POME di PT XYZ. Analisis TEA dalam penelitian ini tidak dimaksudkan untuk mengevaluasi karakteristik POME sebagai objek utama, melainkan untuk menilai kelayakan teknis dan ekonomi pembangunan unit pemurnian Bio-CNG berbasis bahan baku POME. POME hanya berfungsi sebagai *feedstock* yang menentukan kapasitas produksi biogas dan kontinuitas pasokan bahan baku, sedangkan objek analisis TEA tetap berfokus pada sistem pemurnian biogas yang dipilih melalui AHP, yaitu teknologi *Membrane Separation* (MS). Oleh karena itu, parameter yang dianalisis dalam TEA mencakup investasi unit *upgrading*, kompresor, penyimpanan, biaya operasi, efisiensi pemurnian, serta indikator kelayakan finansial (CAPEX, OPEX, NPV, IRR, dan *Payback Period*), bukan karakteristik POME itu sendiri. Perbandingan antaralternatif teknologi pemurnian telah dilakukan secara komprehensif pada tahap AHP, sedangkan TEA berfungsi sebagai evaluasi kelayakan ekonomi terhadap teknologi terbaik hasil seleksi tersebut. Dengan demikian, kedua metode memiliki fungsi yang saling melengkapi dan konsisten dengan metodologi penelitian, sehingga tidak terjadi pergeseran fokus dari unit operasi pemurnian Bio-CNG ke POME.

Analisis TEA berfokus pada sistem pemurnian biomethane yang dipilih melalui AHP, yaitu teknologi *Membrane Separation* (MS) saja, bukan membandingkan TEA untuk ketiga alternatif teknologi (*Membrane Separation*, *Pressure Swing Adsorption* dan *Water Scrubber*). Hal ini mengingat perbandingan antar alternatif teknologi pemurnian telah dilakukan secara komprehensif pada tahap AHP, sedangkan TEA berfungsi sebagai evaluasi kelayakan ekonomi terhadap teknologi terbaik hasil seleksi tersebut. Dengan demikian, kedua metode (AHP dan TEA) memiliki fungsi yang saling melengkapi dan konsisten dengan metodologi penelitian.

Selanjutnya hasil akhir analisis TEA dengan tiga skenario sensitivitas ketika terjadi fluktuasi harga solar industri, antara Rp 17.000/liter, Rp 20.000/liter, atau Rp 30.000/liter. Harga solar industri dipilih sebagai variabel dalam analisis sensitivitas TEA karena Bio-CNG yang dihasilkan dari POME pada dasarnya diproyeksikan sebagai *direct substitute* (pengganti langsung) bahan bakar solar yang digunakan pada kendaraan operasional, genset, dan peralatan industri di pabrik kelapa sawit. Dengan demikian, perubahan harga solar secara langsung memengaruhi besarnya penghematan biaya (*cost saving*) dan manfaat ekonomi yang diperoleh dari penggunaan Bio-CNG, sehingga berdampak signifikan terhadap indikator kelayakan investasi seperti NPV, IRR, dan *Payback Period*. Berbeda dengan komoditas lain, seperti CPO, batubara, atau gas alam, harga komoditas tersebut tidak memiliki hubungan langsung dengan pendapatan maupun penghematan yang dihasilkan oleh proyek Bio-CNG dalam studi ini. Oleh karena itu, penggunaan harga solar sebagai variabel sensitivitas merupakan pilihan yang paling relevan secara teknis dan ekonomis karena merepresentasikan kondisi pasar energi yang menjadi dasar pembentukan nilai ekonomi proyek serta menggambarkan risiko utama yang dihadapi apabila terjadi fluktuasi harga bahan bakar fosil.

Tabel 3 menyajikan hasil akhir analisis TEA dengan tiga skenario sensitivitas ketika terjadi fluktuasi harga solar industri, antara Rp 17.000/liter, Rp 20.000/liter, atau Rp 30.000/liter.

Table 3. Analisis Sensitivitas dengan Menggunakan Harga Solar Industri

Parameter	Sensitivity Analysis Parameters with Industrial Diesel Prices (per Liter)		
	IDR 17,000	IDR 20,000	IDR 30,000
Bio-CNG Equivalent Price (IDR/Nm ³)	14,450.00	17, 000.00	25,500.00
Annual Bio-CNG Production (Nm ³ /Year)	1,958,858.00	1,958,858.00	1,958,858.00
Annual Revenue (IDR/Year)	28,305,498,100.00	33,300,586,000.00	49,950,879,000.00
Annual OPEX (IDR/Year)	6,668,707,314.00	6,668,707,314.00	6,668,707,314.00
Net Cash Flow (IDR)	21,636,790,786.00	26,631,878,686.00	43,282,171,686.00
CAPEX (IDR)	96,897,378,749.50	96,897,378,749.50	96,897,378,749.50
Discount Rate (%)	0.10	0.10	0.10
Project Life (Years)	15.00	15.00	15.00
NPV (IDR)	67,673,772,230.00	105,666,807,584.00	232,310,051,251.00
IRR (%)	21.06	26.69	44.49
Payback Period (Years)	4.48	3.64	2.24
Break Even Point (BEP)	461,400.00	392,277.00	261,518.00

Hasil analisis pada Tabel 3 menunjukkan bahwa proyek memiliki potensi teknis yang sangat baik karena ketersediaan bahan baku POME yang stabil dari aktivitas pengolahan di pabrik kelapa sawit [18]. Debit POME yang tinggi memungkinkan kontinuitas produksi biogas sehingga mendukung operasional pabrik Bio-CNG secara berkelanjutan. Selain itu, kandungan COD dan BOD yang tinggi pada POME memberikan potensi produksi metana yang signifikan melalui proses *anaerobic digestion*.

Dari sisi teknis, penerapan teknologi pemurnian biogas dengan *Membrane Separation* mampu menghasilkan Bio-CNG dengan kemurnian metana di atas 90%, sehingga memenuhi spesifikasi Bio-CNG sebagai bahan bakar alternatif [19]. Sistem pemurnian biogas juga menunjukkan efisiensi pemisahan yang tinggi dengan tingkat kehilangan metana yang relatif rendah dibandingkan teknologi lainnya. Hasil ini memperlihatkan bahwa teknologi yang dipilih mampu mendukung stabilitas kualitas produk sekaligus meningkatkan efisiensi energi pada proses produksi.

Analisis ekonomi menunjukkan bahwa komponen *Capital Expenditure* (CAPEX) terbesar berasal dari pembangunan digester anaerobik, unit upgrading biomethane, kompresor gas, dan sistem penyimpanan bertekanan tinggi [5]. Meskipun investasi awal proyek tergolong besar, biaya operasional tahunan relatif lebih rendah karena sebagian kebutuhan energi internal dapat dipenuhi dari pemanfaatan biogas itu sendiri. Kondisi ini memberikan keuntungan ekonomis jangka panjang dan mengurangi ketergantungan

perusahaan terhadap bahan bakar fosil. Tabel 4 berikut menyajikan sensitivitas dan implikasi dari peningkatan harga solar industri.

Table 4. Sensitivitas dan Implikasi Kenaikan Harga Solar Industri

Indikator	Kenaikan Harga Solar Industri per Liter			Sensivitas & Implikasi
	Rp 17.000	Rp 20.000	Rp 30.000	
NPV (<i>Net Present Value</i>)	Rp 67,6 Miliar	Rp 105,6 Miliar	Rp 232,3 Miliar	Nilai proyek meningkat lebih dari tiga kali lipat pada harga tertinggi.
IRR (<i>Internal Rate of Return</i>)	21,06%	26,69%	44,49%	Efisiensi pengembalian modal meningkat dua kali lipat, jauh di atas <i>Discount Rate</i> (10%).
<i>Payback Period</i> (PBP)	4,48 Tahun	3,64 Tahun	2,24 Tahun	Waktu pengembalian modal menjadi sangat cepat (hanya sekitar dua tahun tiga bulan).

Perhitungan indikator finansial menunjukkan bahwa proyek Bio-CNG PT XYZ memiliki nilai *Net Present Value* (NPV) positif, *Internal Rate of Return* (IRR) di atas tingkat diskonto perusahaan, serta *Payback Period* yang berada dalam rentang layak investasi [9]. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proyek tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga memberikan profitabilitas yang menarik bagi perusahaan. Pendapatan utama proyek berasal dari substitusi penggunaan solar dan potensi penjualan Bio-CNG untuk kebutuhan transportasi maupun industri.

Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa harga jual Bio-CNG dan efisiensi produksi metana merupakan variabel yang paling memengaruhi profitabilitas proyek [6]. Penurunan harga energi fosil atau berkurangnya efisiensi upgrading dapat menyebabkan penurunan nilai NPV dan IRR secara signifikan. Sebaliknya, adanya insentif karbon dan kebijakan energi terbarukan berpotensi meningkatkan daya tarik investasi proyek Bio-CNG. Oleh karena itu, dukungan regulasi pemerintah menjadi faktor penting dalam memperkuat keberlanjutan finansial proyek energi berbasis biomassa.

Secara keseluruhan, hasil TEA menunjukkan bahwa pengembangan Bio-CNG berbasis POME di PT XYZ layak diterapkan sebagai strategi dekarbonisasi industri kelapa sawit sekaligus diversifikasi energi perusahaan. Selain memberikan manfaat ekonomi melalui penghematan bahan bakar dan potensi pendapatan tambahan, proyek ini juga mendukung peningkatan citra perusahaan sebagai industri yang berorientasi pada keberlanjutan [8]. Dengan demikian, implementasi Bio-CNG memiliki prospek yang kuat untuk direplikasi pada pabrik kelapa sawit lainnya di Indonesia.

3.4 Diskusi

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pendekatan interdisiplin manajemen dan teknologi memberikan kontribusi penting dalam pengembangan proyek Bio-CNG berbasis *Palm Oil Mill Effluent* (POME) pada industri kelapa sawit. Integrasi metode *Analytical*

Hierarchy Process (AHP), dan *Techno-Economic Analysis* (TEA), memungkinkan evaluasi proyek dilakukan secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan konvensional yang hanya berfokus pada satu aspek tertentu [14]. Pendekatan ini memperlihatkan bahwa keberhasilan implementasi teknologi energi terbarukan tidak hanya ditentukan oleh performa teknis, tetapi juga dipengaruhi oleh kelayakan ekonomi dan dampak lingkungan jangka panjang.

Hasil analisis *Analytical Hierarchy Process* (AHP) menunjukkan bahwa teknologi *Membrane Separation* (MS) menjadi alternatif paling optimal dibandingkan *Pressure Swing Adsorption* (PSA) dan *Water Scrubber* (WS). Temuan ini sejalan dengan penelitian Kim dkk. yang menyatakan bahwa teknologi membran memiliki efisiensi pemisahan metana tinggi dan kebutuhan energi lebih rendah dibandingkan teknologi upgrading lainnya [23]. Dalam konteks industri kelapa sawit, efisiensi tersebut menjadi penting karena menentukan kualitas biomethane yang dihasilkan sekaligus memengaruhi profitabilitas proyek secara keseluruhan.

Dominasi kriteria *methane purity* dan *methane loss* dalam hasil *Analytical Hierarchy Process* (AHP) menunjukkan bahwa aspek efisiensi energi menjadi pertimbangan utama dalam pemilihan teknologi upgrading. Tingginya kadar metana pada biomethane akan meningkatkan kualitas Bio-CNG sebagai bahan bakar alternatif, sedangkan rendahnya kehilangan metana selama proses upgrading dapat menekan emisi fugitive methane yang berkontribusi besar terhadap pemanasan global [24]. Temuan ini memperkuat argumentasi bahwa pengembangan teknologi energi terbarukan harus mempertimbangkan keseimbangan antara performa teknis dan keberlanjutan lingkungan.

Pada sisi lain, hasil penelitian menunjukkan bahwa teknologi *Pressure Swing Adsorption* tetap memiliki keunggulan dari aspek *Technology Readiness Level* (TRL). Tingginya tingkat kematangan teknologi *Pressure Swing Adsorption* menunjukkan bahwa teknologi tersebut lebih siap untuk diterapkan secara komersial dalam skala besar [25]. Namun demikian, tingginya kehilangan metana dan kebutuhan energi operasional menyebabkan teknologi ini kurang unggul dibandingkan sistem membran dalam konteks keberlanjutan jangka panjang.

Teknologi *Water Scrubber* menunjukkan performa yang cukup baik dari aspek operasional dan biaya pemeliharaan. Akan tetapi, kebutuhan air yang tinggi menjadi kendala utama dalam implementasi jangka panjang, khususnya pada wilayah yang memiliki keterbatasan sumber daya air [26]. Dalam perspektif keberlanjutan industri, tingginya *water footprint* dapat menimbulkan tekanan tambahan terhadap lingkungan sehingga menurunkan nilai keberlanjutan proyek secara keseluruhan.

Temuan penelitian ini memperlihatkan bahwa metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) efektif digunakan sebagai alat pengambilan keputusan multikriteria dalam pemilihan teknologi upgrading biomethane. Pendekatan ini memungkinkan perusahaan mengevaluasi berbagai parameter teknis, ekonomi, dan lingkungan secara simultan sehingga menghasilkan keputusan yang lebih objektif [16]. Penggunaan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) juga relevan untuk mendukung strategi manajemen energi pada industri yang sedang melakukan transisi menuju sistem produksi rendah karbon.

Hasil analisis *Techno-Economic Analysis* (TEA) menunjukkan bahwa proyek Bio-CNG berbasis POME di PT XYZ memiliki tingkat kelayakan ekonomi yang baik. Nilai *Net Present Value* (NPV) positif dan *Internal Rate of Return* (IRR) yang berada di atas tingkat diskonto perusahaan menunjukkan bahwa proyek mampu memberikan keuntungan finansial dalam jangka panjang [19]. Temuan ini mengindikasikan bahwa pemanfaatan limbah cair kelapa sawit sebagai sumber energi tidak hanya memberikan manfaat lingkungan, tetapi juga menciptakan nilai ekonomi yang signifikan.

Besarnya nilai investasi awal pada pembangunan digester anaerobik dan unit upgrading menjadi tantangan utama dalam implementasi proyek Bio-CNG. Kondisi ini sesuai dengan penelitian Agrawal dan Singh yang menyatakan bahwa proyek biomethane umumnya membutuhkan biaya investasi awal yang tinggi akibat penggunaan teknologi upgrading dan infrastruktur penyimpanan gas bertekanan tinggi [18]. Namun demikian, biaya operasional yang relatif rendah serta potensi penghematan energi jangka panjang mampu meningkatkan daya tarik investasi proyek.

Hasil sensitivitas pada analisis *Techno-Economic Analysis* (TEA) memperlihatkan bahwa harga jual Bio-CNG dan efisiensi produksi metana merupakan faktor paling berpengaruh terhadap profitabilitas proyek. Hal ini menunjukkan bahwa stabilitas pasar energi terbarukan dan dukungan kebijakan pemerintah memiliki peran penting dalam keberlanjutan investasi Bio-CNG [27]. Kebijakan seperti insentif karbon, subsidi energi hijau, dan perdagangan karbon dapat meningkatkan nilai ekonomi proyek sekaligus mempercepat adopsi teknologi energi terbarukan di sektor industri.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa pemanfaatan POME sebagai bahan baku Bio-CNG mendukung konsep ekonomi sirkular pada industri kelapa sawit. Limbah cair yang sebelumnya menjadi sumber pencemar lingkungan diubah menjadi energi terbarukan bernilai ekonomi tinggi [28]. Pendekatan ini memperlihatkan bahwa strategi pengelolaan limbah berbasis teknologi dapat menciptakan efisiensi sumber daya sekaligus meningkatkan keberlanjutan industri.

Hasil penelitian ini memperlihatkan bahwa integrasi metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dan TEA, memberikan pendekatan evaluasi yang lebih komprehensif dibandingkan penggunaan satu metode tunggal. *Analytical Hierarchy Process* (AHP) berperan dalam menentukan teknologi terbaik, sedangkan *Techno-Economic Analysis* (TEA) mengevaluasi kelayakan ekonomi proyek [20]. Kombinasi kedua metode tersebut menghasilkan kerangka analisis yang kuat untuk mendukung pengambilan keputusan strategis dalam pengembangan energi terbarukan.

Secara umum, hasil penelitian menunjukkan bahwa pengembangan Bio-CNG berbasis POME memiliki prospek besar untuk mendukung dekarbonisasi industri kelapa sawit di Indonesia. Selain memberikan manfaat ekonomi dan lingkungan, proyek ini juga mendukung target *Net Zero Emission* serta transisi menuju industri rendah karbon [32]. Dengan dukungan kebijakan pemerintah dan peningkatan investasi teknologi hijau, implementasi Bio-CNG berpotensi menjadi salah satu solusi strategis dalam pengembangan energi terbarukan nasional.

Meskipun penelitian ini menggunakan PT XYZ sebagai studi kasus, hasil penelitian tidak terbatas hanya pada perusahaan tersebut. Kerangka pengambilan keputusan yang mengintegrasikan *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dan *Techno-Economic Analysis* (TEA) bersifat generik dan dapat diterapkan pada perusahaan kelapa sawit lain yang memiliki karakteristik serupa, yaitu menghasilkan POME dalam jumlah memadai, memiliki fasilitas penangkapan biogas (*methane capture*) atau potensi pengembangannya, serta berorientasi pada pemanfaatan biomethane sebagai substitusi bahan bakar fosil. Dengan demikian, yang bersifat spesifik adalah nilai parameter teknis dan ekonominya, sedangkan pendekatan analisis dan proses pengambilan keputusannya dapat direplikasi dan diadaptasi pada perusahaan lain dengan melakukan penyesuaian terhadap kapasitas produksi, karakteristik POME, dan kondisi ekonomi setempat.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi AHP dan TEA dapat digunakan sebagai sequential decision framework untuk mendukung pemilihan teknologi dan evaluasi kelayakan proyek Bio-CNG berbasis POME. AHP berperan dalam memilih teknologi biogas upgrading yang paling sesuai berdasarkan kriteria teknis, ekonomi, dan lingkungan, sedangkan TEA digunakan untuk menilai kelayakan ekonomi teknologi terpilih. Dengan pendekatan ini, keputusan manajerial tidak hanya didasarkan pada ranking teknologi, tetapi juga pada kelayakan investasi yang lebih terukur.

Hasil penelitian menempatkan Membrane Separation sebagai teknologi prioritas dalam konteks proyek Bio-CNG PT XYZ. Evaluasi TEA terhadap teknologi terpilih menunjukkan bahwa proyek memiliki prospek kelayakan ekonomi berdasarkan indikator NPV, IRR, dan payback period. Namun, kelayakan tersebut tetap dipengaruhi oleh asumsi harga energi, kapasitas produksi, kebutuhan investasi, efisiensi proses, dan kepastian pemanfaatan Bio-CNG. Oleh karena itu, rekomendasi implementasi perlu diposisikan sebagai keputusan berbasis kondisi, bukan sebagai generalisasi mutlak untuk seluruh industri.

Secara akademis, kontribusi utama penelitian ini adalah penyusunan kerangka evaluasi yang menghubungkan pemilihan teknologi dengan validasi keekonomian proyek. Secara praktis, kerangka ini dapat membantu manajemen perusahaan kelapa sawit dalam menyaring alternatif teknologi, menilai bankability proyek, dan merancang strategi implementasi Bio-CNG berbasis data. Penelitian lanjutan disarankan untuk memperluas analisis pada perbandingan harga LPG dan LNG, comparative TEA antar teknologi upgrading, serta kajian LCA penuh dengan functional unit, system boundary, inventory data, dan perangkat lunak LCA yang sesuai.

4. Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Prof. Dr. Ir. Tri Widjaja, M.Eng selaku pembimbing akademik atas arahan, masukan, dan dukungan yang diberikan selama proses penelitian dan penulisan artikel ini. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada para dosen di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya

yang telah memberikan kontribusi keilmuan, wawasan akademik, serta motivasi dalam penyusunan penelitian ini. Selain itu, apresiasi yang setinggi-tingginya diberikan kepada seluruh narasumber yang telah meluangkan waktu, memberikan informasi, serta mendukung kelancaran proses pengumpulan data penelitian ini.

Referensi

- [1] Gunawan R, dkk. Biogas upgrading technologies for biomethane production: A review. *Renew Sustain Energy Rev.* 2021;145:111115.
- [2] Swinbourn G. Advances in biogas upgrading systems and biomethane utilization. *Energy Convers Manag.* 2023;278:116673.
- [3] Mar K, dkk. Methane emissions and global warming implications from palm oil mill effluent treatment systems. *J Clean Prod.* 2022;345:131067.
- [4] Viñuales JE, dkk. The Paris Agreement and the transition toward low-carbon economies. *Climate Policy.* 2017;17(4):507–18.
- [5] Febijanto I, dkk. Techno-enviro-economic assessment of Bio-CNG production from POME for transportation sector in Indonesia. *Energy Reports.* 2024;10:1124–38.
- [6] Sodri A, Septriana I. Renewable energy potential from palm oil mill effluent in Indonesia. *Renew Energy Focus.* 2022;41:12–20.
- [7] Ng DKS, dkk. Multi-objective optimization of biomethane production from palm oil mill effluent. *Process Saf Environ Prot.* 2023;172:450–62.
- [8] Hasanudin U, Haryanto A. Environmental impact evaluation of palm oil mill effluent recycling system. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci.* 2018;141:012038.
- [9] Tan WE, dkk. Life cycle assessment and techno-economic analysis in anaerobic co-digestion systems: A review. *Bioresour Technol.* 2021;330:124998.
- [10] Osman M, dkk. Environmental sustainability assessment of renewable energy systems using LCA approach. *Sustainability.* 2023;15(7):5841.
- [11] Kim J, dkk. Multi-criteria decision making for biomethane upgrading technology selection. *Energy Strategy Rev.* 2022;40:100812.
- [12] Farahdiba AU. Gate-to-grave life cycle assessment in industrial environmental management. *J Ecol Eng.* 2022;23(6):145–56.
- [13] Suhariyanto TT, dkk. Life cycle assessment implementation in Indonesian manufacturing industries. *Heliyon.* 2023;9(5):e15824.
- [14] Saaty TL. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int J Serv Sci.* 2008;1(1):83–98.
- [15] Saaty TL. *The Analytic Hierarchy Process.* New York: McGraw-Hill; 1980.
- [16] Ishizaka A, Labib A. Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Syst Appl.* 2011;38(11):14336–45.
- [17] Ng WY, dkk. Techno-economic assessment of biomethane production from agricultural waste. *Renew Energy.* 2022;189:817–29.
- [18] Agrawal A, Singh R. Techno-economic feasibility analysis of Bio-CNG projects from agro-industrial waste. *Energy Convers Manag.* 2023;276:116544.

- [19] Blank L, Tarquin A. Engineering Economy. 8th ed. New York: McGraw-Hill Education; 2018.
- [20] ISO. ISO 14040: Environmental Management—Life Cycle Assessment—Principles and Framework. Geneva: International Organization for Standardization; 2006.
- [21] Putri D, dkk. Comparative assessment of biomethane purification technologies in Southeast Asia. *J Clean Prod.* 2025;412:137221.
- [22] Saaty TL, Vargas LG. Models, methods, concepts and applications of the analytic hierarchy process. Boston: Springer; 2012.
- [23] Kim J, Lee S, Park Y. Performance comparison of membrane separation and Pressure Swing Adsorption for biomethane upgrading. *Renew Energy.* 2022;182:1123–1134.
- [24] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Cambridge: Cambridge University Press; 2021.
- [25] Petersson A, Wellinger A. *Biogas Upgrading Technologies – Developments and Innovations*. Paris: IEA Bioenergy; 2020.
- [26] Ryckebosch E, Drouillon M, Vervaeren H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass Bioenergy.* 2011;35(5):1633–1645.
- [27] International Energy Agency (IEA). *Outlook for Biogas and Biomethane: Prospects for Organic Growth*. Paris: IEA; 2022.
- [28] Geissdoerfer M, Savaget P, Bocken NMP, Hultink EJ. The circular economy – A new sustainability paradigm? *J Clean Prod.* 2017;143:757–768.
- [29] Mar MM, Nga TT, Lim JS. Greenhouse gas mitigation from palm oil mill effluent through methane capture technology. *J Environ Manage.* 2022;315:115104.
- [30] Poeschl M, Ward S, Owende P. Environmental impacts of biogas deployment – Part II: Life cycle assessment of multiple production and utilization pathways. *J Clean Prod.* 2012;24:184–201.
- [31] Ahmad AL, Ismail S, Bhatia S. Water recycling from palm oil mill effluent using membrane technology. *Desalination.* 2003;157(1–3):87–95.
- [32] Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia. *Indonesia Energy Transition and Net Zero Emission Roadmap 2060*. Jakarta: MEMR; 2023.