JIMT: Jurnal Ilmu Manajemen Terapan
E-ISSN: 2686-4924
P-ISSN: 2686-5246
https://dinastirev.org/JIMT dinasti.info@gmail.com +62 811 7404 455
DOI: https://doi.org/10.38035/jimt.v7i6
https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Multi Criteria Decision Making (MCDM) untuk Pemilihan Alternatif Proyek Skema SKD: Studi Kasus Perusahaan Manufaktur di Indonesia

Faridzky Adhi Baskara[1], Udisubakti Ciptomulyono[2]
[1]Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia, faridzkyab@gmail.com.
[2]Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia

Corresponding Author: faridzkyab@gmail.com[1]

Abstract: *Climate change has encouraged the automotive industry to develop low-emission vehicles through the implementation of advanced technologies and sustainable manufacturing systems. One of these initiatives is Project 1*5D, a low-emission vehicle assembly project based on the Semi Knocked Down (SKD) scheme with a targeted Local Content Requirement (Tingkat Komponen Dalam Negeri – TKDN) of 40%. In this project, selecting the most appropriate assembly line and final test locations represents a multi-criteria decision-making problem that requires simultaneous consideration of various technical and operational aspects. This study aims to determine the optimal assembly line and final test location for Project 1*5D using a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) approach through the integration of the Analytical Hierarchy Process (AHP) and the Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE). AHP was employed to determine the relative importance of each criterion based on expert judgments, while PROMETHEE was applied to evaluate and rank the available alternatives. The evaluation criteria consisted of Driving Range, Vehicle Quality, MP Management, Cost, Equipment/Layout Modification, Part Handling, and Space Availability. Data were collected through literature review, field observations, and expert questionnaires. The analysis included AHP weighting, PROMETHEE II ranking, and sensitivity analysis to evaluate the robustness of the decision model. The results indicate that Vehicle Quality is the most influential criterion with a weight of 0.278, followed by MP Management (0.205) and Cost (0.176). Based on the PROMETHEE II analysis, Option 2B (Pilot Line Log#2) achieved the highest net flow value (0.318) and was therefore selected as the best alternative. Furthermore, the sensitivity analysis demonstrated that changes of up to ±15% in the weight of the Vehicle Quality criterion did not affect the ranking order, indicating that the proposed decision model is robust and stable. The proposed model can serve as a decision-support tool for selecting manufacturing project locations involving multiple evaluation criteria in a systematic and objective manner.*

Keywords: *Automotive industry, Multi-Criteria Decision Making (MCDM), Analytical Hierarchy Process (AHP), PROMETHEE II, Project 1*5D*

Abstrak: Perubahan iklim mendorong industri otomotif untuk mengembangkan kendaraan rendah emisi melalui penerapan teknologi dan sistem manufaktur yang lebih berkelanjutan. Salah satu upaya tersebut diwujudkan melalui Project 1*5D, yaitu proyek perakitan kendaraan rendah emisi dengan skema *Semi Knocked Down* (SKD) dan target Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN) sebesar 40%. Dalam implementasinya, pemilihan lokasi *assembly line* dan *final test* menjadi permasalahan pengambilan keputusan multikriteria yang harus mempertimbangkan berbagai aspek teknis dan operasional secara bersamaan. Penelitian ini bertujuan menentukan alternatif lokasi *assembly line* dan *final test* terbaik pada Project 1*5D menggunakan pendekatan *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM) melalui integrasi metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP) dan *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (PROMETHEE). Metode AHP digunakan untuk menentukan bobot kepentingan setiap kriteria berdasarkan penilaian para ahli, sedangkan metode PROMETHEE digunakan untuk mengevaluasi dan memeringkat alternatif berdasarkan bobot tersebut. Kriteria yang digunakan meliputi *Driving Range*, *Vehicle Quality*, *MP Management*, *Cost*, *Equipment/Layout Modification*, *Part Handling*, dan *Space Availability*. Data penelitian diperoleh melalui studi literatur, observasi lapangan, dan penyebaran kuesioner kepada responden ahli. Analisis dilakukan melalui pembobotan AHP, pemeringkatan menggunakan PROMETHEE II, serta analisis sensitivitas untuk menguji kestabilan hasil. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *Vehicle Quality* merupakan kriteria dengan bobot tertinggi sebesar 0,278, diikuti oleh MP *Management* sebesar 0,205 dan *Cost* sebesar 0,176. Berdasarkan hasil analisis PROMETHEE II, Option 2B (Pilot Line Log#2) memperoleh nilai *net flow* tertinggi sebesar 0,318, sehingga dipilih sebagai alternatif terbaik. Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa perubahan bobot kriteria *Vehicle Quality* hingga ±15% tidak mengubah urutan peringkat alternatif, yang mengindikasikan bahwa model pengambilan keputusan yang diusulkan memiliki tingkat kestabilan yang baik. Model yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam pemilihan lokasi proyek manufaktur otomotif yang melibatkan berbagai kriteria secara sistematis dan objektif.

Kata kunci: Industri otomotif, *Multi-Criteria Decision Making* (MCDM), *Analytical Hierarchy Process* (AHP), PROMETHEE II, Project 1*5D

PENDAHULUAN

Dalam beberapa dekade terakhir, perubahan iklim dan pemanasan global telah menjadi isu krusial yang menuntut transformasi mendasar di berbagai sektor industri. Sektor transportasi, khususnya industri otomotif, merupakan salah satu kontributor terbesar terhadap emisi gas rumah kaca yang berdampak langsung pada peningkatan suhu bumi (Deng & Ma, 2024). Oleh karena itu, upaya mencapai netralitas karbon menjadi agenda strategis utama bagi banyak negara dan perusahaan otomotif global.

Netralitas karbon dalam industri otomotif mengacu pada pencapaian nol emisi karbon di seluruh siklus hidup kendaraan, mulai dari proses manufaktur, pengiriman, penggunaan, hingga daur ulang (Cheng, Yao, & Wang, 2023). Produsen otomotif dunia berupaya mencapai target tersebut paling lambat tahun 2050 melalui berbagai strategi dekarbonisasi. Salah satu strategi yang banyak diadopsi adalah *multi-pathway approach*, yang melibatkan pengembangan kendaraan elektrifikasi seperti Hybrid Electric Vehicle (HEV), Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV), dan Battery Electric Vehicle (BEV), serta penggunaan bahan bakar nabati dan peningkatan efisiensi energi kendaraan konvensional (Bogdoll et al., 2023). Selain inovasi produk, optimalisasi proses produksi juga menjadi langkah penting untuk menekan emisi dari sisi manufaktur (Vitta, 2021).

Namun demikian, transisi menuju sistem produksi rendah emisi tidak terlepas dari berbagai kendala operasional. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa efisiensi karbon tidak

hanya ditentukan oleh teknologi kendaraan, tetapi juga oleh strategi operasional dan tata letak fasilitas produksi (Wang et al., 2022). Produksi dalam skala kecil dengan waktu persiapan yang terbatas berpotensi menimbulkan ketidakefisienan, keterlambatan jadwal, serta peningkatan biaya logistik. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi suatu proyek tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis, tetapi juga oleh ketepatan dalam menentukan keputusan strategis yang mampu mengoptimalkan berbagai sumber daya yang tersedia.

Di Indonesia, komitmen menuju netralitas karbon nasional pada tahun 2060 mendorong industri otomotif untuk menghadirkan solusi kendaraan rendah emisi sekaligus meningkatkan Tingkat Komponen Dalam Negeri (TKDN). Salah satu implementasi konkret dilakukan melalui Project 1*5D, yaitu proyek perakitan kendaraan rendah emisi dengan skema Semi Knocked Down (SKD) dan target TKDN sebesar 40%. Meskipun inovatif, proyek ini menghadapi tiga tantangan utama, yaitu lead time implementasi yang terbatas, volume produksi yang rendah sekitar 100 unit per tahun, dan penerapan skema SKD yang baru pertama kali dilakukan. Tantangan tersebut semakin kompleks dengan adanya keterbatasan kapasitas jalur produksi serta perbedaan karakteristik antar plant, di mana Plant #1 ditujukan untuk kendaraan besar dan Plant #2 untuk kendaraan kecil. Kondisi ini menimbulkan ketidakpastian dalam penentuan lokasi optimal untuk proses assembly line dan final test.

Penentuan lokasi *assembly line* dan *final test* pada Project 1*5D merupakan permasalahan pengambilan keputusan yang kompleks karena perusahaan dihadapkan pada beberapa alternatif implementasi yang masing-masing memiliki karakteristik, keunggulan, dan keterbatasan yang berbeda. Setiap alternatif menawarkan konsekuensi yang berbeda terhadap pelaksanaan proyek, sehingga tidak terdapat satu alternatif yang secara mutlak unggul pada seluruh aspek. Sebagai contoh, suatu alternatif dapat memberikan kebutuhan investasi yang lebih rendah, namun memerlukan penyesuaian fasilitas yang lebih besar. Di sisi lain, alternatif yang lebih menguntungkan dari sisi operasional belum tentu memberikan efisiensi biaya maupun kemudahan implementasi. Selain itu, karakteristik Project 1*5D yang memiliki volume produksi relatif rendah dengan target implementasi yang terbatas menuntut agar pelaksanaan proyek tidak mengganggu proses produksi kendaraan yang sedang berjalan. Kondisi tersebut menciptakan berbagai *trade-off* yang harus dipertimbangkan secara bersamaan dalam proses pengambilan keputusan. Kompleksitas tersebut menunjukkan bahwa penentuan alternatif implementasi tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan satu indikator maupun pertimbangan subjektif. Pengambilan keputusan harus mempertimbangkan berbagai aspek yang saling memengaruhi dengan tingkat kepentingan yang berbeda-beda, serta mengintegrasikan informasi yang berasal dari data kuantitatif hasil *feasibility study* dan penilaian kualitatif para ahli. Oleh karena itu, diperlukan suatu pendekatan pengambilan keputusan multikriteria yang mampu memberikan pembobotan terhadap setiap aspek sesuai tingkat kepentingannya sekaligus mengevaluasi dan memeringkat setiap alternatif secara sistematis, objektif, dan terukur. Pendekatan tersebut diharapkan mampu menghasilkan alternatif implementasi yang paling sesuai dengan kebutuhan Project 1*5D serta mendukung pencapaian target proyek secara efektif dan efisien.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode *Multi Criteria Decision Making* (*MCDM*) melalui integrasi *Analytical Hierarchy Process* (*AHP*) dan *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation* (*PROMETHEE*) untuk menentukan lokasi optimal fasilitas manufaktur pada proyek strategis perusahaan manufaktur otomotif di Indonesia. Penelitian dilaksanakan di lingkungan perusahaan manufaktur otomotif pada proyek pengembangan fasilitas produksi baru (*Project New Line/Project 1*5D*). Populasi penelitian meliputi seluruh pihak yang terlibat dalam pengambilan keputusan proyek, sedangkan sampel penelitian terdiri atas praktisi dan pengambil keputusan dari fungsi *engineering*, produksi, *quality*, logistik, perencanaan fasilitas, manajer proyek, kepala divisi,

supervisor, serta *user* yang dipilih berdasarkan keterlibatan dan pengalaman dalam proyek. Instrumen penelitian berupa lembar observasi, pedoman wawancara semi-terstruktur, serta kuesioner *pairwise comparison* menggunakan skala Saaty untuk pembobotan kriteria. Teknik pengumpulan data dilakukan melalui studi literatur, observasi lapangan, penyebaran kuesioner, dan *in-depth interview*. Teknik analisis data meliputi penentuan bobot kriteria menggunakan metode *AHP*, pengurutan alternatif menggunakan metode *PROMETHEE*, serta analisis sensitivitas untuk menguji kestabilan hasil pemeringkatan sehingga diperoleh rekomendasi lokasi terbaik bagi implementasi fasilitas manufaktur.

HASIL DAN PEMBAHASAN

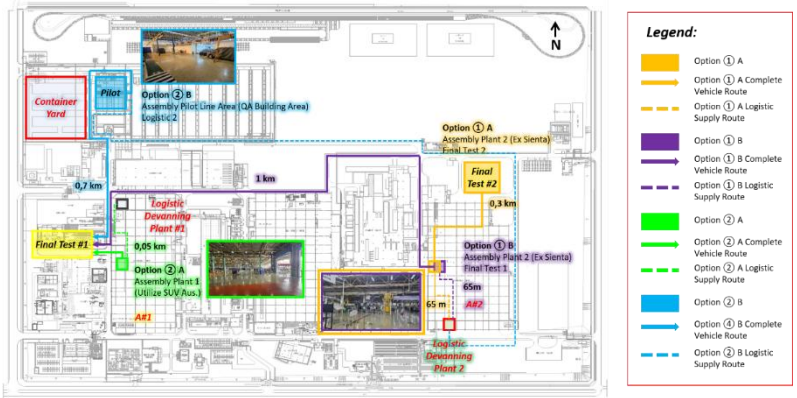
Data Alternatif

Penelitian ini mengevaluasi empat alternatif lokasi *assembly line* baru pada *area Final Assembly* yang telah ditentukan oleh pihak manajemen berdasarkan kondisi fasilitas dan kesiapan area produksi. Masing-masing alternatif memiliki karakteristik yang berbeda dari sisi jarak perpindahan kendaraan, kebutuhan modifikasi fasilitas, sistem part handling, serta ketersediaan ruang produksi.

Tabel 1 dan gambar 1 menunjukkan daftar alternatif lokasi assembly line yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Daftar Alternatif Lokasi Assembly Line

Kode Alternatif	Nama Alternatif	Deskripsi Singkat
A1	*Option 1A – Assy #2 (Ex Sienta), FT#2*	Menggunakan area eksisting Assy #2 dengan konsep *mini line*, memiliki jarak ke Final Test ±0,3 km, part handling ±65 m, dan kebutuhan biaya sebesar 27,98 miliar IDR dengan ketersediaan ruang 1.074 m².
A2	*Option 1B – Assy #2 (Ex Sienta), FT#1*	Berlokasi di area Assy #2 dengan koneksi ke FT#1. Memiliki jarak lebih panjang (±1,0 km) sehingga berpotensi meningkatkan kebutuhan inspeksi tambahan serta beban logistik.
A3	*Option 2A – Assy #1 Building*	Memanfaatkan bangunan Assy #1 yang tersedia 20 m² ruang tambahan. Membutuhkan penataan ulang fasilitas, tetapi memungkinkan integrasi proses yang lebih stabil.
A4	*Option 2B – Pilot Line, Log. #2*	Lokasi *pilot line* dengan jarak ±0,7 km. Memiliki ruang 1.076 m², menjadi alternatif paling luas. Namun membutuhkan *interplant truck* untuk perpindahan part.



Gambar 1. Total Layout Alternatif

Keempat alternatif tersebut memiliki perbedaan pada aspek layout, jarak antar fasilitas, kebutuhan modifikasi, sistem logistik, dan ketersediaan ruang produksi. Perbedaan tersebut mempengaruhi tingkat kemudahan implementasi, efisiensi operasional, serta potensi gangguan terhadap existing production.

Selanjutnya, seluruh alternatif dievaluasi berdasarkan tujuh kriteria utama, yaitu *Driving Range*, *Vehicle Quality*, MP *Management*, *Cost*, *Equipment & Layout Modification*, *Part Handling*, dan *Space Availability* menggunakan metode AHP dan PROMETHEE II.

Data Nilai Alternatif pada Setiap Kriteria

Tabel 2. Nilai Alternatif pada Setiap Kriteria

Alternatif	*Driving Range* (km)	*Vehicle Quality* (1-5)	*MP Management* (Total MP)	*Cost* (Miliar)	*Equip/Layout Modif* (1-5)	*Part handling* (m)	*Space* (m^2)
A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2)	0.3	4	10	27.98	3	65	1074
A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1)	1.0	3	10	22.58	4	55	954
A3 - Option 2A (Assy #1 Building)	0.3	4	12	34.35	2	135	20
A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2)	0.7	5	6	22.57	5	110	1076

Keterangan Arah Preferensi:

Driving Range	:	Cost criterion
Vehicle Quality	:	Benefit criterion
MP Management	:	Cost criterion
Cost	:	Cost criterion
Equipment/Layout Modification	:	Benefit criterion
Part handling	:	Cost criterion
Space Availability	:	Benefit criterion

Berdasarkan data pada Tabel 2, masing-masing alternatif memiliki keunggulan dan keterbatasan pada kriteria tertentu. A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2) dan A3 - Option 2A (Assy #1 Building) memiliki driving range lebih pendek sehingga perpindahan kendaraan menuju *Final Test* lebih dekat. A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1) dan A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) memiliki kebutuhan biaya implementasi yang lebih rendah dibandingkan alternatif lainnya. Dari sisi kualitas dan kesiapan fasilitas, A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) menunjukkan kondisi paling baik dengan nilai *Vehicle Quality*, *Equipment*/*Layout Modification*, dan *Space Availability* tertinggi.

Pada aspek operasional, A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2) dan A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1) memiliki sistem part handling yang lebih sederhana karena berada dalam area produksi yang lebih terintegrasi. Sementara itu, A3 - Option 2A (Assy #1 Building) memiliki keterbatasan area produksi dan kebutuhan *manpower* yang lebih tinggi dibandingkan alternatif lain.

Perbedaan karakteristik tersebut menunjukkan bahwa tidak terdapat satu alternatif yang unggul pada seluruh kriteria. Oleh karena itu, evaluasi dilakukan menggunakan pendekatan multikriteria melalui integrasi metode AHP dan PROMETHEE II untuk menentukan alternatif lokasi assembly line yang paling sesuai dengan kebutuhan operasional perusahaan.

Decision Matrix Awal

Tabel 3. *Decision Matrix* Awal (*Matrix of Alternatives vs. Criteria*)

Alternatif	C1: *Driving Range* (km)	C2: *Vehicle Quality* (1–5)	C3: MP *Management* (Total MP)	C4: *Cost* (Miliar IDR)	C5: *Equip/Layout Modif* (1-5)	C6: *Part Handling* (m)	C7: *Space* (m^2)
A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2)	0.3	4	10	27.98	3	65	1074
A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1)	1.0	3	10	22.58	4	55	954
A3 - Option 2A (Assy #1 Building)	0.3	4	12	34.35	2	135	20
A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2)	0.7	5	6	22.57	5	110	1076

Berdasarkan Tabel 3, terlihat bahwa masing-masing alternatif memiliki karakteristik yang berbeda pada setiap kriteria. A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2) dan A3 - Option 2A (Assy #1 Building) memiliki driving range lebih pendek, sedangkan A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1) dan A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) memiliki kebutuhan biaya implementasi lebih rendah. Dari sisi kualitas, kesiapan fasilitas, dan ketersediaan area produksi, A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) menunjukkan kondisi paling baik dibandingkan alternatif lainnya.

Decision matrix ini selanjutnya digunakan sebagai input utama dalam proses pembobotan kriteria menggunakan metode AHP dan perhitungan preferensi alternatif menggunakan metode PROMETHEE II.

Pembobotan Kriteria Menggunakan AHP

Proses pembobotan dilakukan menggunakan *pairwise comparison* berdasarkan penilaian expert yang terlibat dalam perencanaan fasilitas produksi dan pengembangan *assembly line* di perusahaan. Penilaian dilakukan menggunakan skala AHP 1–9 untuk membandingkan tingkat kepentingan antar kriteria.

Expert yang terlibat dalam proses penilaian terdiri dari:

1. E1: Senior Manager Production
2. E2: Manager Production Engineer – Body & Frame
3. E3: Manager Production Engineer – Assembly

Gambar 2. interview penilaian expert

Hasil penilaian dari seluruh expert pada gambar 2 kemudian diagregasi menggunakan geometric mean untuk memperoleh satu nilai perbandingan yang representatif. Selanjutnya dilakukan perhitungan bobot prioritas menggunakan metode eigenvector serta pengujian konsistensi menggunakan Consistency Ratio (CR).

Hasil pembobotan menunjukkan bahwa Vehicle Quality menjadi kriteria dengan bobot tertinggi karena berkaitan langsung dengan kualitas kendaraan dan stabilitas proses produksi.

Selain itu, MP Management, Cost, dan Space Availability juga memiliki pengaruh besar terhadap kelancaran implementasi assembly line dan efisiensi operasional perusahaan.

Matriks Perbandingan Berpasangan Kriteria

Tabel 4. Matriks *Pairwise Comparison* Kriteria

Kriteria	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1 - *Driving Range*	1	1/3	1/3	1/2	1	2	1
C2 - *Vehicle Quality*	3	1	2	3	3	3	2
C3 - MP *Management*	3	1/2	1	1	3	3	2
C4 - *Cost*	2	1/3	1	1	2	2	2
C5 - *Equip/Layout Modif*	1	1/3	1/3	1/2	1	2	1
C6 - *Part Handling*	1/2	1/3	1/3	1/2	1/2	1	1
C7 - *Space Availability*	1	1/2	1/2	1/2	1	1	1

Matriks pada Tabel 4 menunjukkan bahwa *Vehicle Quality* (C2) memiliki tingkat kepentingan relatif yang lebih tinggi dibandingkan sebagian besar kriteria lainnya. Selain itu, MP *Management* (C3) dan *Cost* (C4) juga memiliki tingkat kepentingan yang cukup dominan karena berkaitan langsung dengan stabilitas operasional dan efisiensi implementasi fasilitas produksi.

Sementara itu, *Driving Range* (C1), *Part Handling* (C6), dan *Space Availability* (C7) tetap dipertimbangkan sebagai faktor pendukung yang mempengaruhi efisiensi logistik dan fleksibilitas pengembangan fasilitas produksi.

Perhitungan Bobot Prioritas Kriteria

Tabel 4. Bobot Prioritas Kriteria

Kriteria	Bobot
C2 - *Vehicle Quality*	0.278
C3 - MP *Management*	0.205
C4 - *Cost*	0.176
C5 - *Equipment/Layout Modification*	0.120
C7 - *Space Availability*	0.109
C1 - *Driving Range*	0.071
C6 - *Part Handling*	0.041

Berdasarkan hasil pembobotan, *Vehicle Quality* (C2) menjadi kriteria dengan bobot tertinggi sebesar 0,278. Hal ini menunjukkan bahwa kualitas kendaraan menjadi prioritas utama dalam penentuan lokasi *assembly line* karena berkaitan langsung dengan stabilitas proses produksi dan kualitas output kendaraan.

MP Management (C3) dan *Cost* (C4) juga memiliki bobot yang cukup besar karena berpengaruh terhadap efisiensi operasional dan kebutuhan implementasi fasilitas produksi. Sementara itu, *Equipment/Layout Modification* (C5) dan *Space Availability* (C7) menjadi faktor pendukung yang berkaitan dengan kesiapan area produksi dan fleksibilitas pengembangan fasilitas.

Driving Range (C1) dan *Part Handling* (C6) memiliki bobot relatif lebih rendah, namun tetap dipertimbangkan karena mempengaruhi kelancaran aliran material dan aktivitas logistik internal pada proses produksi.

Pengujian Konsistensi (*Consistency Ratio*)

Pengujian konsistensi dilakukan untuk memastikan bahwa hasil penilaian *pairwise comparison* antar kriteria memiliki tingkat konsistensi yang dapat diterima. Dalam metode AHP, tingkat konsistensi diukur menggunakan nilai *Consistency Ratio* (CR). Matriks perbandingan dinyatakan konsisten apabila nilai CR ≤ 0,10.

Nilai λ_max diperoleh dari hasil perkalian matriks perbandingan dengan vektor bobot prioritas, kemudian dihitung *Consistency Index* (CI) dengan persamaan:

CI = (λ_max − n) / (n − 1) ……..…….. ……..(1)
Selanjutnya CR dihitung dengan:
CR = CI / RI ……(2)

Untuk jumlah kriteria n = 7, nilai RI yang digunakan adalah 1,32 sesuai tabel acuan Saaty (2008). Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai λ_max sebesar 7,38, sehingga menghasilkan CI sebesar 0,063 dan CR sebesar 0,048. Karena nilai CR berada di bawah batas 0,10, maka matriks perbandingan kriteria dinyatakan konsisten. Hal ini menunjukkan bahwa penilaian antar kriteria telah memiliki tingkat konsistensi yang baik sehingga bobot prioritas yang diperoleh dapat digunakan pada tahap perhitungan PROMETHEE II.

Normalisasi, Penentuan Fungsi Preferensi & Perhitungan Nilai Preferensi PROMETHEE

Tabel 5. Tipe Preferensi dan Nilai Ambang Batas

Kode	Kriteria	Tipe Atribut	Bobot	Function	Threshold
C2	Vehicle Quality	Benefit	0.278	Linear	p = 0.20
C3	MP Management	Cost	0.205	Linear	p = 0.20
C4	Cost	Cost	0.176	Linear	p = 0.25
C5	Equipment/Layout Modification	Benefit	0.120	Linear	p = 0.20
C7	Space Availability	Benefit	0.109	Linear	p = 0.20
C1	Driving Range	Cost	0.071	U-Shape	q = 0.10
C6	Part Handling	Cost	0.041	U-Shape	q = 0.10

Nilai threshold ditentukan berdasarkan karakteristik data yang telah dinormalisasi dan pertimbangan toleransi operasional pada lingkungan manufaktur otomotif. Pada U-Shape preference function digunakan indifference threshold (q) sebesar 0.10 untuk merepresentasikan bahwa perbedaan performa di bawah 10% masih dianggap belum signifikan secara operasional.

Sementara itu, pada linear preference function digunakan preference threshold (p) pada rentang 0.20–0.25 untuk merepresentasikan tingkat perbedaan performa yang dianggap memberikan pengaruh signifikan terhadap pengambilan keputusan.

Berdasarkan tipe fungsi preferensi dan threshold yang telah ditentukan, selanjutnya dilakukan perhitungan indeks preferensi antar alternatif. Hasil dari tahapan ini berupa matriks indeks preferensi yang digunakan untuk menghitung leaving flow dan entering flow sebagai dasar penentuan peringkat akhir alternatif pada metode PROMETHEE II.

Normalisasi Nilai untuk Kriteria *Benefit* dan *Cost*

Normalisasi dilakukan untuk mengubah seluruh nilai kriteria ke dalam skala baku 0 hingga 1 agar dapat dibandingkan secara langsung. Dalam metode PROMETHEE, proses normalisasi dibedakan berdasarkan arah preferensi kriteria, yaitu kriteria bertipe *benefit* (semakin besar semakin baik) dan *cost* (semakin kecil semakin baik).

Untuk kriteria bertipe benefit, normalisasi dilakukan dengan persamaan:

$$N_{ij} = \frac{\chi ij - \min(\chi j)}{\max(\chi j) - \min(\chi j)} \quad \text{……..…….. ……(3)}$$

Persamaan ini menyatakan bahwa nilai suatu alternatif akan semakin mendekati 1 apabila mendekati nilai maksimum dalam satu kriteria. Sebaliknya, untuk kriteria bertipe *cost* digunakan persamaan:

$$N_{ij} = \frac{\max(\chi j) - (\chi ij)}{\max(\chi j) - \min(\chi j)} \text{.....(4)}$$

Persamaan tersebut digunakan agar alternatif dengan nilai biaya, jarak, atau kebutuhan Berdasarkan persamaan normalisasi *benefit* dan *cost* tersebut, diperoleh nilai normalisasi untuk setiap alternatif sebagaimana disajikan pada Tabel 7.

Tabel 6. Nilai Normalisasi (0-1)

Alternatif	C1 (*Cost*)	C2 (*Benefit*)	C3 (*Cost*)	C4 (*Cost*)	C5 (*Benefit*)	C6 (*Cost*)	C7 (*Benefit*)
A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2)	1.000	0.500	0.333	0.541	0.333	0.875	0.998
A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1)	0.000	0.000	0.333	0.999	0.667	1.000	0.884
A3 - Option 2A (Assy #1 Building)	1.000	0.500	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2)	0.429	1.000	1.000	1.000	1.000	0.312	1.000

Hasil normalisasi menunjukkan bahwa setiap alternatif memiliki karakteristik performa yang berbeda pada masing-masing kriteria. Alternatif A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) memiliki nilai tertinggi pada *Vehicle Quality*, *MP Management*, *Cost*, *Equipment/Layout Modification*, dan *Space Availability*. Hal ini menunjukkan bahwa A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) unggul pada aspek kualitas proses, efisiensi tenaga kerja, kesiapan fasilitas, serta ketersediaan ruang produksi.

Alternatif A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2) menunjukkan performa baik pada *Driving Range* dan *Part Handling*, yang mencerminkan jarak perpindahan unit dan aliran logistik yang lebih efisien. Sementara itu, A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1) memiliki performa yang cukup stabil terutama pada aspek biaya dan sistem logistik internal.

Di sisi lain, A3 - Option 2A (Assy #1 Building) memiliki nilai rendah pada sebagian besar kriteria utama, khususnya *Cost*, *Equipment/Layout Modification*, dan *Space Availability*, sehingga menunjukkan keterbatasan dari sisi kesiapan fasilitas dan efisiensi implementasi.

Secara keseluruhan, hasil normalisasi menunjukkan adanya *trade-off* antar alternatif, sehingga diperlukan evaluasi multikriteria untuk menentukan alternatif terbaik secara agregat menggunakan metode PROMETHEE.

Indeks Preferensi Multikriteria (π)

Tabel 7. Indeks Preferensi $\pi(A_i, A_k)$

Ai vs Ak	A1	A2	A3	A4
A1	-	0.411	0.651	0.112
A2	0.337	-	0.651	0.041
A3	0.000	0.349	-	0.071
A4	0.780	0.738	0.929	-

Berdasarkan Tabel 8, alternatif A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) memiliki nilai preferensi tertinggi terhadap seluruh alternatif lain, terutama terhadap A3 - Option 2A (Assy #1 Building)dan A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2). Hal ini menunjukkan bahwa A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) memiliki tingkat dominasi yang paling kuat berdasarkan kombinasi seluruh kriteria yang digunakan dalam penelitian.

Alternatif A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1) menunjukkan tingkat dominasi yang cukup baik terhadap A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2) dan A3 - Option 2A (Assy #1 Building), terutama didukung oleh performa pada aspek biaya dan kesiapan fasilitas. Sementara itu, A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2) masih memiliki dominasi terhadap A3, khususnya pada aspek jarak perpindahan dan sistem logistik internal.

Di sisi lain, A3 - Option 2A (Assy #1 Building) memiliki nilai preferensi paling rendah dan lebih sering didominasi oleh alternatif lain. Kondisi ini menunjukkan bahwa performa A3 - Option 2A (Assy #1 Building) relatif kurang kompetitif pada beberapa kriteria utama dalam sistem evaluasi.

Secara keseluruhan, hasil indeks preferensi menunjukkan bahwa A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) merupakan alternatif dengan tingkat dominasi paling konsisten dibandingkan alternatif lainnya.

Analisis *Leaving Flow, Entering Flow*, dan Peringkat Akhir Alternatif (PROMETHEE I dan II)

Tahap akhir metode PROMETHEE dilakukan melalui perhitungan *leaving flow* (φ^+), *entering flow* (φ^-), dan *net flow* (φ) untuk menentukan peringkat akhir alternatif lokasi *assembly line*.

Nilai *leaving flow* menunjukkan tingkat dominasi suatu alternatif terhadap alternatif lain, sedangkan *entering flow* menunjukkan tingkat keterdominasian suatu alternatif dalam sistem evaluasi. Selanjutnya, nilai *net flow* diperoleh dari selisih antara *leaving flow* dan *entering flow*, yang digunakan sebagai dasar penentuan peringkat akhir alternatif.

Alternatif dengan nilai *net flow* terbesar menunjukkan alternatif yang paling dominan dan paling direkomendasikan dalam pengambilan keputusan. Sebaliknya, alternatif dengan nilai *net flow* negatif menunjukkan bahwa alternatif tersebut lebih sering didominasi oleh alternatif lainnya.

Hasil perhitungan *leaving flow*, *entering flow*, dan *net flow* pada penelitian ini disajikan pada subbab berikutnya.

Formulasi Matematis *Leaving Flow, Entering Flow*, dan *Net Flow*

Leaving flow untuk setiap alternatif A_i dihitung sebagai rata-rata nilai indeks preferensi multikriteria $\pi(A_i,A_k)$ terhadap seluruh alternatif lain:

$$\phi^+(A_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{k \neq 1} \pi\,(A_i, A_k) \quad \text{……..…….. ……..(5)}$$

Nilai ini menunjukkan kekuatan dominasi keluar (*outgoing strength*) suatu alternatif. Sebaliknya, *entering flow* dihitung sebagai:

$$\phi^-(A_i) = \frac{1}{n-1} \sum_{k \neq 1} \pi\,(A_k, A_i) \quad \text{……..…….. ……..(6)}$$

yang mencerminkan tingkat dominasi masuk (*incoming weakness*) yang diterima oleh alternatif tersebut. *Net flow* kemudian dirumuskan sebagai:

$$\phi(A_i) = \phi^+(A_i) - \phi^-(A_i) \quad \text{……..…….. ……..(7)}$$

Net flow digunakan sebagai dasar perangkingan dalam PROMETHEE II, di mana semakin besar nilai φ, semakin unggul posisi alternatif tersebut dalam keseluruhan sistem keputusan.

Matriks Indeks Preferensi Multikriteria

Perhitungan φ^+ dan φ^- dilakukan berdasarkan matriks indeks preferensi multikriteria yang diperoleh dari integrasi bobot AHP dan nilai preferensi PROMETHEE.

Tabel 8. Indeks Preferensi $\pi(A_i, A_k)$

Ai vs Ak	A1	A2	A3	A4
A1	-	0.411	0.651	0.112
A2	0.337	-	0.651	0.041
A3	0.000	0.349	-	0.071
A4	0.780	0.738	0.929	-

Matriks tersebut menunjukkan hubungan preferensi antaralternatif yang bersifat tidak simetris. Setiap nilai menunjukkan tingkat dominasi suatu alternatif terhadap alternatif lainnya berdasarkan seluruh kriteria yang digunakan.

Analisis *Net Flow* dan Peringkat Akhir Alternatif (PROMETHEE II)

Tabel 9. Hasil Perhitungan *Leaving Flow, Entering Flow*, dan *Net Flow* Alternatif (PROMETHEE II)

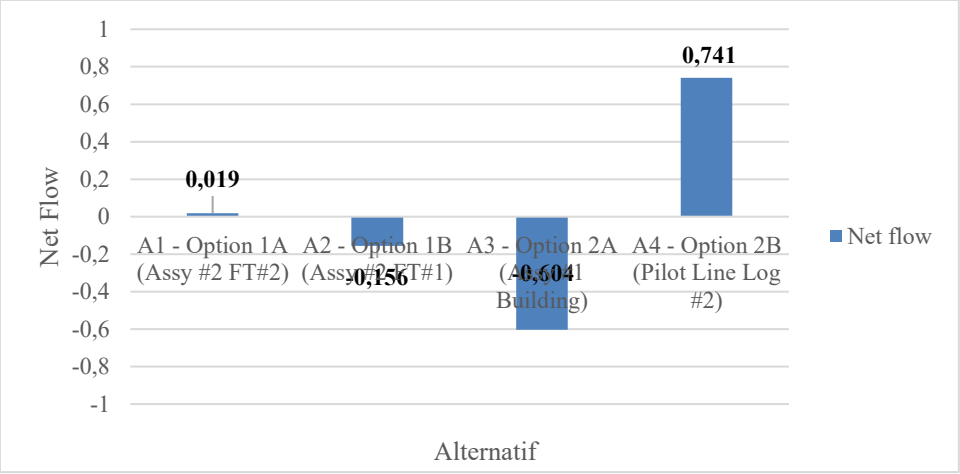
Alternatif	φ^+	φ^-	$\varphi = \varphi^+ - \varphi^-$	Peringkat
A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2)	0.391	0.372	+0.019	2
A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1)	0.343	0.499	-0.156	3
A3 - Option 2A (Assy #1 Building)	0.140	0.744	-0.604	4
A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2)	0.816	0.075	+0.741	1

Berdasarkan hasil perhitungan, alternatif A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) memperoleh nilai *net flow* tertinggi sebesar +0.741 sehingga menjadi alternatif terbaik dalam pemilihan lokasi *assembly line*. Hasil tersebut menunjukkan bahwa A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) memiliki performa paling baik secara keseluruhan berdasarkan kombinasi seluruh kriteria.

Alternatif A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2) berada pada peringkat kedua dengan nilai *net flow* positif sebesar +0.019. Hal ini menunjukkan bahwa A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2) masih memiliki tingkat dominasi yang sedikit lebih baik dibandingkan tingkat keterdominasian terhadap alternatif lain.

Sementara itu, alternatif A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1) dan A3 - Option 2A (Assy #1 Building) memiliki nilai *net flow* negatif, yang menunjukkan bahwa kedua alternatif tersebut lebih banyak didominasi dibandingkan mendominasi alternatif lainnya dalam proses evaluasi multikriteria.

Berdasarkan nilai *net flow* yang telah dihitung pada Tabel 10, perbandingan performa antaralternatif dapat divisualisasikan melalui grafik peringkat pada Gambar 3 berikut.



Gambar 3. Grafik Peringkat Alternatif Berdasarkan Nilai *Net Flow* PROMETHEE II

Grafik pada Gambar 3 menunjukkan bahwa alternatif A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) memiliki nilai *net flow* tertinggi sebesar +0.741 sehingga menjadi alternatif terbaik dalam sistem keputusan PROMETHEE II. Posisi ini menunjukkan bahwa A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) memiliki tingkat dominasi paling tinggi serta tingkat keterdominasian paling rendah dibandingkan alternatif lainnya.

Alternatif A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2) berada pada posisi kedua dengan nilai *net flow* positif sebesar +0.019. Hal ini menunjukkan bahwa A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2) masih memiliki tingkat dominasi yang relatif lebih baik dibandingkan tingkat keterdominasian terhadap alternatif lain.

Sementara itu, alternatif A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1) memiliki nilai *net flow* negatif sebesar -0.156, sedangkan alternatif A3 - Option 2A (Assy #1 Building) memiliki nilai *net flow* terendah sebesar -0.604. Hasil ini menunjukkan bahwa A3 - Option 2A (Assy #1 Building) merupakan alternatif yang paling banyak didominasi dalam proses evaluasi multikriteria.

Perbedaan nilai *net flow* menunjukkan bahwa alternatif A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) memiliki performa paling unggul berdasarkan kombinasi seluruh kriteria yang digunakan dalam proses pengambilan keputusan lokasi *assembly line*.

Analisis Sensitivitas

Analisis Sensitivitas dengan Perubahan Bobot Awal

Tahapan analisis sensitivitas dengan perubahan bobot awal dilakukan sebagai berikut:

1. Perubahan bobot dilakukan dengan skenario kenaikan dan penurunan sebesar 5%, 10%, dan 15% dari bobot awal. Pada setiap skenario, bobot kriteria lainnya disesuaikan secara proporsional agar total bobot tetap bernilai 1.

Tabel 10. Perubahan Bobot Kriteria pada Analisis Sensitivitas

Kriteria	Bobot Awal	Deviasi Naik			Deviasi Turun		
		(+5%)	(+10%)	(+15%)	(-5%)	(-10%)	(-15%)
Driving Range (C1)	0.071	0.070	0.068	0.067	0.072	0.074	0.075
Vehicle Quality (C2)	0.278	0.292	0.306	0.320	0.264	0.250	0.236
MP Management (C3)	0.205	0.201	0.197	0.193	0.209	0.213	0.217
Cost (C4)	0.176	0.173	0.169	0.166	0.179	0.183	0.186
Equip/Layout Modif (C5)	0.120	0.118	0.115	0.113	0.122	0.125	0.127
Part Handling (C6)	0.041	0.040	0.039	0.039	0.042	0.043	0.043
Space Availability (C7)	0.109	0.107	0.105	0.103	0.111	0.113	0.115
Total	**1.000**	**1.000**	**1.000**	**1.000**	**1.000**	**1.000**	**1.000**

2. Setelah perubahan bobot dilakukan, seluruh alternatif dihitung kembali menggunakan metode PROMETHEE untuk memperoleh nilai leaving flow (φ^+), entering flow (φ^-), dan net flow (φ). Hasil perhitungan ulang tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil peringkat awal sebelum perubahan bobot untuk mengetahui pengaruh perubahan bobot terhadap stabilitas peringkat alternatif dan struktur preferensi keputusan.

Perubahan nilai Net Flow akibat deviasi kenaikan bobot kriteria disajikan pada Tabel 12, sedangkan perubahan nilai Net Flow akibat deviasi penurunan bobot kriteria disajikan pada Tabel 13.

Tabel 11. Perubahan Net Flow Deviasi Naik

Alternatif	Awal	Naik 5%	Rank	Naik 10%	Rank	Naik 15%	Rank
A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2)	+0.019	+0.010	2	+0.002	2	−0.006	2
A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1)	−0.156	−0.142	3	−0.128	3	−0.115	3
A3 - Option 2A (Assy #1 Building)	−0.604	−0.621	4	−0.638	4	−0.655	4
A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2)	+0.741	+0.753	1	+0.764	1	+0.776	1

Tabel 12. Perubahan Net Flow Deviasi Turun

Alternatif	Awal	Turun 5%	Rank	Turun 10%	Rank	Turun 15%	Rank
A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2)	+0.019	+0.028	2	+0.037	2	+0.046	2
A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1)	−0.156	−0.170	3	−0.184	3	−0.198	3
A3 - Option 2A (Assy #1 Building)	−0.604	−0.587	4	−0.570	4	−0.553	4
A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2)	+0.741	+0.729	1	+0.717	1	+0.705	1

Berdasarkan hasil analisis sensitivitas, perubahan bobot pada kriteria *Vehicle Quality* tidak menyebabkan perubahan peringkat alternatif. Pada seluruh skenario, alternatif A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) tetap berada pada peringkat pertama, diikuti A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2), A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1), dan A3 - Option 2A (Assy #1 Building).

Analisis Sensitivitas dengan Perubahan Threshold

Pengujian kedua dilakukan melalui variasi nilai preference threshold pada kriteria *Vehicle Quality* (C2) yang menggunakan fungsi preferensi *linear*. Tahapan pengujian dilakukan sebagai berikut:

1. Nilai *preference threshold* pada kriteria *Vehicle Quality* (C2) divariasikan menggunakan beberapa skenario, yaitu p = 0,20 sebagai kondisi awal (*baseline*), p = 0,40, p = 0,60, p = 0,80, dan p = 1,00 pada tabel 4. 14.

Tabel 13. Variasi *Threshold* untuk Kriteria *Vehicle Quality* (C2)

Skenario	Threshold *Vehicle Quality* (C2)
S1	p = 0.20 (*Baseline*)
S2	p = 0.40
S3	p = 0.60
S4	p = 0.80
S5	p = 1.00

2. Pada setiap skenario *threshold*, seluruh alternatif dihitung kembali menggunakan metode PROMETHEE untuk memperoleh nilai *leaving flow* (φ^+), *entering flow* (φ^-), dan *net flow* (φ). Hasil perhitungan kemudian dibandingkan dengan kondisi awal untuk mengetahui pengaruh perubahan threshold terhadap kestabilan nilai net flow dan peringkat alternatif pada tabel 15.

Tabel 14. Hasil Variasi *Threshold* terhadap Hasil *Net flow*

Alternatif	Awal (p=0.20)	p=0.40	Rank	p=0.60	Rank	p=0.80	Rank	p=1.00	Rank
A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2)	+0.019	+0.019	2	+0.019	2	+0.019	2	+0.019	2
A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1)	−0.156	−0.156	3	−0.126	3	−0.087	3	−0.064	3
A3 - Option 2A (Assy #1 Building)	−0.604	−0.604	4	−0.603	4	−0.604	4	−0.603	4
A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2)	+0.741	+0.741	1	+0.710	1	+0.671	1	+0.648	1

Hasil Analisis Sensitivitas

Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa perubahan parameter pada metode AHP–PROMETHEE tidak menyebabkan perubahan peringkat alternatif. Pada skenario pertama, perubahan bobot kriteria *Vehicle Quality* (C2) sebesar ±5%, ±10%, dan ±15% menghasilkan perubahan nilai *net flow* pada seluruh alternatif, namun tidak mengubah urutan peringkat. Alternatif A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) tetap berada pada peringkat pertama pada seluruh skenario, diikuti oleh A1 - Option 1A (Assy #2 FT#2), A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1), dan A3 - Option 2A (Assy #1 Building). Nilai *net flow* A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) mengalami peningkatan dari +0.741 menjadi +0.776 pada skenario kenaikan bobot 15%, sedangkan pada skenario penurunan bobot 15% nilai *net flow* A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) menurun menjadi +0.705. Meskipun demikian, selisih nilai *net flow* antar alternatif masih cukup besar sehingga tidak terjadi perubahan *ranking*.

Pada skenario kedua, variasi *preference threshold* pada kriteria *Vehicle Quality* (C2) juga menghasilkan perubahan nilai *net flow* tanpa mengubah urutan peringkat alternatif. Peningkatan nilai *threshold* dari p = 0.20 menjadi p = 1.00 menyebabkan nilai *net flow* A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) menurun dari +0.741 menjadi +0.648, sedangkan nilai *net flow* A2 - Option 1B (Assy #2 FT#1) meningkat dari −0.156 menjadi −0.064. Perubahan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar nilai *threshold*, semakin rendah sensitivitas fungsi preferensi terhadap perbedaan nilai antar alternatif. Namun demikian, perubahan tersebut tidak cukup signifikan untuk mengubah struktur preferensi keputusan.

Secara keseluruhan, hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa model AHP–PROMETHEE yang digunakan memiliki tingkat kestabilan dan *robustness* yang baik. Baik perubahan bobot kriteria maupun variasi *threshold* tidak menyebabkan perubahan urutan peringkat alternatif. Alternatif A4 (*Option 2B – Pilot Line Log #2*) secara konsisten menempati peringkat pertama pada seluruh skenario pengujian, sehingga dapat dinyatakan sebagai alternatif yang paling layak untuk dipilih sebagai lokasi *assembly line* kendaraan listrik.

Perbandingan dengan Penelitian Sebelumnya

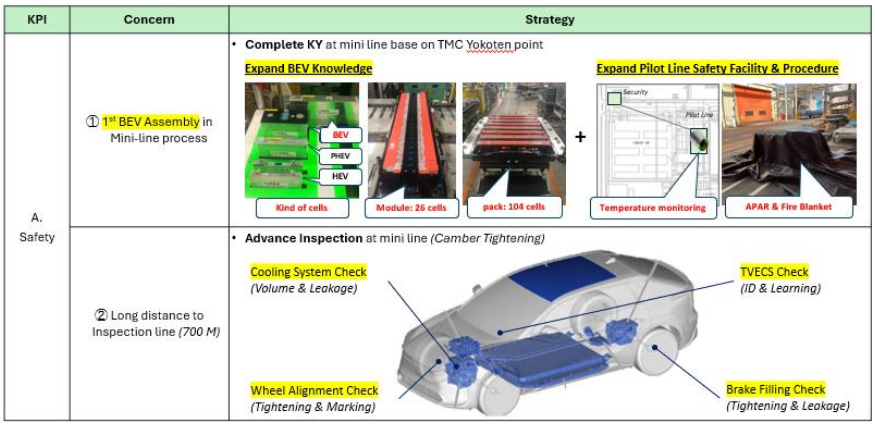
Hasil penelitian menunjukkan bahwa alternatif A4 merupakan alternatif terbaik berdasarkan integrasi metode AHP dan PROMETHEE. Hasil ini menunjukkan bahwa pendekatan pembobotan menggunakan AHP yang dikombinasikan dengan metode outranking PROMETHEE mampu menghasilkan proses pengambilan keputusan yang sistematis pada permasalahan pemilihan lokasi fasilitas dengan banyak kriteria.

Temuan penelitian ini sejalan dengan penelitian Amiri (2010) yang menunjukkan bahwa metode AHP efektif digunakan untuk menentukan bobot kriteria pada proses pengambilan keputusan multikriteria, sedangkan metode outranking seperti PROMETHEE mampu memberikan hasil pemeringkatan alternatif yang mempertimbangkan dominasi relatif antar alternatif. Demikian pula, penelitian Altubaishe dan Desai (2023) menunjukkan bahwa integrasi AHP–PROMETHEE mampu meningkatkan objektivitas proses evaluasi alternatif pada permasalahan pemilihan keputusan yang melibatkan berbagai kriteria yang saling bertentangan.

Perbedaan penelitian ini dibandingkan penelitian sebelumnya terletak pada objek penelitian, yaitu pemilihan alternatif lokasi assembly line dan final test pada industri otomotif. Selain itu, penelitian ini menggunakan kombinasi tujuh kriteria evaluasi yang disesuaikan dengan kebutuhan perusahaan sehingga menghasilkan rekomendasi yang lebih spesifik terhadap permasalahan yang dihadapi.

Implikasi Manajerial

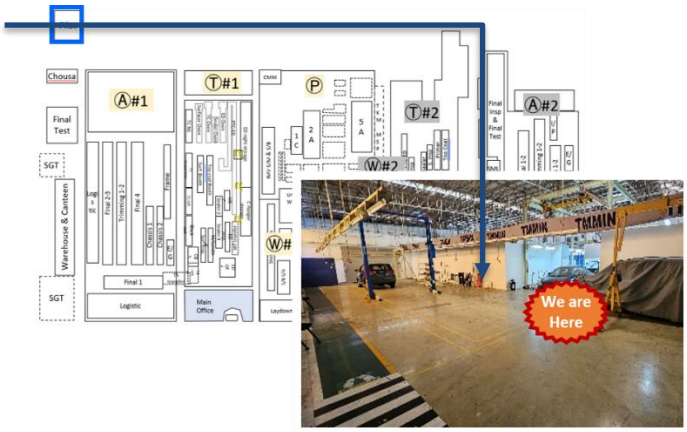
Berdasarkan hasil penelitian, implementasi alternatif A4 - Option 2B (Pilot Line Log #2) sebagai lokasi *assembly line* memerlukan beberapa persiapan utama dari perusahaan. Dari aspek keselamatan kerja, perlu dilakukan *advance inspection* pada area *final assembly* untuk memastikan kesiapan fasilitas, jalur material, dan potensi risiko operasional sebelum proses produksi dimulai yang ditunjukkan pada Gambar 4. Dari aspek kualitas, perusahaan perlu memastikan kesiapan sumber daya manusia (*manpower readiness*), termasuk pelatihan operator, standar inspeksi kualitas, dan prosedur penanganan baterai kendaraan listrik (*battery handling*) yang sesuai dengan persyaratan keselamatan dan kualitas produk.



Gambar 4. Strategi Penguatan Aspek Keselamatan pada Lokasi Terpilih Option 2B (Pilot Line Log #2)

Dari aspek pengelolaan sumber daya, perusahaan perlu menyusun rencana kebutuhan tenaga kerja serta pembagian tanggung jawab yang jelas untuk mendukung operasional area baru. Selain itu, diperlukan penyusunan jadwal investasi (*investment schedule*) yang terstruktur untuk pelaksanaan modifikasi fasilitas dan pengadaan peralatan pendukung. Pengoperasian *interplant truck* juga perlu dipersiapkan sejak awal untuk menjamin kelancaran aliran material antar area produksi.

Selanjutnya, mengingat area yang dipilih merupakan area khusus (*dedicated area*), modifikasi dan persiapan ruang perlu segera dilakukan agar area tetap steril dan siap digunakan sesuai jadwal implementasi proyek. Persiapan yang matang pada aspek keselamatan, kualitas, sumber daya, fasilitas, dan logistik akan mendukung kelancaran implementasi lokasi *assembly line* yang terpilih.



Gambar 4. Area Pilot Line (Option 2B) yang Direkomendasikan sebagai Lokasi Assembly Line dan Final Test Project 1*5D

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil menerapkan integrasi metode *Analytical Hierarchy Process* (*AHP*) dan *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation II* (*PROMETHEE II*) sebagai pendekatan *Multi Criteria Decision Making* (*MCDM*) untuk menentukan lokasi terbaik pembangunan *assembly line* dan *final test* pada *Project* 1×5D. Hasil analisis *AHP* menunjukkan bahwa *Vehicle Quality*, *MP Management*, dan *Cost* merupakan kriteria dengan prioritas tertinggi, dengan nilai *Consistency Ratio* (*CR*) < 0,10 yang menandakan penilaian konsisten. Berdasarkan analisis *PROMETHEE II*, alternatif A4 – *Option* 2B (*Pilot Line Log* #2) memperoleh nilai *net flow* tertinggi (+0,741) sehingga ditetapkan sebagai alternatif terbaik karena memiliki dominasi agregat paling tinggi. Hasil analisis sensitivitas juga menunjukkan bahwa perubahan bobot pada kriteria utama tidak mengubah urutan peringkat alternatif, sehingga model keputusan yang digunakan terbukti stabil dan *robust*. Secara keseluruhan, integrasi *AHP–PROMETHEE II* efektif dalam mendukung pengambilan keputusan pemilihan lokasi fasilitas produksi secara sistematis, objektif, dan dapat dipertanggungjawabkan.

REFERENSI

Altubaishe, B., & Desai, S. (2023). *Multicriteria decision making in supply chain management using FMEA and hybrid AHP-PROMETHEE algorithms*. *Sensors, 23*(8), 4041. https://doi.org/10.3390/s23084041

Amiri, M. P. (2010). Project selection for oil-fields development by using the AHP and fuzzy TOPSIS. *Expert Systems with Applications, 37*(9), 6218–6224. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.02.103

Bogdoll, D., Karsch, L., Amritzer, J., & Zöllner, J. M. (2023). *On the impact of replacing private cars with autonomous shuttles: An agent-based approach*. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2311.14118

Cheng, Y., Yao, Z., & Wang, X. (2023). *Differential game analysis for cooperation models in automotive supply chain under low-carbon emission reduction policies*. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.07211

Ciptomulyono, U. (2024). *Pengambilan keputusan multi kriteria: Konsep, teori, dan aplikasi*. ITS Press.

Dağdeviren, M. (2008). Decision making in equipment selection: An integrated approach with AHP and PROMETHEE. *Journal of Intelligent Manufacturing, 19*(4), 397–406. https://doi.org/10.1007/s10845-008-0091-7

Deng, Y., & Ma, M. (2024). *China's plug-in hybrid electric vehicles transition: An operational carbon perspective*. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.07308

Greco, S., Ehrgott, M., & Figueira, J. R. (2016). *Multiple criteria decision analysis: State of the art surveys*. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-3094-4

Macharis, C., Springael, J., De Brucker, K., & Verbeke, A. (2004). PROMETHEE and AHP: The design of operational synergies in multicriteria analysis. *European Journal of Operational Research, 153*(2), 307–317. https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00192-5

Peko, I., Mlinarić, T. J., & Kovačević, M. S. (2018). Application of AHP and PROMETHEE methods in logistics and transport decision-making. *Pomorstvo, 32*(2), 312–321.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal of Services Sciences, 1*(1), 83–98. https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590

Shukor, S. A., Newaz, M. S., Rahman, M. K., & Taha, Z. (2018). Sustainable manufacturing practices in the automotive industry: A review. *International Journal of Engineering & Technology, 7*(4), 938–944.

Vitta, S. (2021). *Electric cars, assessment of green nature vis-à-vis conventional fuel driven cars*. *arXiv*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2104.14287

Wang, X., Li, Y., Zhang, H., & Liu, Z. (2022). Carbon efficiency evaluation and optimization in automotive manufacturing systems. *Journal of Cleaner Production, 350*, 131463.

Więckowski, J. (2023). Sensitivity analysis in multi-criteria decision-making: A review of robustness assessment methods. *Expert Systems with Applications, 225*, 120108.