



Department of Digital Business

**Journal of Artificial Intelligence and Digital Business (RIGGS)**

Homepage: <https://journal.ilmudata.co.id/index.php/RIGGS>

Vol. 4 No. 4 (2025) pp: 5004-5011

P-ISSN: 2963-9298, e-ISSN: 2963-914X

---

## Analisis Pemilihan Konfigurasi Alat Berat Menggunakan Metode Complex Proportional Assessment (COPRAS) Pada Proyek Tol Yogyakarta

Rio Embun Pratama, Muhammad Faizal Ardiansyah Arifin  
Prodi S1 Teknik sipil, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang  
[rioembunpratama@students.unnes.ac.id](mailto:rioembunpratama@students.unnes.ac.id), [faizal.arifin@mail.unnes.ac.id](mailto:faizal.arifin@mail.unnes.ac.id)

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan menentukan konfigurasi alat berat yang paling optimal pada pekerjaan timbunan proyek jalan tol dengan menggunakan metode Complex Proportional Assessment (COPRAS) sebagai pendekatan pengambilan keputusan multi-kriteria. Empat alternatif konfigurasi, yaitu Alat Baru Semua (A1), Alat Lama Semua (A2), Kombinasi 1 (A3), dan Kombinasi 2 (A4), dievaluasi dengan komposisi armada yang sama sehingga perbedaan kinerja hanya dipengaruhi oleh kondisi alat dan faktor operasional. Penilaian dilakukan berdasarkan empat kriteria utama, yaitu biaya operasional, mutu pekerjaan, risiko operasional, dan waktu pelaksanaan, yang ditentukan melalui kebutuhan proyek dan karakteristik lapangan. Bobot kriteria dihitung menggunakan Direct Rating Method, menghasilkan bobot biaya 0,31, mutu 0,25, risiko 0,25, dan waktu 0,19, sebagai representasi tingkat kepentingan relatif dalam mendukung keberhasilan pekerjaan. Data hasil observasi lapangan digunakan untuk menyusun matriks keputusan COPRAS, kemudian dianalisis melalui tahapan normalisasi, pembobotan, perhitungan nilai benefit dan cost, hingga penentuan nilai preferensi relatif ( $Q_i$ ) dan utilitas. Hasil analisis menunjukkan bahwa Kombinasi 2 (A4) memiliki nilai  $Q_i$  dan utilitas tertinggi, sehingga direkomendasikan sebagai konfigurasi armada yang paling optimal karena mampu memberikan keseimbangan terbaik antara efisiensi biaya, mutu pekerjaan yang tetap tinggi, risiko gangguan alat yang lebih rendah, serta durasi pelaksanaan yang efektif. Alternatif Alat Baru Semua (A1) dan Kombinasi 1 (A3) menempati posisi berikutnya, sedangkan Alat Lama Semua (A2) berada pada peringkat terakhir. Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan konfigurasi alat berat memerlukan pendekatan evaluasi multi-kriteria agar keputusan yang diambil lebih akurat, efisien, dan mendukung peningkatan kinerja proyek secara keseluruhan.

*Kata kunci:* COPRAS, Alat Berat, Konfigurasi Armada, Multi-Kriteria, Proyek Tol

### 1. Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur jalan tol dalam lima tahun terakhir mengalami peningkatan signifikan sebagai bagian dari strategi nasional peningkatan konektivitas, efisiensi logistik, dan pertumbuhan ekonomi wilayah [1]. Pekerjaan pemindahan tanah mekanis (*earthmoving*) menjadi komponen dominan pada proyek jalan tol karena menyerap porsi terbesar biaya proyek dan waktu konstruksi secara keseluruhan [2]. Ketidaktepatan dalam menentukan konfigurasi alat berat terbukti menjadi salah satu penyebab utama inefisiensi proyek yang berdampak pada pembengkakan biaya dan keterlambatan waktu pelaksanaan [3]. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa kesalahan dalam penentuan rasio excavator dan dump truck serta ketidakseimbangan dukungan alat bantu seperti bulldozer dan roller secara langsung menurunkan produktivitas siklus kerja alat [4]. Pemanfaatan metode optimasi berbasis simulasi dan pemrograman linear telah diimplementasikan dalam upaya mengendalikan biaya armada alat berat [5]. Namun pendekatan tersebut cenderung berorientasi satu tujuan sehingga kurang mampu menangkap konflik antar kriteria operasional seperti produktivitas, biaya operasional, durasi pelaksanaan, reliabilitas armada, dan aspek keberlanjutan [6].

Sebagai respons terhadap kompleksitas pengambilan keputusan tersebut, pendekatan *Multi Criteria Decision Making (MCDM)* berkembang sebagai metode yang mampu mengintegrasikan berbagai kriteria yang saling bertentangan dalam satu sistem evaluasi terpadu [7]. Berbagai metode MCDM seperti AHP, TOPSIS, PROMETHEE, dan COPRAS telah diterapkan dalam studi-studi pemilihan peralatan konstruksi dan perencanaan operasional proyek infrastruktur [8]. COPRAS memiliki karakteristik unik karena memisahkan kriteria keuntungan (*benefit criteria*) dan kerugian (*cost criteria*) sehingga proses evaluasi alternatif menjadi lebih transparan dan terukur [9]. Pendekatan ini memungkinkan perhitungan kontribusi proporsional setiap alternatif terhadap solusi ideal secara matematis sehingga mempermudah proses pemeringkatan [10]. Penelitian metodologis

---

Analisis Pemilihan Konfigurasi Alat Berat Menggunakan Metode Complex Proportional Assessment (COPRAS)  
Pada Proyek Tol Yogyakarta

juga membuktikan bahwa COPRAS memiliki stabilitas hasil yang tinggi terhadap perubahan bobot kriteria jika dibandingkan dengan metode peringkat lainnya [11].

Dalam konteks pengambilan keputusan di sektor konstruksi, COPRAS semakin diakui karena kemampuannya menyederhanakan analisis multi-kriteria tanpa mengorbankan akurasi hasil pemilihan alternatif [12]. Integrasi pembobotan berbasis ANP dengan mekanisme perankingan COPRAS diketahui mampu meningkatkan objektivitas keputusan dalam proses evaluasi kontraktor dan pemasok proyek konstruksi [13]. Penelitian lanjutan juga menunjukkan bahwa COPRAS efektif digunakan dalam konteks manajemen rantai pasok konstruksi karena dapat mengurangi bias subjektif pakar dan meningkatkan konsistensi pemilihan alternatif [14]. Model tersebut terbukti menghasilkan keputusan yang lebih reliabel pada kondisi data terbatas atau campuran antara data kualitatif dan kuantitatif [15].

Pada pekerjaan timbunan proyek jalan tol, tantangan utama terletak pada sinkronisasi siklus kerja alat berat yang sangat dipengaruhi oleh jarak angkut material, kondisi topografi, cuaca, serta ketersediaan tenaga operator [16]. Ketidakseimbangan kapasitas produksi antara alat pemuat dan alat angkut sering menjadi penyebab utama terjadinya antrean dump truck dan waktu tunggu excavator yang berlebih [3]. Fenomena tersebut berdampak pada penurunan efisiensi operasional dengan kehilangan produktivitas harian yang signifikan [4]. Selain itu, tuntutan penerapan prinsip pembangunan berkelanjutan mendorong integrasi kriteria konsumsi energi dan emisi karbon dalam evaluasi konfigurasi alat berat [18]. Metode COPRAS menjadi relevan karena mampu memperlakukan indikator lingkungan sebagai *cost criteria* tanpa mengurangi kejelasan rasio evaluasi antar alternatif [6].

Meskipun penggunaan metode MCDM pada bidang konstruksi terus meningkat, penelitian yang secara spesifik menerapkan COPRAS untuk menentukan konfigurasi armada alat berat berbasis data lapangan pada proyek jalan tol di Indonesia masih relatif terbatas [3]. Sebagian besar penelitian domestik masih menitikberatkan pada analisis deskriptif produktivitas atau optimasi biaya tunggal sehingga belum sepenuhnya mengakomodasi konflik multi-kriteria [4]. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan pemanfaatan metode COPRAS sebagai model penilaian proporsional yang mengintegrasikan indikator produktivitas alat, biaya operasional, durasi siklus kerja, serta kendala teknis lapangan guna menghasilkan rekomendasi konfigurasi alat berat yang optimal. Secara teoritis, penelitian ini memperkuat literatur penerapan COPRAS dalam bidang manajemen alat berat konstruksi berbasis data empiris Indonesia [12]. Secara praktis, hasil penelitian diharapkan dapat menjadi dasar pengambilan keputusan yang objektif, rasional, dan aplikatif bagi kontraktor proyek jalan tol dalam meningkatkan efisiensi biaya serta ketepatan waktu pelaksanaan proyek [15].

## 2. Metode Penelitian

### 2.1. Pendekatan dan Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif berbasis Sistem Pendukung Keputusan (SPK) dengan metode *Multi-Criteria Decision Making (MCDM)* melalui penerapan *Complex Proportional Assessment (COPRAS)*. Metode ini dipilih karena memiliki kemampuan untuk mengevaluasi sejumlah alternatif berdasarkan kriteria benefit (menguntungkan) dan cost (merugikan) secara simultan serta menghasilkan peringkat keputusan yang objektif dan proporsional. Pendekatan kuantitatif digunakan karena seluruh data penelitian berupa data numerik seperti produktivitas alat berat, biaya operasional, durasi siklus kerja, dan tingkat efisiensi armada sehingga dapat dianalisis menggunakan formula matematis COPRAS untuk memperoleh rekomendasi konfigurasi alat berat terbaik.

### 2.2. Objek Penelitian

Objek penelitian adalah konfigurasi alat berat pada pekerjaan tanah (*earthwork*) proyek pembangunan Jalan Tol Yogyakarta, khususnya pada pekerjaan timbunan badan jalan dan pemadatan. Alternatif yang dianalisis berupa kombinasi unit alat berat berupa excavator, bulldozer, dump truck, vibro roller, sheepfoot roller. Setiap kombinasi armada membentuk satu alternatif keputusan. Evaluasi COPRAS terhadap alternatif tersebut dilakukan berdasarkan beberapa kriteria utama yang merepresentasikan kinerja alat berat secara teknis dan ekonomis.

### 2.3. Penentuan Kriteria Penilaian

Kriteria disusun berdasarkan prinsip evaluasi COPRAS yaitu membedakan antara:

Kriteria Benefit → semakin besar nilai semakin baik  
Kriteria Cost → semakin kecil nilai semakin baik

Klasifikasi ini mengikuti ketentuan metodologis COPRAS yang menilai atribut positif dan negatif secara terpisah. Kriteria dalam penelitian ini ditetapkan sebagai berikut:

Tabel. 1. Kriteria yang digunakan dalam penelitian

Kode	Kriteria	Jenis
C1	Biaya	Cost
C2	Mutu	Benefit
C3	Resiko	Cost
C4	Waktu	Cost

#### 2.4. Alternatif Konfigurasi Alat Berat

Alternatif konfigurasi alat berat dalam penelitian ini disusun untuk merepresentasikan variasi kondisi armada yang umum dijumpai pada pelaksanaan pekerjaan timbunan proyek jalan tol. Setiap alternatif didefinisikan sebagai satu skema komposisi penggunaan alat berat yang berbeda berdasarkan kondisi usia alat serta tingkat homogenitas armada, sedangkan jumlah dan jenis alat diseragamkan agar perbandingan kinerja antar alternatif bersifat objektif dan hanya dipengaruhi oleh faktor performa alat dan implikasi biaya operasionalnya.

Empat alternatif yang dianalisis meliputi: Alat Baru Semua, Alat Lama Semua, Kombinasi 1 Alat Baru dan Alat Lama, Kombinasi 2 Alat Baru dan Alat Lama. Lalu untuk jenis alat berat yang dianalisis dilapangan berdasarkan kebutuhan standar pekerjaan timbunan meliputi:

Tabel. 2. Jenis alat berat yang digunakan di lapangan

Merek dan tipe alat berat yang digunakan	Jumlah alat
Excavator Caterpillar 313D	2
Bulldozer Zoomlion ZD160-3	1
Dump Truck UD Quester GWE 6×4	6
Vibro Roller Caterpillar CS533E	1
Sheepfoot Roller Caterpillar CS533E	1



Gambar. 1. Excavator Caterpillar 313D



Gambar. 2. Bulldozer Zoomlion ZD160-3



Gambar. 3. Dump Truck UD Quester GWE 6×4



Gambar. 4. Vibro Roller Caterpillar CS533E



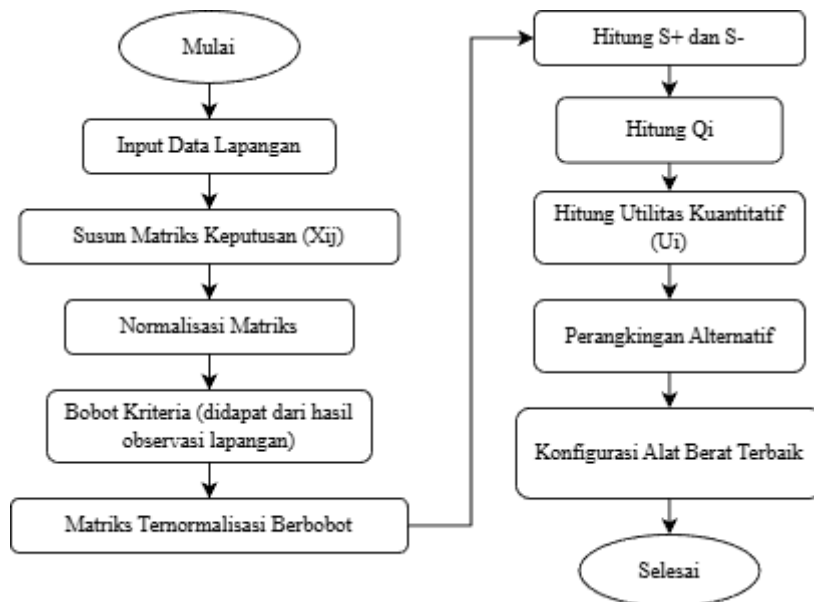
Gambar. 5. Sheepfoot Roller Caterpillar CS533E

Penyamaan jumlah dan jenis alat pada setiap alternatif dilakukan untuk mengontrol variabel kuantitas armada, sehingga evaluasi COPRAS berfokus sepenuhnya pada pengaruh kondisi alat terhadap kriteria penilaian, yaitu biaya operasional, mutu pekerjaan, risiko operasional, dan waktu pelaksanaan. Dengan pendekatan ini, perbedaan kinerja yang dihasilkan antar alternatif tidak disebabkan oleh jumlah unit alat, melainkan oleh karakteristik teknis dan ekonomis armada yang berbeda antara penggunaan alat baru, alat lama, maupun kombinasi keduanya.

Alternatif Alat Baru Semua merepresentasikan kondisi performa optimal dengan tingkat keandalan tinggi dan risiko gangguan rendah, sedangkan Alat Lama Semua menggambarkan kondisi sebaliknya dengan potensi *downtime* lebih besar dan efisiensi kerja lebih rendah. Alternatif Kombinasi 1 dan Kombinasi 2 disusun untuk mensimulasikan praktik aktual kontraktor yang menggabungkan alat baru dan lama dalam satu siklus kerja guna mencapai keseimbangan antara performa operasional dan efisiensi biaya. Seluruh alternatif dievaluasi menggunakan data observasi lapangan berupa produktivitas alat, waktu siklus, konsumsi bahan bakar, serta frekuensi gangguan operasional, yang kemudian dikonversi menjadi nilai kuantitatif membentuk matriks keputusan COPRAS berdasarkan bobot kriteria hasil *direct rating*.

## 2.5. Tahapan Penelitian

Untuk memperjelas proses penelitian, tahapan penelitian disajikan dalam bentuk diagram alir berikut yang menggambarkan tahapan sistematis mulai dari identifikasi masalah hingga diperolehnya konfigurasi alat berat yang optimal berdasarkan hasil analisis COPRAS:



Gambar. 6. Diagram Alir Penelitian.

### 3. Hasil dan Diskusi

#### 3.1. Data Alternatif dan Kriteria

Sistem pendukung keputusan pemilihan konfigurasi alat berat pada pekerjaan timbunan menggunakan metode COPRAS dirancang sesuai dengan Gambar 1. Adapun penilaian alternatif tiap kriteria ditentukan seperti data pada tabel yang tersaji pada tabel 3.

Tabel. 3. Penilaian Alternatif Tiap Kriteria

Alternatif	C1 (Rp)	C2 (%)	C3	C4 (Jam)
A1 Alat Baru Semua	18.200.000	93	2	8
A2 Alat Lama Semua	12.300.000	85	4	8
A3 Kombinasi 1	14.800.000	90	3	8
A4 Kombinasi 2	13.100.000	88	3	8

Jumlah tiap kolom:

$$\sum C1 = 18.200.000 + 12.300.000 + 14.800.000 + 13.100.000 = 58.400.000$$

$$\sum C2 = 93 + 85 + 90 + 88 = 356$$

$$\sum C3 = 2 + 4 + 3 + 3 = 12$$

$$\sum C4 = 8 + 8 + 8 + 8 = 32$$

Sistem pendukung keputusan pemilihan konfigurasi alat berat pada pekerjaan timbunan menggunakan metode COPRAS dirancang sesuai dengan Gambar 1. Adapun penentuan bobot kriteria ditentukan seperti data pada tabel yang tersaji pada tabel 2.

Tabel. 4. Pembobotan Kriteria

Kode	Kriteria	Bobot	Jenis
C1	Biaya	0,31	Cost
C2	Mutu	0,25	Benefit
C3	Resiko	0,25	Cost
C4	Waktu	0,19	Cost

#### 3.2. Penerapan Metode COPRAS

- Membuat matriks keputusan berdasarkan penilaian alternatif tiap kriteria yang diambil dari observasi langsung dilapangan, yang hasilnya bisa dilihat pada tabel 3.
- Melakukan normalisasi matriks dengan menjumlahkan setiap kolom, kemudian membagikan setiap nilai alternatif dari kolom tersebut dengan hasil penjumlahan tiap kolom untuk mendapatkan matriks. Hasil perhitungan ini dapat ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

$$X_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}}$$

Tabel. 5. Normalisasi Matriks

Alternatif	Kriteria			
	C1	C2	C3	C4
<b>A1</b>	0,3116	0,2612	0,1667	0,2500
<b>A2</b>	0,2106	0,2388	0,3333	0,2500
<b>A3</b>	0,2534	0,2528	0,2500	0,2500
<b>A4</b>	0,2243	0,2472	0,2500	0,2500
<b>Bobot</b>	<b>0,31</b>	<b>0,25</b>	<b>0,25</b>	<b>0,19</b>

- Menghitung nilai normalisasi terbobot dengan cara mengkalikan hasil normalisasi dengan bobot yang telah ditentukan sebelumnya. Hasil perhitungan ini dapat ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

$$D' = d_{ij} = X_{ij} \times W_j$$

Tabel. 6. Normalisasi Terbobot

Alternatif	Kriteria			
	C1	C2	C3	C4
<b>A1</b>	0,0966	0,0653	0,0417	0,0475
<b>A2</b>	0,0653	0,0597	0,0833	0,0475
<b>A3</b>	0,0786	0,0632	0,0625	0,0475
<b>A4</b>	0,0695	0,0618	0,0625	0,0475

4. Menghitung nilai index dengan cara menjumlahkan nilai berkriteria benefit (S+) yang ditunjukkan pada kriteria C2 setiap baris alternatifnya. Menjumlahkan nilai berkriteria cost (S-) yang ditunjukkan pada kriteria C1, C3, C4 dengan cara menjumlahkan setiap baris pada alternatifnya, serta menjumlahkan nilai pada kolom cost (S-). Hasil perhitungan ini ditunjukkan pada tabel di bawah ini:

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^n y + ij$$

$$S_{-i} = \sum_{j=1}^n y - ij$$

Tabel. 7. Nilai Maksimal dan Minimal Indeks

Alternatif	$S_{+i}$	$S_{-i}$
<b>A1</b>	0,0653	0,1858
<b>A2</b>	0,0597	0,1961
<b>A3</b>	0,0632	0,1886
<b>A4</b>	0,0618	0,1795
	$\sum_{i=1}^m S_{-i}$	<b>0,750</b>

5. Menghitung bobot relatif setiap alternatif dengan cara 1 (satu) dibagi dengan nilai S- setiap alternatif, kemudian total nilai (1/S-i). Setelah mendapatkan total nilai (1/S-i), selanjutnya kalikan nilai S- setiap alternatifnya dengan total nilai (1/S-i). Lalu menentukan urutan prioritas setiap alternatif dengan cara membagi jumlah nilai S- dengan nilai S- setiap alternatifnya lalu dijumlahkan dengan nilai S+ setiap alternatif.. Hasil perhitungan ini ditunjukkan pada tabel dibawah ini:

Tabel. 8. Bobot Relatif

Alternatif	$(1/S_{-i})$	$S_{-i} \sum_{i=1}^m (1/S_{-i})$	$\frac{\sum_{i=1}^m S_{-i}}{S_{-i} \sum_{i=1}^m (1/S_{-i})}$	$S_{+i} \frac{\sum_{i=1}^m S_{-i}}{\sum_{i=1}^m (1/S_{-i})}$
<b>A1</b>	5,3821	3,967	0,189	0,254
<b>A2</b>	5,0994	4,188	0,179	0,239
<b>A3</b>	5,3022	4,027	0,189	0,249
<b>A4</b>	5,5710	3,834	0,196	0,257
$\sum_{i=1}^m (1/S_{-i})$	<b>21,355</b>		$Q_{max}$	<b>0,257</b>

6. Setelah mendapatkan nilai maksimal selanjutnya menentukan nilai utilitas kuantitatif (U<sub>i</sub>), hasil ini didapatkan dengan cara membagi nilai prioritas setiap alternatifnya dengan nilai maksimal (Q<sub>max</sub>) dan dikali dengan 100 (seratus). Hasil perhitungan ini ditunjukkan pada tabel dibawah ini:

$$U_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} \times 100\%$$

Tabel. 9. Nilai Utilitas Kuantitatif

Alternatif	$U_i$	Rank
A1	98,812	2
A2	92,754	4
A3	96,908	3
A4	100	1

Hasil perhitungan metode COPRAS menunjukkan bahwa alternatif Kombinasi 2 (A4) memperoleh nilai utilitas tertinggi dan menjadi konfigurasi alat berat paling optimal karena mampu memberikan keseimbangan terbaik antara kriteria benefit dan cost. Meskipun tidak memiliki mutu setinggi alternatif alat baru semua, Kombinasi 2 menawarkan biaya operasional yang lebih rendah dengan tingkat risiko dan durasi pekerjaan yang sama, sehingga menghasilkan nilai signifikansi relatif terbesar. Alternatif Alat Baru Semua (A1) berada pada peringkat kedua dengan mutu tertinggi dan risiko paling rendah, namun biaya operasional yang jauh lebih besar meningkatkan nilai cost, sehingga menurunkan tingkat preferensi relatifnya dibanding Kombinasi 2. Kombinasi 1 (A3) menempati posisi berikutnya sebagai opsi kompromi yang masih rasional karena mampu mempertahankan mutu pekerjaan cukup tinggi dengan biaya yang lebih terkendali, meskipun secara keseluruhan belum mampu menyamai kinerja Kombinasi 2. Sementara itu, Alat Lama Semua (A2) berada pada peringkat terendah akibat tingginya risiko gangguan operasional dan mutu pekerjaan yang paling rendah, sehingga meskipun biaya awal lebih murah, performa total alternatif ini tetap kalah dibandingkan konfigurasi lainnya menurut evaluasi multi-kriteria COPRAS.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis pemilihan konfigurasi alat berat menggunakan metode *Complex Proportional Assessment (COPRAS)* dengan kriteria biaya, mutu, risiko, dan waktu, dapat disimpulkan bahwa metode COPRAS mampu memberikan keputusan pemilihan alternatif secara objektif dan sistematis berbasis data observasi lapangan. Pembobotan kriteria menggunakan *Direct Rating Method* menghasilkan bobot biaya sebesar 0,31, mutu 0,25, risiko 0,25, dan waktu 0,19, yang merepresentasikan tingkat kepentingan relatif setiap kriteria dalam mendukung pengambilan keputusan operasional pekerjaan timbunan jalan tol. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa alternatif Kombinasi 2 (A4) memperoleh nilai preferensi relatif dan utilitas tertinggi sehingga ditetapkan sebagai konfigurasi alat berat paling optimal, karena mampu memberikan keseimbangan terbaik antara biaya yang lebih efisien, mutu pekerjaan yang tetap tinggi, risiko operasional yang terkendali, serta durasi pelaksanaan yang efektif. Alternatif Alat Baru Semua (A1) berada pada peringkat kedua akibat performa mutu tertinggi tetapi terkendala biaya operasional besar, diikuti Kombinasi 1 (A3) sebagai opsi kompromi, sedangkan Alat Lama Semua (A2) berada pada peringkat terakhir karena mutu rendah dan risiko gangguan lebih tinggi. Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan armada alat berat tidak dapat bergantung pada aspek biaya semata, melainkan harus mempertimbangkan keseimbangan seluruh kriteria kinerja melalui pendekatan multi-kriteria seperti COPRAS.

#### Referensi

- [1] M. A. Berawi, "Infrastructure development and productivity performance," *Sustainability*, 2023, doi: 10.3390/su15021542.
- [2] K. Salman, "Project-Level Sustainable Asphalt Roadway Treatment Selection Framework Featuring a Flowchart and Analytic Network Process," *J Transp Eng*, 2020, doi: <https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000202>.
- [3] S. Adelia Ayu Kurniawati and I. Nyoman Dita Pahang Putra, "Analysis of Heavy Equipment Productivity in the Solo-Yogyakarta-NYIA Kulon Progo Toll Road Construction Project Section 1 Package 1.1," *COMPOSITE : JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING* 2024, vol. 03, pp. 1–12, 2023.
- [4] Dibyo Susilo and Ayyub Qona'ah, "Studi Produktivitas Peralatan Berat Dalam Proyek Pembangunan Tol Yogyakarta-Bawen: Analisis dan Rekomendasi Kinerja Efisien," *Jurnal Jalan dan Transportasi*, 2023, doi: 10.14710/jjt.2023.4567.
- [5] O. Moselhi and A. Alshibani, "Optimization of Earthmoving Operations in Heavy Civil Engineering Projects," *Autom Constr*, 2020, doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2009\)135:10\(948\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2009)135:10(948)).
- [6] Zaid Khallaf and Adel Alshibani, "Dynamic Fleet Configuration Model for Optimizing Earthmoving Operations Using Mixed Integer Linear Programming," *Autom Constr*, 2024, doi: <https://doi.org/10.1061/JCEMD4.COENG-14817>.
- [7] Virender Phogat and Ajit Singh, "The impact of construction of hill roads on the environment, assessed using the multi-criteria approach," *Procedia Soc Behav Sci*, 2021, doi: 10.1016/j.sbspro.2021.04.072.
- [8] Santu Kar and Kumar Jha, "Assessing criticality of construction materials for prioritizing their procurement using ANP-TOPSIS," *International Journal of Construction Management*, 2022, doi: 10.1080/15623599.2021.1950894.
- [9] Olmedo-Navarro, "Fuzzy ANP for work-team evaluation," *Procedia Comput Sci*, 2023, doi: 10.1016/j.procs.2023.01.201.
- [10] Pitchipoo P and D. S. Vincent, "COPRAS Decision Model to Optimize Blind Spot in Heavy Vehicles: A Comparative Perspective," *Procedia Eng*, 2020, doi: 10.1016/j.proeng.2020.11.031.
- [11] Schulze-Gonzalez, "Clustering and reference value for assessing influence in analytic network process without pairwise comparison matrices: Study of 17 real cases," *Operations Research Perspectives*, 2023, doi: 10.1016/j.orp.2023.100275.

- [12] Naji and Gunduz M, "Assessment of Construction Project Contractor Selection Success Factors considering Their Interconnections," *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2022, doi: 10.1007/s12205-022-1377-6.
- [13] Babek Erdebilli and Ibrahim Yilmaz, "An Interval-Valued Pythagorean Fuzzy AHP and COPRAS Hybrid Methods for the Supplier Selection Problem," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 2023, doi: 10.1080/18756891.2023.2174601.
- [14] Mohammad Yazdani and Zhila Zaranj, "Measurement of noise pollution in Ardabil city using COPRAS model In order to improve the urban environment," *J Constr Eng Manag*, 2021, doi: 10.22034/jess.2022.332874.1742.
- [15] Sheikhhoshkar, "From process-based to technology-driven: a study on functionalities as key elements of collaborative planning methods for construction projects," *Autom Constr*, 2022, doi: <https://doi.org/10.1080/09537287.2024.2360581>.
- [16] Gunduz M and Khader B, "Construction Project Safety Performance Management Using Analytic Network Process (ANP) as a Multicriteria Decision-Making (MCDM) Tool," *Comput Intell Neurosci*, 2020, doi: 10.1155/2020/8873524.
- [17] Manuel Parente and Antonio Correia, "A Novel Integrated Optimization System for Earthwork Tasks," *Transportation Research Procedia*, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.428>.