

© Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi
Karya ini berada di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-BerbagiSerupa 4.0 Internasional
Terjemahan dari 10.22146/jnteti.v13i1.10906

Analisis AHP TOPSIS dalam Pemilihan Teknologi Pengolahan Sampah Berbasis Keadilan Energi

Miza Zuda Nurlael¹, Rudy Hartanto¹, Wing Wahyu Winarno¹, Irfan Budi Santoso²

¹ Departemen Teknik Elektro dan Teknologi Informasi, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada, Sleman, D.I. Yogyakarta 55281, Indonesia

² Dinas Komunikasi dan Informatika Kabupaten Bantul, Bantul, D.I. Yogyakarta 55711, Indonesia

[Diserahkan: 4 Januari 2024, Direvisi: 22 Februari 2024, Diterima: 14 Maret 2024]

Penulis Korespondensi: Rudy Hartanto (email: rudy@ugm.ac.id)

INTISARI — Peningkatan jumlah sampah sebesar 4,96% di Kabupaten Bantul terjadi dari tahun 2020 hingga 2021. Hal ini menyebabkan semakin berkurangnya kapasitas tempat pembuangan akhir (TPA) sampah di Kecamatan Piyungan, Kabupaten Bantul. Puncaknya terjadi pada tanggal 23 Juli 2023 sampai dengan 5 September 2023, yang mana TPA Piyungan tidak dapat melayani pembuangan sampah. Tingginya angka kemiskinan di Kabupaten Bantul memaksa pemerintah untuk mengolah sampah menjadi energi sebagai upaya pengelolaan sampah berkelanjutan. Namun, upaya ini terkendala penentuan teknologi yang sesuai karena banyaknya kriteria. Oleh karena itu, faktor kriteria keadilan energi perlu dipertimbangkan untuk menentukan teknologi dan upaya peningkatan kesejahteraan masyarakat Kabupaten Bantul. Penelitian ini bertujuan untuk menyajikan penilaian terhadap setiap alternatif teknologi pengolahan sampah menjadi energi dan memilih salah satu alternatif yang sesuai untuk pengelolaan sampah berkelanjutan di Kabupaten Bantul menggunakan kombinasi metode *analytic hierarchy process* (AHP) dan *technique for order preference by similarity to ideal solution* (TOPSIS) berbasis keadilan energi. AHP digunakan untuk menilai tingkat pentingnya setiap kriteria, sementara TOPSIS digunakan untuk menentukan alternatif yang optimal berdasarkan kriteria dengan mempertimbangkan *cost* dan *benefit*. Temuan dari penelitian ini menunjukkan bahwa nilai preferensi tiga alternatif adalah 0,579 untuk insenerasi, 0,414 untuk pirolisis, dan 0,341 untuk gasifikasi. Berdasarkan nilai preferensi tersebut, diketahui bahwa insenerasi merupakan alternatif teknologi nomor satu yang sesuai untuk diterapkan di Kabupaten Bantul, pirolisis dan gasifikasi sebagai opsi pilihan di urutan kedua dan ketiga.

KATA KUNCI — Pengelolaan Sampah Berkelanjutan, Sampah ke Energi, Keadilan Energi, AHP, TOPSIS.

I. PENDAHULUAN

Sampah kota sebagai akibat dari perkembangan kehidupan di perkotaan semakin bertambah dan mulai menimbulkan banyak masalah. Pada tahun 2021, Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bantul menyampaikan bahwa jumlah sampah mencapai 123.272,79 ton/tahun, terjadi kenaikan jumlah sebesar 4,96 % dari tahun 2020. Pertambahan jumlah sampah yang sangat cepat akibat urbanisasi ini memunculkan masalah ekonomi, lingkungan, dan sosial. Saat ini, di Kabupaten Bantul, sampah hanya dibuang secara langsung ke tempat pembuangan akhir (TPA) di Kecamatan Piyungan yang memiliki luas 12 hektar [1]. Namun, pada bulan Agustus 2023, kapasitas TPA Piyungan tidak dapat lagi menampung sampah, sehingga terjadi penutupan layanan pembuangan sampah. Dalam rangka penerapan pengelolaan sampah berkelanjutan dan upaya mengurangi angka kemiskinan, pemerintah daerah bermaksud mengolah sampah menjadi energi. Namun, pemerintah daerah mengalami kesulitan dalam menentukan teknologi yang sesuai karena banyaknya kriteria dan kepentingan pemangku kebijakan dalam mewujudkan keadilan energi bagi masyarakat Kabupaten Bantul.

Gagasan keadilan energi baru-baru ini menjadi topik penting yang digunakan secara luas di berbagai bidang penelitian. Keadilan dalam penggunaan energi dilakukan dengan mengintegrasikan prinsip moral dan sosial dalam membuat keputusan yang tidak condong ke satu pihak dalam kaitannya dengan proses produksi, distribusi, dan konsumsi energi. Hal ini bertujuan untuk memastikan pembagian biaya dan manfaat sistem energi yang adil [2]. Argumen mengenai kerangka kerja keadilan energi berpusat pada delapan kriteria: keadilan intragenerasi, tata kelola yang baik, pemerataan antargenerasi, ketersediaan, tanggung jawab, keberlanjutan, keterjangkauan, dan proses hukum [3].

Menurut buku yang diterbitkan oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia (KESDM RI), terdapat tiga teknologi pengolahan sampah menjadi energi, yaitu *incineration* (INC), *gasification* (GAS), dan *pyrolysis* (PYR) [4]. Mengingat banyaknya teknologi dan kriteria pemilihan teknologi, diperlukan pengambilan keputusan yang sesuai untuk memilih teknologi pengolahan sampah menjadi energi. Pemangku kebijakan perlu memperhatikan faktor seleksi, metode pembobotan kriteria, dan metode pengambilan keputusan yang ada pada penelitian sebelumnya.

Faktor-faktor pemilihan teknologi sampah menjadi energi banyak digunakan pada penelitian sebelumnya. Dari studi literatur bibliografi SCOPUS tahun 2019 hingga 2023, diperoleh 15 makalah [2], [5]–[18], yang selanjutnya dianalisis untuk mengetahui faktor kriteria pemilihan. Faktor kriteria pemilihan ini dibagi menjadi tujuh kategori, yaitu lingkungan, sosial, ekonomi, teknik, kesehatan, pekerjaan, dan keadilan energi. Faktor keadilan energi menjadi faktor yang selaras dengan kepentingan pembuat dalam upaya mengurangi angka kemiskinan. Penelitian sebelumnya mengkaji penggunaan faktor keadilan energi, namun hanya lima kriteria dalam faktor keadilan energi yang digunakan [2]. Kriteria keadilan energi secara konsep terdiri atas delapan kriteria [3], sehingga perlu diterapkan kriteria keadilan energi secara utuh dalam rangka mewujudkan prioritas kebijakan daerah dalam pemenuhan kebutuhan energi masyarakat sebagai upaya menurunkan angka kemiskinan di Kabupaten Bantul.

Metode pembobotan yang digunakan pada penelitian sebelumnya seperti metode *analytic hierarchy process* (AHP) [7]–[9]; *integrated determination of objective CRiteria weights* (IDOCRIW)-weighted [5]; *cross-entropy measure-based weight* (CEMBW) [10]; *interval-valued fuzzy decision making*

trial and evaluation laboratory (DEMATEL) [11]; multi-criteria hesitant fuzzy linguistic term set (MC-HFLTS) [12]; bobot entropy [13], [14]; cumulative prospect theory (CPT) [15]; best-worst method (BWM) [6], [16]; fuzzy DEMATEL [2]; dan dua penelitian tanpa metode pembobotan [17], [18]. Namun, setiap metode memiliki kekurangan, termasuk proses komputasi yang kompleks dan memakan waktu, serta ketergantungan pada data yang banyak pada metode CEMBW [10]. Keterbatasan dalam perbandingan antar kriteria dan skala prioritas ditentukan oleh subjektivitas pengambil keputusan merupakan kekurangan pada metode BWM [6], [16]. Metode IDOCRIW-weighted [5] juga memiliki keterbatasan, yaitu tidak konsisten dalam perbandingan berpasangan. Metode AHP paling banyak digunakan karena memiliki kelebihan pada struktur hierarki yang jelas, perbandingan berpasangan yang konsisten, dan adanya analisis sensitivitas. Metode ini dianggap paling sesuai untuk menentukan teknologi pengolahan sampah yang menghasilkan energi, dengan mempertimbangkan prioritas kepentingan pemangku kebijakan daerah.

Pada penelitian sebelumnya, metode *risk - multi objective optimization by ratio analysis and linear programming (R-MULTIMOOSRAL)*, *multi-attributive ideal-real comparative analysis (MAIRCA)*- *multi-attributive border approximation area comparison (MABAC)*, *stratified BWM (SBWM)*, *technique for order of preference by similarity to ideal solution (TOPSIS)*, *fuzzy simple additive weighting (SAW)*, *sustainability assessment of technologies (SAT)*, *preference ranking organization method for enrichment evaluations - interval 2-tuple linguistic integrated cloud (PROMETHEE-ITLIC)*, *interval-valued fuzzy TOPSIS*, dan *generalized orthopair fuzzy information- evaluation based on distance from average solution (GOFI-EDAS)* digunakan dalam pengambilan keputusan, dengan metode yang paling banyak digunakan adalah metode TOPSIS. Walaupun memiliki kekurangan pada subjektivitas dalam penentuan nilai alternatif, metode ini memiliki kelebihan seperti mengategorikan kriteria sebagai *cost* atau *benefit* dalam pengambilan keputusan dan konsep yang intuitif yaitu konsep perbandingan dengan solusi ideal untuk mengevaluasi alternatif, menentukan alternatif terbaik dengan mengukur jarak alternatif teknologi dengan solusi ideal, dan memberikan peringkat yang jelas dan terstruktur terhadap alternatif yang dievaluasi. Hal ini memudahkan pemangku kebijakan dalam memahami dan membandingkan alternatif satu sama lain berdasarkan peringkat yang diberikan.

Berdasarkan penjelasan di atas, faktor keadilan energi yang belum digunakan dalam menentukan teknologi pengolahan sampah untuk menghasilkan energi merupakan *gap* penelitian ini. Selain itu, tingkat kepentingan setiap kriteria pada faktor keadilan energi belum ditentukan pada penelitian sebelumnya [2]. Di antara delapan kriteria faktor keadilan energi, kategori kriteria yang sesuai dengan *cost* dan *benefit* belum ditentukan.

Makalah ini bertujuan untuk menginformasikan secara utuh konsep keadilan energi [3] dalam pemilihan teknologi pengolahan sampah menjadi energi dalam upaya mengurangi tingkat kemiskinan di Kabupaten Bantul dengan cara menentukan tingkat kepentingan kriteria menggunakan metode AHP. Selanjutnya, pendekatan TOPSIS digunakan untuk memastikan alternatif optimal berdasarkan kriteria yang mempertimbangkan *cost* dan *benefit*. Kontribusi penelitian ini antara lain memberikan informasi tentang tingkat kepentingan setiap kriteria keadilan energi dan penentuan alternatif terbaik

berdasarkan kategori *cost* dan *benefit* setiap kriteria. Pada makalah ini, hasil penelitian dipaparkan dalam empat bab, yaitu Pendahuluan, Metodologi, Hasil dan Pembahasan, serta Kesimpulan.

II. METODOLOGI

A. METODE PENGUMPULAN DATA

Pada tahap pengumpulan data penelitian, penulis melakukan studi pendahuluan untuk mengetahui informasi awal mengenai masalah dan fenomena yang terjadi melalui wawancara. Pengumpulan data selanjutnya dilakukan menggunakan metode pengisian kuesioner yang diberikan kepada para ahli pada organisasi perangkat daerah Pemerintah Kabupaten Bantul, yaitu Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bantul dan Unit Pelaksana Teknis Daerah Kebersihan, Persampahan dan Pertamanan Kabupaten Bantul. Penentuan para ahli ini didasarkan pada keahlian dan tugas yang berkaitan dengan pengelolaan sampah. Saat penelitian dilaksanakan, terdapat tiga ahli yang menangani pengelolaan sampah di Kabupaten Bantul.

Pertanyaan-pertanyaan pada kuesioner merujuk pada kriteria pada konsep keadilan energi [3]. Sesuai data yang dibutuhkan, format kuesioner yang digunakan dibagi menjadi tiga: data perbandingan kriteria, data perbandingan alternatif, dan data penilaian alternatif. Kuesioner untuk data perbandingan kriteria dan data perbandingan alternatif, penilaiannya didasarkan pada penilaian metode AHP [19]. Sementara itu, kuesioner untuk data penilaian alternatif menggunakan skala Likert dari skala 1–5 [20] dan penilaian kategori setiap kriteria berdasarkan *cost* dan *benefit*. Pengumpulan data yang terakhir menggunakan metode dokumenter yang diperoleh dari catatan dan sumber dokumen yang tersedia.

B. ALUR PENELITIAN

Penelitian ini mengikuti alur penelitian yang terstruktur untuk menganalisis faktor keadilan energi pada penentuan teknologi pengolahan sampah yang menghasilkan energi menggunakan kombinasi metode AHP TOPSIS. Gambar 1 menunjukkan alur penelitian yang dilakukan.

1) STUDI LITERATUR DAN PERUMUSAN MASALAH

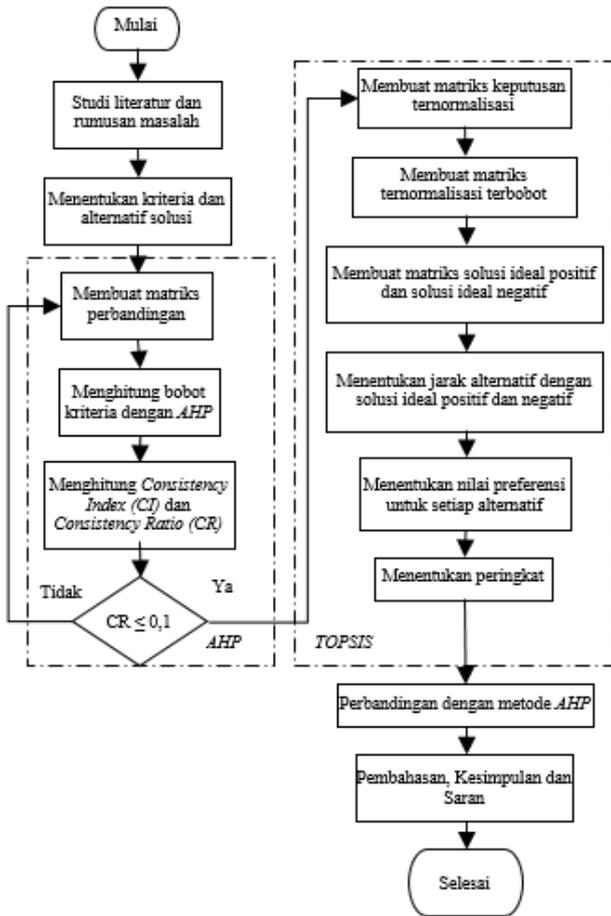
Studi literatur dilakukan untuk mengumpulkan data-data mengenai teknologi pengolahan sampah yang menghasilkan energi, pengelolaan sampah berkelanjutan, dan model pengambilan keputusan dengan banyak kriteria. Hasil penelusuran ini akan menjadi latar belakang penelitian dan digunakan sebagai landasan dalam menyusun perumusan masalah.

2) MENENTUKAN KRITERIA DAN ALTERNATIF SOLUSI

Penentuan kriteria pada penelitian ini didasarkan faktor keadilan energi [3]. Adapun alternatif solusi ditentukan terdiri atas tiga alternatif sesuai buku yang diterbitkan oleh KESDM RI [4].

3) MENYUSUN MATRIK PERBANDINGAN BERPASANGAN

Pada tahap ini, responden memberikan penilaian terhadap kriteria dengan cara membandingkan tingkat kepentingan kriteria berdasarkan skala. Skala yang digunakan adalah skala dari metode AHP, yaitu skala 1 menunjukkan kedua kriteria memiliki keunggulan yang setara, skala 3 menunjukkan satu kriteria memiliki sedikit keunggulan dibandingkan dengan kriteria yang lain, skala 5 menunjukkan satu kriteria memiliki tingkat keunggulan yang lebih tinggi dibanding kriteria



Gambar 1. Alur penelitian.

lainnya, skala 7 menunjukkan satu kriteria memiliki kepentingan yang sangat tinggi dibandingkan dengan kriteria lainnya, skala 9 menunjukkan satu kriteria secara mutlak lebih unggul dibandingkan dengan kriteria lainnya. Di sisi lain, skala 2, 4, 6, 8 menunjukkan nilai yang berada di antara dua nilai pertimbangan yang hampir sama; skala 1/(1-9) menunjukkan kebalikan nilai, apabila kriteria i memiliki nilai di atas kriteria j saat dibandingkan, maka kriteria j memiliki nilai 1 dibagi nilai kriteria i .

Perhitungan *geometric mean* seperti (1) digunakan dalam mencari nilai tengah dikarenakan jumlah responden yang banyak [21]. Hasil perhitungan tersebut kemudian digunakan dalam menyusun matriks perbandingan berpasangan.

$$GM = \sqrt[n]{x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 \cdot \dots \cdot x_n} \quad (1)$$

dengan GM merupakan *geometric mean*, n merupakan jumlah responden, x_1 merupakan responden ke-1, dan x_n merupakan responden ke- n .

4) MENGHITUNG BOBOT KRITERIA

Penghitungan bobot melibatkan penggabungan nilai dari masing-masing kolom dalam matriks perbandingan berpasangan. Selanjutnya, setiap nilai di kolom dibagi dengan nilai keseluruhan kolom terkait, sehingga didapatkan matriks yang ternormalisasi. Berikutnya, nilai pada setiap baris dijumlahkan, sebelum hasilnya dibagi dengan jumlah kriteria untuk memperoleh nilai tengah atau bobot.

5) MENGHITUNG KONSISTENSI INDEKS DAN RASIO

Langkah selanjutnya adalah menghitung *consistency index* (CI) dengan (2), berdasarkan nilai dari *eigenvalue* yang

TABEL I
NILAI *RANDOM INDEX* (RI)

Jumlah	1	2	3	4	5	6	7	8
Nilai RI	0,0	0,0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41

diperoleh dari perhitungan sebelumnya. Selanjutnya, *consistency ratio* (CR) ditentukan dengan menggunakan (3) untuk memastikan bahwa bobot yang akan dipakai konsisten. Adapun syarat dari perbandingan berpasangan yang konsisten adalah jika $CR \leq 0,1$. Nilai *random index* (RI) dapat dilihat dalam Tabel I [19].

$$CI = \frac{(\lambda_{max} - n)}{(n-1)} \quad (2)$$

dengan CI adalah indeks konsistensi, λ_{max} adalah *eigenvalue*, dan n adalah banyaknya elemen yang dibandingkan.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

dengan CR adalah *consistency ratio* dan RI adalah *random indeks*.

6) MENYUSUN MATRIK KEPUTUSAN TERNORMALISASI

Tahap ini merupakan langkah metode TOPSIS [22] dengan membuat matriks keputusan yang ternormalisasi menggunakan (4).

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (4)$$

dengan r_{ij} merupakan hasil dari normalisasi matriks keputusan r dengan $i = 1, 2, \dots, m$; dan $j = 1, 2, \dots, n$. x_{ij} merupakan nilai dari suatu alternatif (i) terhadap kriteria (j) dengan $i = 1, 2, \dots, m$ dan $j = 1, 2, \dots, n$.

7) MENYUSUN MATRIKS KEPUTUSAN TERNORMALISASI TERBOBOT

Bobot yang digunakan adalah bobot kriteria hasil perhitungan menggunakan metode AHP, sehingga perhitungan dilakukan dengan (5).

$$y_{ij} = w_j r_{ij} \quad (5)$$

dengan y_{ij} adalah elemen dari matriks keputusan yang ternormalisasi terbobot, w_j adalah bobot kriteria ke- j , dan r_{ij} adalah elemen dari matriks keputusan yang ternormalisasi.

8) MENYUSUN MATRIKS SOLUSI IDEAL POSITIF DAN SOLUSI IDEAL NEGATIF.

Matriks solusi ideal positif adalah matriks yang memuat nilai maksimum untuk setiap kriteria dengan (6), sedangkan matriks solusi ideal negatif adalah matriks yang memuat nilai minimum untuk setiap kriteria dengan (7).

$$A^+ = (y_1^+, y_2^+, \dots, y_n^+) \quad (6)$$

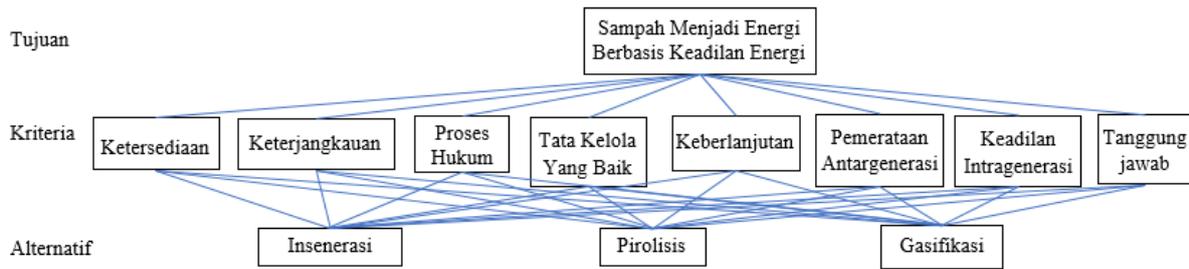
dengan A^+ adalah solusi ideal positif, y_i^+ adalah nilai tertinggi dari matriks keputusan yang ternormalisasi terbobot.

$$A^- = (y_1^-, y_2^-, \dots, y_n^-) \quad (7)$$

dengan A^- adalah solusi ideal negatif, y_i^- adalah nilai terendah dari matriks keputusan yang ternormalisasi terbobot.

9) MENENTUKAN JARAK ANTARA NILAI ALTERNATIF DENGAN SOLUSI IDEAL POSITIF DAN NEGATIF.

Pada langkah ini, setiap alternatif dibandingkan dengan kedua solusi ideal untuk menentukan selisih minimal setiap alternatif mendekati solusi ideal positif dengan (8) dan selisih maksimal setiap alternatif menjauhi solusi ideal negatif dengan (9).



Gambar 2. Bagan hierarki pemilihan teknologi pengolahan sampah menjadi energi.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_i^+)^2}; i = 1, 2, \dots, m \quad (8)$$

dengan S_i^+ merupakan jarak alternatif i dengan solusi ideal positif pada kriteria j .

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (y_{ij} - y_i^-)^2}; i = 1, 2, \dots, m \quad (9)$$

dengan S_i^- merupakan jarak alternatif i dengan solusi ideal negatif pada kriteria j .

10) MENENTUKAN NILAI PREFERENSI UNTUK SETIAP ALTERNATIF.

Nilai preferensi ini digunakan untuk mengurutkan alternatif berdasarkan tingkat kecocokannya dengan solusi ideal positif. Nilai preferensi dapat dihitung dengan (10).

$$C_i = \frac{s_i^-}{s_i^- + s_i^+} \quad (10)$$

dengan C_i adalah nilai preferensi.

11) MENENTUKAN PERINGKAT

Alternatif dengan C_i tertinggi merupakan solusi prioritas utama; semakin besar nilai indeks, semakin baik kinerja alternatif tersebut.

C. PERBANDINGAN HASIL PERHITUNGAN KOMBINASI METODE AHP DAN TOPSIS DENGAN METODE AHP

Pada penelitian ini, hasil perhitungan metode AHP dan TOPSIS dibandingkan dengan perhitungan metode AHP. Dengan membandingkan dan menganalisis penggunaan metode yang berbeda, peneliti dapat memperoleh pemahaman yang lebih dalam mengenai keandalan dan meningkatkan perhitungan dalam menentukan hasil yang sesuai dengan konteks penelitian ini.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. PENENTUAN KRITERIA DAN ALTERNATIF

Kriteria keadilan energi yang digunakan meliputi ketersediaan (K1), keterjangkauan (K2), proses hukum (K3), tata kelola yang baik (K4), keberlanjutan (K5), pemerataan antargenerasi (K6), keadilan intragenerasi (K7), tanggung jawab (K8) [3]. Adapun alternatif teknologi meliputi insenerasi (P1), pirolisis (P2), dan gasifikasi (P3) [4]. Gambar 2 menunjukkan hubungan antara tujuan, kriteria, dan alternatif dalam bentuk bagan berdasarkan hierarki fungsional.

B. PENGUMPULAN DATA

Data yang digunakan untuk proses analisis dan perhitungan diperoleh dari pengisian kuesioner oleh para ahli pada instansi daerah di Kabupaten Bantul yang menangani lingkungan hidup. Adapun para ahli dimaksud adalah: 1) Kepala Bidang Pengelolaan Sampah dan Peningkatan Kapasitas Lingkungan

TABEL II
NILAI PERBANDINGAN BERPASANGAN DAN PEMBOBOTAN KRITERIA

Kriteria	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	Bobot
K1	1,00	1,74	0,33	0,58	0,58	2,08	2,08	0,87	0,12
K2	0,58	1,00	0,87	0,69	1,00	2,08	2,08	0,48	0,12
K3	3,00	1,14	1,00	1,44	2,47	1,19	1,19	1,00	0,18
K4	1,71	1,44	0,69	1,00	1,00	2,08	2,62	1,00	0,15
K5	1,71	1,00	0,41	1,00	1,00	1,44	1,82	2,29	0,14
K6	0,48	0,48	0,84	0,48	0,69	1,00	0,91	1,00	0,08
K7	0,48	0,48	0,84	0,38	0,55	1,10	1,00	1,44	0,09
K8	1,14	2,08	1,00	1,00	0,44	1,00	0,69	1,00	0,12

Hidup, 2) Kepala Unit Pelaksana Teknis Daerah Kebersihan, Persampahan Dan Pertamanan, dan 3) Sub koordinator Penanganan Sampah. Data yang diperoleh terbagi menjadi tiga data, yaitu data perbandingan kriteria, data perbandingan alternatif, dan data penilaian alternatif.

Pada data penilaian alternatif, responden A memberikan kategori untuk kriteria K1 sebagai *benefit*, K2 sebagai *cost*, K3 sebagai *cost*, K4 sebagai *cost*, K5 sebagai *benefit*, K6 sebagai *benefit*, K7 sebagai *benefit*, K8 sebagai *cost*. Responden B memberikan kategori untuk kriteria K1 sebagai *benefit*, K2 sebagai *benefit*, K3 sebagai *cost*, K4 sebagai *cost*, K5 sebagai *benefit*, K6 sebagai *benefit*, K7 sebagai *benefit*, K8 sebagai *cost*. Responden C memberikan kategori untuk kriteria K1 sebagai *benefit*, K2 sebagai *cost*, K3 sebagai *benefit*, K4 sebagai *benefit*, K5 sebagai *benefit*, K6 sebagai *benefit*, K7 sebagai *benefit*, K8 sebagai *cost*.

C. ANALISIS DATA DENGAN METODE AHP

Data yang telah diperoleh dari hasil pengisian kuesioner oleh para ahli dianalisis sesuai dengan alur penelitian.

1) NILAI PERBANDINGAN BERPASANGAN DAN BOBOT KRITERIA

Perbandingan berpasangan untuk kriteria dihitung berdasarkan *geometric mean* dari tiga nilai responden yang diambil dari data perbandingan kriteria. Tabel II menerangkan hasil perhitungan matriks perbandingan berpasangan dengan bobot masing-masing kriteria. Kriteria proses hukum memiliki bobot tertinggi dengan nilai 0,18 dan kriteria pemerataan antargenerasi memiliki bobot terendah dengan nilai 0,08. Kriteria tata kelola yang baik menempati urutan kedua dengan nilai 0,15, kriteria keberlanjutan menempati urutan ketiga dengan nilai 0,14, kriteria ketersediaan, keterjangkauan, dan tanggung jawab berada pada urutan keempat yang memiliki bobot nilai sama yaitu 0,12, dan kriteria keadilan intragenerasi menempati urutan kelima dengan nilai 0,09.

Faktor yang mempengaruhi bobot kriteria proses hukum memiliki bobot terbesar adalah keunggulan nilai kriteria proses

TABEL III
NILAI CI DAN CR

Faktor Keadilan Energi	λ_{max}	CI	CR
	8,6419171	0,0917024	0,0650372

TABEL IV
Matriks Keputusan Ternormalisasi

Kriteria	Responden								
	A			B			C		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
K1	0,685	0,514	0,514	0,639	0,426	0,639	0,727	0,485	0,485
K2	0,577	0,577	0,577	0,742	0,371	0,557	0,577	0,577	0,577
K3	0,624	0,468	0,624	0,468	0,624	0,624	0,685	0,514	0,514
K4	0,624	0,624	0,468	0,742	0,371	0,557	0,577	0,577	0,577
K5	0,685	0,514	0,514	0,624	0,624	0,468	0,685	0,514	0,514
K6	0,685	0,514	0,514	0,577	0,577	0,577	0,742	0,557	0,371
K7	0,577	0,577	0,577	0,624	0,624	0,468	0,577	0,577	0,577
K8	0,577	0,577	0,577	0,514	0,514	0,685	0,685	0,514	0,514

hukum dibandingkan dengan empat kriteria lainnya yaitu unggul dari kriteria tata kelola yang baik, keberlanjutan, pemerataan antargenerasi, dan keadilan intragenerasi. Sedangkan hal yang mempengaruhi bobot kriteria pemerataan antargenerasi memiliki bobot terendah adalah nilai kriteria pemerataan antargenerasi kalah dibandingkan dengan lima kriteria lainnya yaitu kriteria ketersediaan, keterjangkauan, proses hukum, tata kelola yang baik, dan keberlanjutan. Selanjutnya nilai bobot kriteria ini digunakan untuk menghitung penentuan alternatif dengan metode TOPSIS. Nilai bobot ini dihitung konsistensinya dengan menggunakan CI dan CR.

2) HASIL PERHITUNGAN CI DAN CR

Tabel III menunjukkan hasil perhitungan dalam menentukan nilai CI dan CR. Berdasarkan ketentuan $CR \leq 0,1$, maka CR 0,0650372 pada Tabel III memenuhi syarat konsistensi untuk matriks perbandingan berpasangan kriteria dan bobot kriteria dapat digunakan untuk perhitungan.

D. ANALISIS DATA DENGAN METODE TOPSIS

Langkah selanjutnya adalah menerapkan metode TOPSIS untuk menentukan alternatif terbaik. Data perbandingan alternatif tiga responden tidak dapat digunakan secara bersamaan dengan menggunakan nilai tengah sebagai data yang akan dianalisis karena setiap kriteria memiliki kategori *cost* dan *benefit*. Pengkategorian kriteria menggunakan *cost* dan *benefit* berpengaruh pada perhitungan solusi ideal positif dan negatif. Oleh karena itu, data penilaian alternatif dari setiap responden dihitung secara individual untuk mendapatkan nilai yang menunjukkan preferensi dari setiap alternatif yang tersedia.

1) MATRIKS KEPUTUSAN TERNORMALISASI

Tabel IV menunjukkan matriks keputusan yang ternormalisasi dari hasil analisis dan perhitungan data penilaian alternatif. Hasil komputasi diperoleh dengan membagi nilai setiap alternatif untuk setiap kriteria dengan nilai alternatif keseluruhan yang sesuai dengan setiap kriteria.

2) MATRIKS KEPUTUSAN TERNORMALISASI TERBOBOT

Tabel V menunjukkan hasil perkalian bobot setiap kriteria dengan nilai keputusan ternormalisasi pada Tabel IV. Hal ini dilakukan untuk menentukan matriks keputusan ternormalisasi terbobot. Bobot kriteria proses hukum merupakan bobot

TABEL V
Matriks Keputusan Ternormalisasi Terbobot

Kriteria	Responden								
	A			B			C		
	P1	P2	P3	P1	P2	P3	P1	P2	P3
K1	0,080	0,060	0,060	0,075	0,050	0,075	0,085	0,057	0,057
K2	0,067	0,067	0,067	0,087	0,043	0,065	0,067	0,067	0,067
K3	0,111	0,083	0,111	0,083	0,111	0,111	0,122	0,091	0,091
K4	0,094	0,094	0,071	0,112	0,056	0,084	0,087	0,087	0,087
K5	0,098	0,073	0,073	0,089	0,089	0,067	0,098	0,073	0,073
K6	0,057	0,043	0,043	0,048	0,048	0,048	0,062	0,046	0,031
K7	0,050	0,050	0,050	0,054	0,054	0,041	0,050	0,050	0,050
K8	0,069	0,069	0,069	0,061	0,061	0,082	0,082	0,061	0,061

TABEL VI
Solusi Ideal Positif dan Solusi Ideal Negatif

Kriteria	Responden					
	A		B		C	
	y_j^+	y_j^-	y_j^+	y_j^-	y_j^+	y_j^-
K1	0,080	0,060	0,075	0,050	0,085	0,057
K2	0,067	0,067	0,087	0,043	0,067	0,067
K3	0,083	0,111	0,083	0,111	0,122	0,091
K4	0,071	0,094	0,056	0,112	0,087	0,087
K5	0,098	0,073	0,089	0,067	0,098	0,073
K6	0,057	0,043	0,048	0,048	0,062	0,031
K7	0,050	0,050	0,054	0,041	0,050	0,050
K8	0,069	0,069	0,061	0,082	0,061	0,082

tertinggi dengan nilai 0,18, hal ini menyebabkan nilai pada K3 memiliki nilai tertinggi dengan rentang 0,083 sampai dengan 0,122. Namun nilai ini tidak menentukan nilai preferensi akhir untuk setiap alternatif karena kategori *cost* dan *benefit* untuk setiap kriteria dipertimbangkan dalam perhitungan solusi ideal positif dan negatif.

3) SOLUSI IDEAL POSITIF DAN SOLUSI IDEAL NEGATIF

Pada tahap ini kategori *cost* dan *benefit* dari masing-masing kriteria menentukan nilai maksimum dan minimum dari matriks keputusan ternormalisasi terbobot, yang akan digunakan pada penentuan solusi ideal positif dan negatif. Tabel VI menyajikan nilai setiap solusi ideal untuk setiap kriteria yang dihasilkan dari analisis data responden.

Tabel VI menunjukkan data penilaian alternatif. Kategori *benefit* menentukan y_j^+ atau solusi ideal positif dengan nilai tertinggi dari nilai y_{ij} , sedangkan y_j^- atau solusi ideal negatif merupakan nilai terendah dari nilai y_{ij} . Kategori *cost* menentukan y_j^+ sebagai nilai terendah dari nilai y_{ij} dan y_j^- sebagai nilai tertinggi dari nilai y_{ij} .

4) JARAK ALTERNATIF TERHADAP SOLUSI IDEAL POSITIF DAN NEGATIF

Tabel VII menyajikan hasil perhitungan jarak alternatif dengan solusi ideal. Hasil tersebut diperoleh dari akar kuadrat dari jumlah setiap nilai ternormalisasi terbobot dikurangi kuadrat dari solusi ideal positif dan negatif. Untuk responden 1, P1 memiliki jarak terdekat dari S_i^+ dengan nilai 0,036 dan memiliki jarak terjauh dari S_i^- dengan nilai 0,034. Untuk responden 2, P1 dan P2 memiliki jarak yang sama terhadap S_i^+ dengan nilai 0,056 dan P1 memiliki jarak terjauh dari S_i^- dengan nilai 0,066. Untuk responden 3, P1 memiliki jarak terdekat dari S_i^+ dengan nilai 0,020 dan memiliki jarak terjauh dari S_i^- dengan nilai 0,057. Perbedaan jarak di atas dikarenakan

TABEL VII
JARAK ALTERNATIF TERHADAP SOLUSI IDEAL POSITIF DAN SOLUSI IDEAL NEGATIF

Alternatif	Responden					
	A		B		C	
	S_i^+	S_i^-	S_i^+	S_i^-	S_i^+	S_i^-
P1	0,036	0,034	0,056	0,066	0,020	0,057
P2	0,042	0,027	0,057	0,065	0,050	0,025
P3	0,044	0,023	0,056	0,043	0,057	0,020

TABEL VIII
NILAI PREFERENSI BERDASARKAN GEOMETRIC MEAN

Alternatif	Nilai Preferensi Responden			Geometric Mean	Peringkat
	A	B	C		
P1	0,487	0,540	0,736	0,579	1
P2	0,398	0,532	0,335	0,414	2
P3	0,347	0,436	0,263	0,341	3

TABEL IX
BOBOT ALTERNATIF PADA SETIAP KRITERIA DAN NILAI CR, PREFERENSI DAN PERINGKAT

	Kriteria								Preferensi	Peringkat
	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8		
P1	0,51	0,35	0,31	0,50	0,48	0,33	0,38	0,30	0,39	1
P2	0,20	0,34	0,30	0,26	0,19	0,37	0,25	0,30	0,27	3
P3	0,29	0,31	0,41	0,23	0,30	0,31	0,33	0,43	0,32	2
CR	0,06	0,09	0,07	0,04	-	0,03	-	0,09		

perbedaan cara pandang responden dalam mengategorikan kriteria yang berpengaruh pada penentuan jarak alternatif dengan solusi ideal.

5) NILAI PREFERENSI DAN PEMERINGKATAN

Tabel VIII menyajikan nilai preferensi dari hasil analisis. Nilai tengah dari tiga nilai preferensi dihitung dengan menggunakan *Geometric mean*, selanjutnya nilai tersebut diurutkan berdasarkan peringkat dari terbesar sampai terkecil. P1 berada di urutan pertama dengan nilai preferensi 0,579 diikuti P2 dengan nilai 0,414, dan P3 dengan nilai 0,341.

Metode TOPSIS memiliki kelebihan seperti kemampuan untuk mengategorikan *cost* dan *benefit* untuk setiap kriteria, pengkategorian ini mempengaruhi penentuan alternatif ideal positif dan negatif. Namun, berdasarkan hasil wawancara saat pengumpulan data menggunakan kuisioner, responden mengalami kendala dalam memberikan nilai terhadap satu alternatif yang sedikit lebih unggul dibandingkan alternatif lainnya karena skala hanya memiliki nilai 1-5. Responden memberikan nilai yang sama pada alternatif memiliki nilai yang berbeda. Berdasarkan informasi dari responden tersebut, dilakukan uji coba perhitungan dengan nilai sama pada tiga kriteria untuk semua alternatif. Berdasarkan hasil uji coba, diidentifikasi keterbatasan metode TOPSIS. Secara spesifik, metode TOPSIS memberikan nilai 0 untuk jarak setiap alternatif terhadap solusi ideal. Akibatnya perhitungan nilai preferensi bernilai 0, yang mengidentifikasi metode TOPSIS tidak dapat menentukan alternatif terbaik dari alternatif yang ada.

E. PERBANDINGAN HASIL PERHITUNGAN KOMBINASI METODE AHP DAN TOPSIS DENGAN METODE AHP

Perbandingan hasil perhitungan diperlukan untuk memberikan penjelasan yang mendalam akan metode yang dipilih dalam penelitian. Tabel IX menunjukkan hasil pengolahan data perbandingan alternatif menggunakan metode AHP dengan menghitung bobot masing-masing alternatif pada

setiap kriteria. Pemilihan alternatif dilakukan dengan cara mengalikan bobot setiap alternatif untuk setiap kriteria dengan bobot setiap kriteria sesuai Tabel II dan menjumlahkannya untuk menentukan nilai preferensi dari setiap alternatif. P1 memperoleh preferensi tertinggi dengan nilai 0,39, diikuti P3 dengan nilai 0,32. Sementara itu, P2 menduduki peringkat ketiga dengan nilai 0,27 (Tabel IX).

Perhitungan dengan menggunakan kombinasi metode AHP dan TOPSIS menunjukkan bahwa insenerasi, pirolisis dan gasifikasi adalah pilihan alternatif terbaik. Di sisi lain, menurut perhitungan menggunakan metode AHP diketahui bahwa pilihan alternatif terbaik adalah insenerasi, gasifikasi dan pirolisis. Kedua metode tersebut menempatkan insenerasi sebagai alternatif teknologi terbaik, namun terdapat perbedaan pada urutan kedua dan ketiga.

Keuntungan menggunakan TOPSIS untuk karena TOPSIS mengklasifikasikan kategori dari setiap kriteria berdasarkan sifat kriteria, seperti pada kategori *cost* dan *benefit*. Hal ini menghasilkan perbedaan pilihan alternatif pada urutan kedua dan ketiga jika dibandingkan dengan hasil perhitungan menggunakan metode AHP saja. Keterbatasan metode AHP adalah tidak memperhatikan kategori *cost* dan *benefit* untuk menilai kriteria, sehingga kriteria dengan kategori *cost* yang memiliki nilai tinggi pada metode ini akan dapat memberikan kesalahan. Berdasarkan hal tersebut, hasil pemilihan alternatif menggunakan metode AHP dirasa kurang sesuai. Penggunaan TOPSIS pada penelitian ini dapat melengkapi dari AHP dalam pemilihan alternatif.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menjelaskan penggunaan kriteria pemilihan teknologi pengolahan sampah menjadi energi sesuai faktor keadilan energi. Penggunaan kombinasi metode AHP dan TOPSIS dalam penelitian ini telah menunjukkan bahwa hasil pembobotan kriteria menggunakan metode AHP memiliki penilaian yang kuat dengan adanya konsistensi rasio sebagai validitas hasil perhitungan. Penggunaan metode TOPSIS merupakan metode yang tepat untuk melengkapi kekurangan dari metode AHP dalam memberikan kategori *cost* dan *benefit* pada setiap kriteria. TOPSIS juga memberikan rekomendasi alternatif terbaik yaitu dengan merekomendasikan alternatif yang memiliki jarak paling dekat terhadap alternatif ideal positif. Perhitungan uji coba dengan menggunakan nilai alternatif yang sama pada tiga kriteria menunjukkan adanya keterbatasan dari metode TOPSIS. Keterbatasan tersebut adalah keterbatasan responden dalam memberikan nilai pada alternatif yang memiliki sedikit kelebihan dibandingkan alternatif lainnya. Penilaian menggunakan skala penilaian 1-5, sehingga untuk penelitian selanjutnya diharapkan dapat menggunakan skala penilaian dengan angka desimal untuk memudahkan responden dalam menilai dua alternatif yang terlihat sama namun memiliki keunggulan yang berbeda.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan.

KONTRIBUSI PENULIS

Topik, Rudy Hartanto; Konseptualis, Miza Zuda Nurlael; Metodologi, Miza Zuda Nurlael, Irfan Budi Santoso; data analisis, Miza Zuda Nurlael, Rudy Hartanto, Wing Wahyu Winarno; penulisan Miza Zuda Nurlael.

REFERENSI

- [1] "Laporan Kinerja 2021," Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Bantul, 2022, [Online], <https://dlh.bantulkab.go.id/storage/dlh/document/18/Laporan-Kinerja-DLH--Tahun-2021.pdf>
- [2] A. Fetanat, H. Mofid, M. Mehrannia, dan G. Shafipour, "Informing energy justice based decision-making framework for waste-to-energy technologies selection in sustainable waste management: A case of Iran," *J. Clean. Prod.*, vol. 228, hal. 1377–1390, Agu. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.04.215.
- [3] B.K. Sovacool dan M.H. Dworkin, "Energy justice: Conceptual insights and practical applications," *Appl. Energy*, vol. 142, hal. 435–444, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.01.002.
- [4] "Buku Panduan Sampah Menjadi Energi," Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2015, [Online], <https://ebtke.esdm.go.id/post/2016/05/08/1221/buku.panduan.sampah.menjadi.energi>
- [5] M.A. Alao, O.M. Popoola, dan T.R. Ayodele, "Selection of waste-to-energy technology for distributed generation using IDOCRIW-weighted TOPSIS method: A case study of the City of Johannesburg, South Africa," *Renew. Energy*, vol. 178, hal. 162–183, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.renene.2021.06.031.
- [6] A.E. Torkayesh, B. Malmir, dan M.R. Asadabadi, "Sustainable waste disposal technology selection: The stratified best-worst multi-criteria decision-making method," *Waste Manag.*, vol. 122, hal. 100–112, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2020.12.040.
- [7] M.G. Kharat dkk., "Fuzzy multi-criteria decision analysis for environmentally conscious solid waste treatment and disposal technology selection," *Technol. Soc.*, vol. 57, pp. 20–29, May 2019, doi: 10.1016/j.techsoc.2018.12.005.
- [8] S.A. Mousavi, A. Hafezalkotob, V. Ghezavati, dan F. Abdi, "An integrated framework for new sustainable waste-to-energy technology selection and risk assessment: An R-TODIM-R-MULTIMOOSRAL approach," *J. Clean. Prod.*, vol. 335, hal. 1–24, Feb. 2022, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.130146.
- [9] S. Afrane dkk., "Integrated AHP-TOPSIS under a fuzzy environment for the selection of waste-to-energy technologies in Ghana: A performance analysis and socio-enviro-economic feasibility study," *Int. J. Environ. Res. Public Health*, vol. 19, no. 14, hal. 1–31, Jul. 2022, doi: 10.3390/ijerph19148428.
- [10] X.-H. Pan, S.-F. He, Y.-M. Wang, dan K.-S. Chin, "Multi-granular hybrid information-based decision-making framework and its application to waste to energy technology selection," *Inf. Sci.*, vol. 587, hal. 450–472, Mar. 2022, doi: 10.1016/j.ins.2021.12.034.
- [11] H. Li dkk., "Establishing an interval-valued fuzzy decision-making method for sustainable selection of healthcare waste treatment technologies in the emerging economies," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 22, no. 2, hal. 501–514, Mar. 2020, doi: 10.1007/s10163-019-00943-0.
- [12] T. Adar dan E.K. Delice, "New integrated approaches based on MC-HFLTS for healthcare waste treatment technology selection," *J. Enterpr. Inf. Manag.*, vol. 32, no. 4, hal. 688–711, Jun. 2019, doi: 10.1108/JEIM-10-2018-0235.
- [13] M.A. Alao, T.R. Ayodele, A.S.O. Ogunjuyigbe, dan O.M. Popoola, "Multi-criteria decision based waste to energy technology selection using entropy-weighted TOPSIS technique: The case study of Lagos, Nigeria," *Energy*, vol. 201, hal. 1–14, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117675.
- [14] R. Krishankumar dkk., "A new decision model with integrated approach for healthcare waste treatment technology selection with generalized orthopair fuzzy information," *Inf. Sci.*, vol. 610, hal. 1010–1028, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.ins.2022.08.022.
- [15] Q. Mao dkk., "Selection of plastic solid waste treatment technology based on cumulative prospect theory and fuzzy DEMATEL," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 30, no. 14, hal. 41505–41536, Mar. 2023, doi: 10.1007/s11356-022-25004-2.
- [16] R.-L. Huang dkk., "Cloud decision support framework for treatment technology selection of health-care waste," *J. Intell. Fuzzy Syst.*, vol. 42, no. 6, hal. 5565–5590, Apr. 2022, doi: 10.3233/JIFS-212065.
- [17] A. Rafiee dkk., "Assessment and selection of the best treatment alternative for infectious waste by modified sustainability assessment of technologies methodology," *J. Environ. Health Sci. Eng.*, vol. 14, no. 1, hal. 1–14, Des. 2016, doi: 10.1186/s40201-016-0251-1.
- [18] S.I. Ahmad dkk., "Development of quantitative SHE index for waste to energy technology selection," *Energy*, vol. 191, hal. 1–9, Jan. 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116534.
- [19] R.W. Saaty, "The analytic hierarchy process-what it is and how it is used," *Math. Model.*, vol. 9, no. 3–5, hal. 161–176, 1987, doi: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.
- [20] R. Likert, "A Technique for the Measurement of Attitudes," *Archives Psychol.*, vol. 22, no. 140, pp. 5–55, 1932.
- [21] Sudarman, *Pengantar Statistik Pendidikan*. Samarinda, Indonesia: Mulawarman University Press, 2015.
- [22] W.E. Sari, Muslimin B., dan S. Rani, "Perbandingan metode SAW dan TOPSIS pada sistem pendukung keputusan seleksi penerima beasiswa," *J. Sisfokom (Sist. Inf. Komput.)*, vol. 10, no. 1, hal. 52–58, Mar. 2021, doi: 10.32736/sisfokom.v10i1.1027.