

Multi Criteria Decision Making pada Strategi Pengolahan Sampah Padat Perkotaan

Yosef Adicita[#], Muhammad Rizki Apritama, Anshah Silmi Afifah

Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Universal Batam
Sei Panas, Batam Kota, Batam 2944, Indonesia

[#]Yosef.cita@gmail.com

Abstrak

Penyebab ketidakefektifan sistem pengolahan sampah perkotaan adalah kurangnya pemahaman dan kedisiplinan dalam teknik pengolahan yang sesuai dengan jenis timbulan sampah yang dihasilkan setiap harinya dan peningkatan populasi yang berbanding lurus dengan peningkatan aktivitas dan timbulan limbah padat yang dihasilkan. Permasalahan ini sering ditemukan di daerah perkotaan di Indonesia dan salah satunya adalah Kota Batam. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menentukan teknik pengolahan yang paling ideal untuk sampah padat yang dihasilkan penduduk di Kota Batam dengan merumuskan lima skenario teknik pengolahan sampah menggunakan *Multi Criteria Decision Making* (MCDM), *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE), dan *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS). Kelompok kriteria yang digunakan dalam penelitian ini adalah teknologi, lingkungan, ekonomi, dan sosial dengan jumlah total kriteria adalah 28 kriteria. Berdasarkan hasil analisis, skenario pengolahan sampah paling ideal untuk Kota Batam adalah pengolahan dengan cara 50% *sanitary landfill* dan 50% insenerasi yang diperoleh dari PROMETHEE, 100% *sanitary landfill* diperoleh dari TOPSIS.

Kata kunci: pengolahan sampah, MCDM, PROMETHEE, TOPSIS

Abstract

The causes of the ineffectiveness of urban waste treatment system are the lack of understanding and discipline in processing techniques that correspond to the type of garbage generated daily and the increase in population directly proportional to the increase in activity and the arising of solid waste produced, these problems often found in Indonesia and one of them is Batam city. Therefore, this research aims to determine the most ideal disposal techniques for municipal waste produced by residents in Batam City. Five scenarios of disposal techniques were evaluated by Multi-Criteria Decision Making (MCDM), Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations (PROMETHEE), and Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). The criteria groups used in this study are technological, environmental, economic, and social with 28 total criteria. Based on the results of the analysis, the most ideal scenario of disposal technique for Batam City is 50% sanitary landfill and 50% incineration obtained from PROMETHEE, 100% sanitary landfill obtained from TOPSIS.

Keywords: solid waste disposal, MCDM, PROMETHEE, TOPSIS

I. PENDAHULUAN

Limbah padat perkotaan atau yang biasa disebut dengan sampah padat perkotaan merupakan salah satu permasalahan penting karena berakibat pada kesehatan dan lingkungan. Manajemen pengelolaan limbah padat perkotaan yang bertujuan untuk melindungi kesehatan masyarakat dan lingkungan serta konservasi sumber daya merupakan salah satu cara untuk mengatasi permasalahan tersebut [1]. Tetapi, hal ini masih memiliki banyak kekurangan

seperti perancangan dan perencanaan pengelolaan limbah yang kurang baik terutama pada sistem pengolahan. Kurangnya pemahaman dan kedisiplinan dalam teknik pengolahan limbah yang sesuai dengan jenis timbulan sampah yang dihasilkan setiap harinya adalah salah satu faktor ketidakefektifan sistem pengolahan sampah. Selain itu juga, peningkatan populasi yang berbanding lurus dengan peningkatan aktivitas dan timbulan limbah padat yang dihasilkan setiap harinya mengakibatkan sistem pengolahan sampah yang

sudah ada menjadi kurang efektif untuk digunakan. Di Indonesia, manajemen pengelolaan sampah terutama sampah yang dihasilkan dari kegiatan harian diatur oleh masing-masing daerah sehingga tidak ada standar regulasi nasional yang jelas untuk pengelolaan sampah padat perkotaan [1]. Timbulan sampah di Kota Batam mengalami peningkatan setiap tahunnya. Berdasarkan data Dinas Kebersihan dan Pertamanan (DKP) Kota Batam, timbulan sampah meningkat hingga dua kali lipat selama kurang lebih 8 tahun yaitu dari 208.000 menjadi 432.000 pada tahun 2006 hingga 2014, dengan pertumbuhan penduduk dari 95.000 jiwa menjadi 114.000 jiwa. Pada tahun 2019, timbulan sampah di Kota Batam sudah mencapai 1.000 ton/hari dengan jumlah penduduk adalah 137.000 jiwa. Jumlah timbulan sampah ini mengakibatkan sistem pengolahan sampah yang berada di TPA Telaga Punggur menjadi kurang efektif dan kritis lahan untuk pengolahan karena tidak mampung menampung sampah yang mengalami peningkatan. Pengolahan sampah yang dilakukan di TPA ini hanya berfokus pada *controlled landfill*.

Penelitian mengenai manajemen sampah padat kota telah banyak dilakukan dengan metode seperti *Life Cycle Assessment* (LCA), *Multi Criteria Decision Making* (MCDM), *Risk Assessment*, *Cost Benefit Analysis* (CBA), *benchmarking*, hingga menggunakan kombinasi metode dengan yang paling sering digunakan adalah LCA, *benchmarking*, dan MCDM [2]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh [3], tantangan utama dalam pengelolaan sampah padat kota adalah *waste generation*, pengumpulan, transportasi, pengolahan, dan pembuangan sampah, sedangkan prioritas utama dari manajemen sampah kota yang berkelanjutan adalah mengubah manajemen pengelolaan yang memakan banyak biaya dan berbahaya bagi lingkungan menjadi pengelolaan yang efektif dan efisien baik secara ekonomi maupun secara lingkungan [3]. Penggunaan MCDM pada beberapa tahun terakhir ini menjadi populer dalam menentukan strategi manajemen sampah pada kota seperti menentukan teknik pengolahan sampah di tempat pembuangan terakhir, strategi secara keseluruhan hirarki manajemen sampah serta lokasi pengolahan. Penerapan MCDM dalam menentukan strategi dalam manajemen pengelolaan sampah pada kota dibutuhkan dan cocok digunakan karena dalam manajemen suatu permasalahan yang kompleks diperlukan metode yang dapat menilai semua aspek yang dibutuhkan seperti administrasi, finansial, legalitas, dan perencanaan [4]. Berdasarkan [5], menerapkan MCDM untuk menentukan pengolahan ideal bagi sampah kota di Istanbul, Turkey. Hasil penelitian

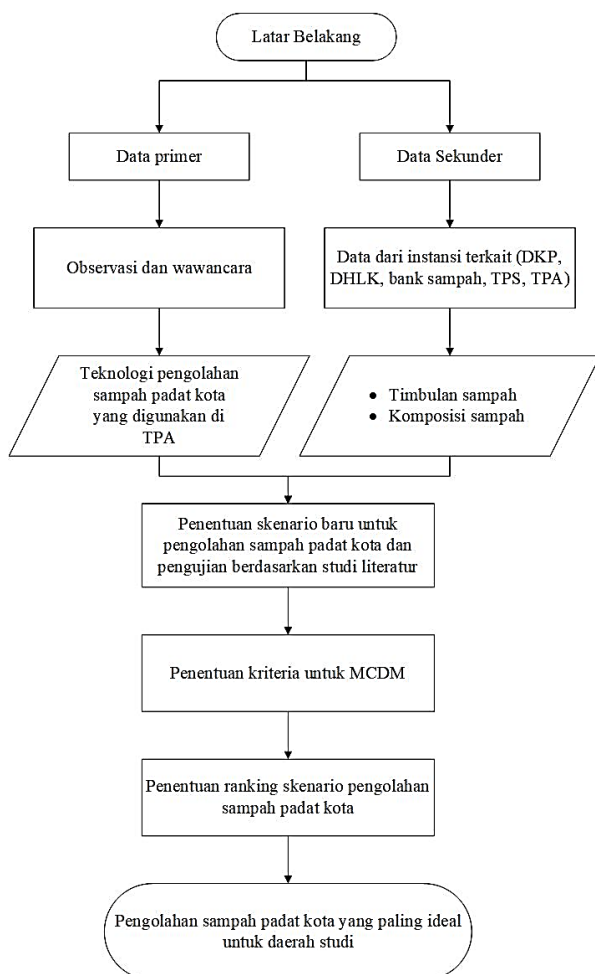
menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution* (TOPSIS) dan *Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluations* (PROMETHEE) dan merumuskan beberapa jenis skenario teknologi yang diterapkan dalam pengolahan sampah diperoleh hasil bahwa pengolahan dengan cara recycling dan landfill adalah yang paling ideal untuk digunakan [5]. Penelitian lainnya juga menunjukkan bahwa MCDM dengan tipe *Multiple Attribute Decision Making* (MADM) dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan lingkungan yang berkaitan dengan manajemen sampah seperti menentukan teknologi pengolahan yang ideal menentukan teknologi yang paling ideal untuk mengurangi polutan di tanah dan dan menentukan lokasi yang cocok untuk pengolahan dengan teknologi *landfill* [6]. Penggunaan metode MCDM ditentukan oleh tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian yang akan dilakukan [3], [5]. Selain TOPSIS dan PROMETHEE, metode *Simple Additive Weighting* (SAW) juga dapat digunakan untuk menentukan jenis pengolahan optimal untuk sampah padat di Kragujevac berdasarkan kriteria lingkungan seperti emisi CH₄, CO₂, faktor *global warming potential* (GWP), N₂O, PM_{2.5}, PM₁₀ dan *total operating costs* (TOC) dengan hasil penelitian menunjukkan bahwa pengolahan dengan teknologi landfill dan insinerasi secara biologis [7].

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan teknik pengolahan yang paling ideal untuk sampah padat yang dihasilkan penduduk di Kota Batam dengan merumuskan beberapa skenario teknik pengolahan yang diperoleh dari studi literatur menggunakan MCDM. Metode ini dipilih karena untuk menentukan strategi pengolahan limbah tidak hanya dilihat dari sisi teknologinya saja tetapi juga dilihat dari sisi ekonomi (biaya), lingkungan-sosial, teknis-sosial dan lingkungan. Penelitian yang relevan dan sesuai dengan penelitian terdahuluseperti yang telah dijabarkan di atas belum pernah dilakukan sebelumnya di Kota Batam, sehingga penelitian ini mencoba untuk mengaplikasikan metode ini sebagai salah satu cara untuk mencari solusi dalam permasalahan sampah di Kota Batam. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan sebagai langkah awal untuk penelitian selanjutnya yang akan dikembangkan sesuai dengan hasil yang diperoleh dari penelitian ini.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian akan dibagi menjadi lima tahapan, yaitu tahapan pengumpulan data primer dan sekunder, penentuan implementasi skenario

pengolahan sampah dari data yang dikumpulkan, penentuan kriteria MCDM, pengolahan dan analisis data. Pengumpulan data primer akan dilakukan dengan cara survey langsung ke lapangan (pengolahan sampah yang telah dilakukan di TPA) dan wawancara langsung. Sedangkan data sekunder akan dikumpulkan dengan cara pengambilan data di database dinas terkait. Penentuan implementasi skenario dilakukan dengan cara merumuskan dari data primer dan sekunder, dan studi literatur. Sedangkan untuk penentuan kriteria MCDM dirumuskan berdasarkan studi literatur sesuai dengan skenario yang dipilih. MCDM yang akan digunakan adalah metode TOPSIS dan PROMETHEE. Tahap akhir adalah analisis data dengan memberikan ranking terhadap skenario pengolahan yang telah dipilih dan menentukan kecocokan serta keefektifannya dalam pengolahan sampah di TPA. Hasil penelitian ini dapat dikembangkan lebih lanjut sebagai dasar untuk merumuskan manajemen pengelolaan sampah padat yang berkelanjutan di Kota Batam dan dapat dijadikan sebagai acuan dan landasan untuk penelitian-penelitian berikutnya yang terkait. Alur penelitian dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur penelitian

A. Penentuan Skenario Pengolahan Sampah

Pada penelitian ini ditetapkan lima jenis skenario dan setiap skenario ada pengolahan secara *landfill* dikarenakan kondisi di TPA Punggur saat ini sudah menerapkan pengolahan *landfill* walaupun jenisnya adalah *controlled landfill*. Salah satu pertimbangan utama dalam penetapan skenario adalah mengacu pada kondisi saat ini di TPA Punggur. Untuk lebih jelaskan mengenai pemilihan skenario dapat dilihat pada Tabel 1. Pemilihan lima skenario pengolahan sampah ini mengacu pada studi literatur yang telah dilakukan dengan mempertimbangan faktor-faktor seperti kondisi lingkungan, iklim, dan jenis timbulan sampah.

B. Klasifikasi dan Kalibrasi Kriteria

Penentuan kriteria adalah kunci dari penggunaan MCDM dalam penelitian ini. Penentuan kriteria terdiri dari jumlah kriteria, deskripsi kriteria, tujuan dan fungsi kriteria serta bobot kriteria. Kriteria ini digunakan untuk menentukan skenario pengolahan sampah terbaik yang dapat dilakukan [9]-[11].

1) *Penentuan Kriteria*: Penentuan kriteria dilakukan berdasarkan studi literatur yang dilakukan yang mengacu pada tiga parameter penting yaitu:

- Kondisi saat ini di TPA Punggur
- Tujuan yang ingin dicapai dari sistem pengolahan sampah yaitu biaya yang harus dikeluarkan tidak mahal, ramah lingkungan dan *waste to energy*
- Kriteria dapat ditentukan pada setiap skenario.

2) *Deskripsi Setiap Kriteria*: Deskripsi dan tujuan dari setiap kriteria dapat dilihat pada Tabel 2.

3) *Pembobotan Kriteria*: Bobot untuk setiap kriteria mengacu pada literatur dengan skala 1-10, dengan nilai tertinggi adalah untuk kriteria yang termasuk bagian menguntungkan dan nilai terendah untuk kriteria yang tidak menguntungkan [9], [12]. Sedangkan bobot untuk setiap kelompok masing-masing kriteria adalah 25% untuk teknologi, 30% untuk lingkungan, 30% untuk ekonomi dan 15% untuk sosial. Pembagian bobot ini berdasarkan pada tujuan yang ingin dicapai dari setiap skenario pengolahan sampah [5]. Tabel 3 menunjukkan bobot koefisien untuk setiap kriteria. Bobot koefisien ini merupakan bobot awal yang penentuannya berdasarkan total setiap kelompok kriteria adalah 100 % [9].

Tabel 1. Pemilihan skenario pengolahan

No	Jenis Skenario	Alasan Pemilihan
1	Sanitary Landfill (100%)	Kondisi saat ini Kota Batam menggunakan sistem pengolahan <i>controlled landfill</i> . Pemilih <i>sanitary landfill</i> dilakukan karena jenis <i>landfill</i> ini adalah jenis yang direkomendasi oleh para ahli sebagai jenis <i>landfill</i> terbaik [1].
2	Sanitary landfill (50%) + Composting (50%)	Mengacu pada kondisi saat ini di Kota Batam dan komposisi timbunan sampah di Kota Batam $\pm 60\%$ adalah sampah organik dengan 49% nya adalah sisa makanan (SIPSN, 2018). Skenario ini juga mengacu pada studi literatur yang dilakukan [5] dan [6].
3	Sanitary landfill (50%) + Insenerasi (50%)	Mengacu pada komposisi sampah di Kota Batam, $\pm 40\%$ adalah non organik dan memilih jenis pengolahan sampah yang termasuk ke dalam ER (<i>energy recovery</i>). Selain itu juga insenerasi dipilih karena sudah dilakukan di daerah perkotaan di Indonesia sehingga dapat menjadi acuan dalam pelaksanaannya. Skenario ini juga mengacu pada studi literatur yang dilakukan [5], [6].
4	Sanitary Landfill (50%) + Biologister (50%)	Mengacu pada komposisi timbunan sampah di Kota Batam $\pm 60\%$ adalah sampah organik dengan 49% nya adalah sisa makanan (SIPSN, 2018) dan hal ini diharapkan dapat dimanfaatkan menjadi energi berupa biogas (pengolahan sampah yang termasuk ke dalam ER) [5], [6].
5	Sanitary Landfill (50%) + Composting (25%) + Pirolisis (25%)	Mengacu komposisi timbunan sampah di Kota Batam $\pm 60\%$ adalah sampah organik dengan 49% nya adalah sisa makanan dan $\pm 3\%$ sampah plastik. (SIPSN, 2018). Pengolahan ini tetap pada jenis pengolahan sampah yang termasuk ke dalam ER [8].

Tabel 2. Deskripsi kriteria

Komponen	Objek	Tujuan	Kriteria	
Teknologi (T)	Kegunaan teknologi [9]	Mengetahui kegunaan teknologi sesuai dengan tujuan yang diharapkan	T1	Kegunaan
	Jumlah sampah yang dapat diolah [12]	Mengetahui jumlah sampah yang dapat diolah dengan teknologi yang digunakan pada periode tertentu	T2	Fasilitas/kapasitas
	Potensi pengurangan sampah [12]	Mengetahui rasio pengurangan sampah yang dilihat dari volume dan beratnya.	T3	Efisiensi
	Waktu yang dibutuhkan [12]	Mengetahui waktu yang dibutuhkan untuk teknologi bekerja	T4	Ketersediaan
	Keterampilan petugas atau operator [13]	Mengetahui keterampilan dan kemampuan petugas terhadap teknologi yang digunakan	T5	Keterampilan untuk mengoperasikan dan merawat
	Material yang dibutuhkan [13]	Mengetahui material untuk membangun dan menjalankan teknologi tersedia serta mudah untuk didapatkan	T6	Material
	Potensi kemampuan beradaptasi [9]	Mengetahui kemampuan teknologi untuk beradaptasi dengan perubahan yang dilakukan seperti penambahan akses, perubahan akses, penambahan kapasitas, perubahan karakteristik sampah, dsb	T7	Fleksibilitas dalam perubahan kondisi (mampu beradaptasi)
	Kemampuan sistem pengolahan sampah [12]	Mengetahui kemampuan teknologi untuk beroperasi sesuai dengan fungsi yang diperlukan	T8	Kelayakan
	Kemampuan memisahkan material limbah [14]	Mengetahui kemampuan teknologi untuk menghilangkan bahan berbahaya seperti beracun, plastik terklorinasi, logam dan uap air.	T9	Pemisahan material limbah
	Kemampuan untuk mengolah air lindi [14]	Mengetahui kemampuan teknologi untuk mengolah dan memastikan air lindi dari sampah tidak mencemari air permukaan	T10	Pelepasan terdispersi air permukaan
	Jumlah karyawan yang dibutuhkan [14]	Mengetahui jumlah karyawan yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem	T11	Jumlah karyawan
	Potensi pemulihan energi [14]	Mengetahui kemampuan sistem pengolahan sampah dalam memulihkan energi	T12	RE
	Kemampuan karyawan [15]	Mengetahui kemampuan dan keahlian operator, teknisi, dsb untuk mengoperasikan sistem yang digunakan	T13	Pengetahuan mengenai teknologi
	Kecocokan dengan karakteristik sampah [15]	Mengetahui sistem yang digunakan sesuai dengan karakteristik sampah yang akan diolah	T14	Implikasi teknologi

Tabel 2. Deskripsi kriteria (lanjutan)

Komponen	Objek	Tujuan	Kriteria	
Lingkungan (L)	Potensi emisi udara [9]	Mengetahui seberapa besar emisi udara yang dihasilkan dari teknologi pengolahan sampah yang digunakan berpengaruh terhadap global warming dan penurunan lapisan ozon	L1	Emisi Udara
	Potensi air limbah [9]	Mengetahui seberapa besar air limbah yang dihasilkan dari teknologi pengolahan sampah yang digunakan	L2	Produksi air limbah
	Potensi produksi limbah padat-residu [9]	Mengetahui seberapa besar residu yang dihasilkan dari teknologi pengolahan sampah yang digunakan	L3	Produksi limbah padat-residu
	Potensi merusak estetika [9]	Mengetahui potensi teknologi yang digunakan mempengaruhi kenyamanan estetika lingkungan sekitar	L4	Gangguan estetika
	Energi yang dibutuhkan [16]	Mengetahui seberapa besar energi yang dibutuhkan untuk operasional teknologi pengolahan sampah	L5	Konsumsi energi
	Potensi kebisingan [9]	Mengetahui seberapa besar kebisingan dihasilkan oleh teknologi pengolahan sampah yang digunakan	L6	Kebisingan
Ekonomi (E)	Luas lahan [9]	Mengetahui luas lahan yang dibutuhkan untuk membangun teknologi pengolahan sampah	E1	Kebutuhan lahan
	Biaya investasi teknologi [9]	Mengetahui biaya awal yang dibutuhkan untuk membangun teknologi pengolahan sampah	E2	Biaya investasi
	Biaya operasional teknologi [9]	Mengetahui biaya yang dibutuhkan untuk operasional teknologi pengolahan sampah setiap harinya	E3	Biaya operasional
	Biaya pengumpulan sampah [16]	Mengetahui biaya yang dibutuhkan untuk mengumpulkan sampah padat domestik di Kota Batam. Dalam hal ini juga termasuk biaya transportasi yang dibutuhkan dalam pengumpulan sampah	E4	Biaya pengumpulan
	Biaya pemeliharaan teknologi [16]	Mengetahui biaya yang dibutuhkan untuk pemeliharaan teknologi pengolahan sampah yang digunakan	E5	Biaya pemeliharaan
	Biaya perbaikan teknologi [13]	Mengetahui biaya yang dibutuhkan untuk perbaikan teknologi	E6	Biaya perbaikan
Sosial (S)	Kesesuaian dengan peraturan yang ada [9]	Mengetahui kesesuaian sistem yang digunakan dengan peraturan yang ada di Indonesia mengenai sistem pengolahan sampah padat domestik	S1	Keselaran dengan institusi terkait/legislatif
	Kesehatan dan keselamatan masyarakat [2]	Mengetahui pengaruh sistem teknologi yang digunakan terhadap masyarakat sekitar lokasi pengolahan khususnya dan sekota Batam umumnya	S2	Kesehatan dan keselamatan masyarakat

Bobot koefisien pada Tabel 3 digunakan untuk menentukan bobot koefisien akhir setiap kriteria dengan cara mengalikan bobot di Tabel 2 dengan bobot setiap kelompok kriteria kemudian dibagi 100 [9]. Hasil akhir bobot koefisien untuk setiap kriteria dapat dilihat pada Tabel 4.

4) *PROMETHEE* dan *TOPSIS*: Penggunaan metode *TOPSIS* dan *PROMETHEE* dipilih dalam penelitian ini berdasarkan studi literatur yang dilakukan. *TOPSIS* dan *PROMETHEE* cocok untuk tujuan yang diinginkan yaitu menentukan teknik

pengolahan sampah ideal yang sesuai dengan keadaan daerah studi. *TOPSIS* dan *PROMETHEE* digunakan untuk menentukan alternatif atau skenario optimum atau dapat juga dilakukan untuk menentukan *ranking* dari beberapa pilihan opsi pengolahan berdasarkan kriteria lingkungan dengan penelitian lebih berfokus pada urutan metode terbaik [17], [18].

Tabel 3. Bobot koefisien setiap kriteria

Kriteria	Bobot koefisien (%)
Teknologi	
T1	10
T2	15
T3	15
T4	10
T5	5
T6	5
T7	10
T8	10
T9	2,5
T10	2,5
T11	2,5
T12	5
T13	2,5
T14	5
Total	100
Sosial	
S1	50
S2	50
Total	100
Ekonomi	
E1	10
E2	30
E3	30
E4	10
E5	10
E6	10
Total	100
Lingkungan	
L1	20
L2	20
L3	20
L4	5
L5	20
L6	15
Total	100

Dalam penggunaan TOPSIS dan PROMETHEE sama seperti metode MCDM lainnya yaitu perlunya pendapat ahli untuk menentukan kriteria yang akan diolah dalam sebuah matrix kriteria-metode. Tetapi pada penelitian ini pendapat ahli dan stakeholder belum dilakukan. PROMETHEE diawali dengan perbandingan secara binari dari alternatif yang dirumuskan pada setiap kriteria, menghitung total indikator yang diinginkan dan positif dan negatif flows dan kemudian akhirnya akan mendapatkan urutan atau ranking [5], [6], [19]. Urutan atau ranking berdasarkan persamaan (1) (2) (3) dan (4). Persamaan ini untuk PROMETHEE I yang merupakan urutan sebagian dan PROMETHEE II yang merupakan urutan lengkap [11], [20].

Tabel 4. Bobot koefisien (akhir) setiap kriteria

Kriteria	Bobot koefisien (%)
Teknologi	
T1	3
T2	4,5
T3	4,5
T4	3
T5	1,5
T6	1,5
T7	3
T7	3
T8	3
T9	0,75
T10	0,75
T11	0,75
T12	1,5
T13	0,75
T14	1,5
Sosial	
S1	5
S2	5
Ekonomi	
E1	3
E2	9
E3	9
E4	3
E5	3
E6	3
Lingkungan	
L1	6
L2	6
L3	6
L4	1,5
L5	6
L6	4,5
Total	100

$$\begin{cases}
 aP^I b \text{ jika } \begin{cases} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ dan } \phi^-(a) < \phi^-(b) \\ \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ dan } \phi^-(a) < \phi^-(b) \\ \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ dan } \phi^-(a) = \phi^-(b) \end{cases} \\
 aI^I b \text{ jika } \phi^+(a) = \phi^+(b) \text{ dan } \phi^-(a) = \phi^-(b) \\
 aR^I b \text{ jika } \begin{cases} \phi^+(a) > \phi^+(b) \text{ dan } \phi^-(a) > \phi^-(b) \\ \phi^+(a) < \phi^+(b) \text{ dan } \phi^-(a) < \phi^-(b) \end{cases}
 \end{cases} \quad (1)$$

dengan:

$\phi^+(a)$ = positif outranking flow

$\phi^-(a)$ = negative outranking flow

$$\phi^+(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(a, x) \quad (2)$$

$$\phi^-(a) = \frac{1}{n-1} \sum_{x \in A} \pi(x, a) \quad (3)$$

$$\phi(a) = \phi^+(a) - \phi^-(a) \quad (4)$$

dengan:

$\phi(a)$ = net outranking flow untuk setiap alternatif

Tabel 5. Bobot kriteria dari setiap skenario

S	Teknologi														Lingkungan						Ekonomi						Sosial	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2
1	7	10	5	3	5	3	10	5	7	10	5	5	5	10	8	9	8	4	3	7	1	8	7	4	7	7	10	7
2	7	8	5	5	5	4	7	6	6	7	6	5	6	9	8	7	8	6	4	8	4	5	4	4	6	4	5	7
3	9	9	6	5	6	3	8	6	4	9	5	8	6	8	9	7	7	4	5	6	4	8	6	4	6	6	10	5
4	7	8	5	7	8	3	7	6	5	7	6	6	8	8	8	6	9	6	4	7	4	5	6	5	6	6	5	6
5	7	8	5	6	7	4	7	6	6	7	6	6	7	8	8	7	9	6	4	8	4	5	5	4	6	5	5	7

Untuk menggunakan TOPSIS adalah metode yang digunakan untuk menilai dan memberi peringkat pada alternatif atau skenario yang dirumuskan berdasarkan jaraknya dengan solusi ideal dan solusi anti ideal [5], [7], [21]. Jarak terkecil merupakan alternatif ideal dan yang terbesar adalah sebaliknya. Perhitungan jarak ini berdasarkan persamaan (4).

$$RC_i = \frac{D_i^-}{D_i^- + D_i^+} \quad (4)$$

dengan:

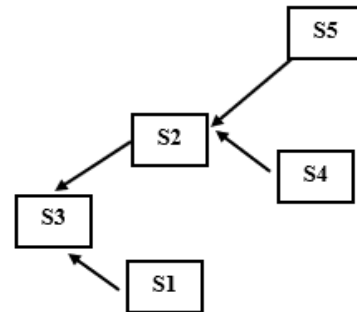
D_i^+ = Jarak alternatif dan solusi ideal

D_i^- = Jarak alternatif dan solusi anti ideal

Lima jenis skenario yang telah ditetapkan kemudian dianalisis menggunakan PROMETHEE dan TOPSIS dengan bantuan Microsoft Excel. Analisis ini memerlukan bobot kriteria untuk setiap skenario. Bobot kriteria ditentukan berdasarkan hasil studi literatur yang dilakukan dan mempertimbangkan 3 parameter penting. Hasil pembobotan dapat dilihat pada Tabel 5. Dalam analisis PROMETHEE ini tidak ada batasan yang ditentukan sehingga dapat dikatakan PROMETHEE yang digunakan adalah jenis kriteria biasa (tipe 1).

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Urutan parsial dari skenario pengolahan sampah yang telah dirumuskan menggunakan PROMETHEE I dapat dilihat pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 2 dapat dilihat bahwa urutan pertama dari skenario pengolahan sampah adalah skenario 3 yaitu pengolahan dengan menggunakan 50% *sanitary landfill* dan 50% insenerasi. Kemudian urutan selanjutnya adalah skenario pengolahan sampah 1 dan skenario pengolahan sampah 2. dan untuk kedua jenis skenario ini tidak dapat dibandingkan. Begitu pula untuk skenario 4 dan skenario 5, tidak dapat dibandingkan satu sama lain. Urutan skenario menggunakan PROMETHEE I tidak jauh berbeda dengan PROMETHEE II. Hal ini dapat dilihat pada Tabel 6 dengan urutan 1 adalah skenario 3. Berdasarkan Tabel 6 dapat dilihat bahwa urutan tertinggi dari skenario yang dirumuskan adalah skenario 3 yaitu 50% *sanitary landfill* dan 50% insenerasi. Tabel 7 menunjukkan *Positive Ideal Solution* (PIS) dan *Negative Ideal Solution* (NIS) dari metode TOPSIS.



Gambar 2. Urutan parsial dari skenario pengolahan sampah menggunakan PROMETHEE I

Tabel 6. Hasil akhir urutan skenario PROMETHEE II

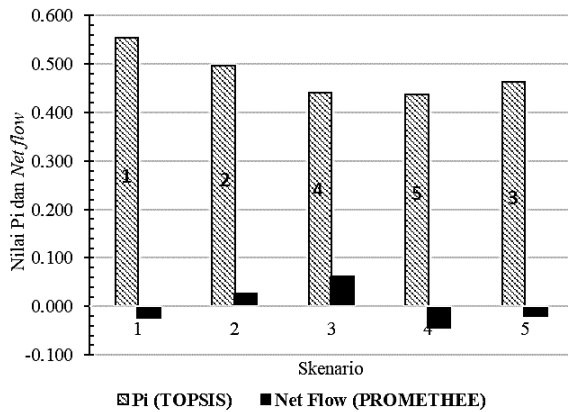
Skenario	ϕ^+	ϕ^-	Net flow	Urutan
S3	0,319	0,258	0,061	1
S2	0,201	0,174	0,027	2
S5	0,170	0,190	-0,020	3
S1	0,298	0,323	-0,024	4
S4	0,189	0,232	-0,043	5

Tabel 7. PIS dan NIS dari metode TOPSIS

Kriteria	PIS	NIS
T1	0,016	0,013
T2	0,023	0,019
T3	0,023	0,019
T4	0,008	0,018
T5	0,009	0,005
T6	0,006	0,008
T7	0,017	0,012
T8	0,014	0,012
T9	0,004	0,002
T10	0,004	0,003
T11	0,003	0,004
T12	0,009	0,005
T13	0,004	0,003
T14	0,008	0,006
L1	0,022	0,025
L2	0,018	0,028
L3	0,011	0,015
L4	0,046	0,030
L5	0,030	0,050
L6	0,011	0,015
E1	0,004	0,015
E2	0,011	0,017
E3	0,019	0,033
E4	0,025	0,032
E5	0,026	0,030
E6	0,005	0,008
S1	0,036	0,018
S2	0,016	0,022

Tabel 8. Hasil akhir urutan skenario menggunakan TOPSIS

skenario	Si+	Si-	Pi	Urutan
S1	0,0263	0,0326	0,0588	1
S2	0,0273	0,0269	0,0542	2
S5	0,0282	0,0243	0,0524	3
S3	0,0309	0,0244	0,0553	4
S4	0,0299	0,0233	0,0532	5



Gambar 3. Urutan skenario berdasarkan metode TOPSIS dan PROMETHEE II

Hasil dari perhitungan PIS dan NIS ini kemudian digunakan untuk perhitungan penentuan Hasil analisis ranking skenario menggunakan TOPSIS dapat dilihat pada Tabel 8. Berdasarkan Tabel 8 dapat dilihat bahwa urutan tertinggi dari skenario pengolahan sampah adalah skenario pengolahan sampah 1 yaitu pengolahan sampah dengan cara *sanitary landfill*. *Sanitary landfill ideal* digunakan jika mempertimbangkan kebutuhan pembangunan fasilitas pengolahan dan biaya karena untuk jenis pengolahan ini biaya tidak terlalu tinggi dibandingkan jenis pengolahan sampah lainnya seperti insinerasi *composting* dan biodigester [8], [22]-[24]. Perbandingan urutan skenario pengolahan sampah yang paling ideal untuk Kota Batam dengan menggunakan kedua metode dapat dilihat pada Gambar 3.

Berdasarkan Gambar 3 dapat dilihat bahwa skenario pengolahan sampah menggunakan metode TOPSIS dan PROMETHEE memiliki urutan yang berbeda kecuali skenario 2 dan skenario 5. Skenario 2 adalah pengolahan sampah dengan cara *sanitary landfill* (50%) + *composting* (50%). Sedangkan skenario 5 adalah pengolahan sampah dengan cara *sanitary Landfill* (50%) digabungkan dengan *composting* (25%) dan pirolisis (25%). Kedua jenis skenario ini memiliki urutan yang sama menggunakan kedua jenis metode yaitu TOPSIS dan PROMETHEE II yaitu urutan kedua dan ketiga. Hasil penelitian [12] menunjukkan bahwa insinerasi merupakan salah satu metode yang ideal

digunakan untuk pengolahan sampah di Kota Istanbul, Turki. Penelitian tersebut menggunakan metode TOPSIS, PROMETHEE dan Fuzzy TOPSIS untuk menentukan pengolahan sampah terbaik dan ideal dan diperoleh hasil bahwa insinerasi berada dalam urutan kedua. Tetapi, menurut penelitian- penelitian terdahulu dikatakan bahwa insinerasi jarang dilakukan karena biaya investasi dan operasional yang tinggi [25]. Selain itu juga, insenerasi dianggap tidak ramah pada lingkungan mengingat potensi pencemaran udara yang dapat terjadi akibat pembakaran [26]. Untuk pengolahan sampah dengan cara pirolisis saat ini sudah banyak dilakukan tetapi kendala utamanya adalah biaya investasi yang tinggi dan sampah yang dapat diolah jenisnya terbatas [27]-[29].

IV. KESIMPULAN

Hasil menunjukan bahwa pengolahan sampah ideal menurut metode PROMETHEE adalah pengolahan sampah dengan cara 50% *sanitary landfill* dan 50% insinerasi. Sedangkan menurut metode TOPSIS adalah pengolahan sampah paling ideal adalah dengan cara 100% *sanitary landfill*. Berdasarkan kedua metode yang digunakan, skenario yang memiliki kesamaan dalam urutan ideal adalah pengolahan sampah dengan cara 50% *sanitary landfill* dan 50% *composting* yang merupakan urutan kedua untuk pengolahan sampah ideal. Oleh karena itu, perlu dikaji lebih lanjut faktor-faktor yang mempengaruhi keberhasilan pengolahan dengan 3 jenis skenario ini agar dapat dilakukan dengan optimal di Kota Batam.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Kementerian Riset Teknologi dan Pendidikan Tinggi yang telah memberikan dukungan finansial kepada penulis dalam hibah penelitian dengan Skema Penelitian Dosen Pemula (Nomor kontrak: 020/LPPM.KT/IVERS/III/20).

REFERENSI

- [1] E. Damanhuri, "Some principal issues on municipal solid waste management in Indonesia," in *Expert Meeting on Waste Management ...*, 2005, pp. 1–10.
- [2] A. Allesch and P. H. Brunner, "Assessment methods for solid waste management: A literature review," *Waste Manag. Res.*, vol. 32, no. 6, pp. 461–73.
- [3] S. Das, S. H. Lee, P. Kumar, K. H. Kim, S. S. Lee, and S. S. Bhattacharya, "Solid waste management: Scope and the challenge of sustainability," *J.*

- Clean. Prod.*, vol. 228, pp. 658–678, 2019.
- [4] L. M. Goulart Coelho, L. C. Lange, and H. M. G. Coelho, “Multi-criteria decision making to support waste management: A critical review of current practices and methods,” *Waste Management and Research*, pp. 1–26, 2017.
 - [5] A. Coban, I. F. Ertis, and N. A. Cavdaroglu, “Municipal solid waste management via multi-criteria decision making methods: A case study in Istanbul, Turkey,” *J. Clean. Prod.*, vol. 180, pp. 1–33, 2018.
 - [6] A. Makan, D. Malamis, O. Assobhei, M. Loizidou, and M. Mountadar, “Multi-criteria decision aid approach for the selection of the best compromise management scheme for the treatment of municipal solid waste in Morocco,” *Int. J. Environ. Waste Manag.*, vol. 12, no. 3, pp. 300–317, 2013.
 - [7] S. Jovanovic, S. Savic, N. Jovicic, G. Boskovic, and Z. Djordjevic, “Using multi-criteria decision making for selection of the optimal strategy for municipal solid waste management,” *Waste Manag. Res.*, pp. 1–12, 2016.
 - [8] D. Czajczyńska *et al.*, “Potential of pyrolysis processes in the waste management sector,” *Therm. Sci. Eng. Prog.*, vol. 3, pp. 171–197, 2017.
 - [9] K. Rousis, K. Moustakas, S. Malamis, A. Papadopoulos, and M. Loizidou, “Multi-criteria analysis for the determination of the best WEEE management scenario in Cyprus,” *Waste Manag.*, vol. 28, no. 10, pp. 1941–1954, 2008.
 - [10] E. Triantaphyllou, B. Shu, S. N. Sanchez, and T. Ray, “Multi-Criteria Decision Making: An Operations Research Approach,” *Electronics*, vol. 15, pp. 175–186, 1998.
 - [11] J. P. Brans, P. Vincke, and B. Mareschal, “How to select and how to rank projects: The Promethee method,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 24, no. 2, pp. 228–238, 1986.
 - [12] E. Arıkan, Z. T. Şimşit-Kalender, and Ö. Vayvay, “Solid waste disposal methodology selection using multi-criteria decision making methods and an application in Turkey,” *J. Clean. Prod.*, vol. 142, pp. 403–412, 2017.
 - [13] C. Zurbrugg, M. Gfrerer, H. Ashadi, W. Brenner, and D. Küper, “Determinants of sustainability in solid waste management - The Gianyar Waste Recovery Project in Indonesia,” *Waste Manag.*, vol. 32, no. 11, pp. 2126–2133, 2012.
 - [14] M. Ekmekçioglu, T. Kaya, and C. Kahraman, “Fuzzy multicriteria disposal method and site selection for municipal solid waste,” *Waste Management*, vol. 30, no. 8–9, pp. 1729–1736, 2010.
 - [15] S. Khan and M. N. Faisal, “An analytic network process model for municipal solid waste disposal options,” *Waste Manag.*, vol. 28, no. 9, pp. 1500–1508, 2008.
 - [16] J. P. Su, M. L. Hung, C. W. Chao, and H. W. Ma, “Applying multi-criteria decision-making to improve the waste reduction policy in Taiwan,” *Waste Manag. Res.*, vol. 28, no. 1, pp. 20–28, 2010.
 - [17] R. Ewa, “Multi-Criteria Decision Making Models By Applying the Topsis Method To Crisp and Interval Data,” *Mult. Criteria Decis. Making/University Econ. Katowice*, vol. 6, pp. 200–230, 2011.
 - [18] A. Soltani, K. Hewage, B. Reza, and R. Sadiq, “Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: A review,” *Waste Manag.*, vol. 35, pp. 318–328, 2015.
 - [19] M. Behzadian, R. B. Kazemzadeh, A. Albadvi, and M. Aghdasi, “PROMETHEE: A comprehensive literature review on methodologies and applications,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 200, no. 1, pp. 198–215, 2010.
 - [20] K. Miettinen, J. Hakanen, and D. Podkopaev, *Multiple Criteria Decision Analysis*. 2016.
 - [21] C.-L. Hwang and K. Yoon, *Lecture Notes in Econmics and Mathematical Systems*. 1981.
 - [22] F. V. Carstensen, M. Graziano, N. Vorotyseva, W. E. Waite, and K. E. Parr, “Economic Analysis of Bioenergy: An Integrated Multidisciplinary Approach,” in *School of Business, University of Connecticut*, Elsevier B.V., 2013.
 - [23] A. Sharma and S. K. Kar, *Energy Sustainability Through Green Energy*. 2015.
 - [24] A. Pivato, S. Masi, D. De Caprio, and A. Tommasin, “Sanitary landfill costs from design to aftercare: Criteria for defining unit cost,” *Detritus*, vol. 4, pp. 140–156, 2018.
 - [25] H. Jouhara *et al.*, “Municipal waste management systems for domestic use,” *Energy*, vol. 139, pp. 485–506, 2017.
 - [26] G. E. Louis, L. M. Magpili, and C. A. Pinto, “Multi-Criteria Decision Making and composting of waste in the municipality of Bacoar in the Philippines,” *Int. J. Environ. Technol. Manag.*, vol. 7, no. 3–4, pp. 351–368, 2007.
 - [27] C. A. Salman, S. Schwede, M. Naqvi, E. Thorin, and J. Yan, “Synergistic combination of pyrolysis, anaerobic digestion, and CHP plants,” *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 1323–1329, 2019.
 - [28] G. Oliveira Neto, L. Chaves, L. Pinto, J. Santana, M. Amorim, and M. Rodrigues, “Economic, Environmental and Social Benefits of Adoption of Pyrolysis Process of Tires: A Feasible and Ecofriendly Mode to Reduce the Impacts of Scrap Tires in Brazil,” *Sustainability*, vol. 11, no. 7, pp. 1–18, 2019.
 - [29] D. Wu, A. Zhang, L. Xiao, Y. Ba, H. Ren, and L. Liu, “Pyrolysis Characteristics of Municipal Solid Waste in Oxygen-free Circumstance,” *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1255–1262, 2017.

