

Menentukan Teknologi Pemroses Sampah Kota Menggunakan *Decision Matrix* Untuk Menjadi Energi Listrik (Studi Kasus: Kota Jakarta Barat)

Iwa Garniwa^{1*}; Sekar Ayu^{1*}

1. Manajemen Energi dan Ketenagalistrikan, Fakultas Teknik Elektro, Universitas Indonesia, Jl. Lingkar, Pondok Cina, Kecamatan Beji, Kota Depok, Jawa Barat 16424, Indonesia

*Email: iwa@eng.ui.ac.id; sekar.ayu16@ui.ac.id

Received: 21 Desember 2023 | Accepted: 5 Januari 2024 | Published: 8 Januari 2024

Abstract

Jakarta Barat waste management is by disposing of waste at the Bantar Gebang TPST landfill. The capacity of the Bantar Gebang TPST is almost full therefore waste processing facilities are needed to reduce the amount of waste sent to the landfill. Waste to energy technology processes waste into electrical energy. The Decision Matrix and additional parameters are used to assess technology that is suitable based on the waste management conditions in Jakarta Barat. The application of MBT technology in Jakarta Barat, able to reduce waste sent to landfill, improve waste management, and produce RDF with high electrical energy potential. The incineration and anaerobic digestion technology can be applied after the waste management system is advanced and the implementation of economic incentives.

Keywords: renewable energy, waste management, waste to energy, sustainable

Abstrak

Sampah Jakarta Barat dikelola dengan pembuangan ke landfill TPST Bantar Gebang. Kapasitas TPST Bantar Gebang hampir penuh sehingga diperlukan fasilitas pengolahan sampah untuk mengurangi jumlah sampah yang dikirim ke landfill. Teknologi waste to energy memproses sampah menjadi energi listrik. Decision Matrix dan parameter tambahan digunakan untuk menilai teknologi yang sesuai berdasarkan kondisi pengelolaan sampah di Jakarta Barat. Penerapan teknologi MBT di Jakarta Barat selain dapat mengurangi sampah yang dikirim ke landfill, memperbaiki pengelolaan sampah serta menghasilkan RDF dengan potensi energi listrik yang tinggi. Penerapan teknologi insinerasi dan anaerobic digestion dapat dilakukan setelah sistem pengelolaan sampahnya maju dan adanya insentif ekonomi.

Kata kunci: berkelanjutan, energi terbarukan, pengelolaan sampah, sampah menjadi energi

1. PENDAHULUAN

Peningkatan timbunan sampah disebabkan oleh faktor urbanisasi, pertumbuhan penduduk, dan perkembangan ekonomi. Pengelolaan sampah yang buruk menyebabkan pencemaran, berdampak negatif pada kesehatan masyarakat, dan menurunkan estetika lingkungan [1]. Dengan pengelolaan sampah berdasarkan PP No. 81/2012, pengelolaan sampah berkelanjutan dapat menjaga kelestarian lingkungan dan kesehatan masyarakat dengan pemanfaatan sampah sebagai sumber daya yang dalam pengelolaannya melibatkan peran serta berbagai pihak.

Pada hierarki pengelolaan sampah WHO, *energy recovery* dengan teknologi *waste to energy* adalah kegiatan pemulihan energi dari sampah menjadi *renewable energy* berupa *biofuel* untuk energi listrik [2, 3]. Teknologi tersebut yaitu insinerasi, pirolisis, gasifikasi, *anaerobic digestion*, *landfill gas collection*, dan *mechanical biological treatment* [4].

Sampah kota Jakarta Barat dikelola oleh Dinas Kebersihan Pemerintah Provinsi DKI Jakarta. Pengelolaan sampah dilaksanakan dengan pengumpulan, pengangkutan dan pembuangan sampah ke TPST Bantar Gebang tanpa ada pemilahan di sumber sampah [5]. TPST Bantar Gebang sudah beroperasi lebih dari 30 tahun, di lahan seluas 110,3 hektare [6], total kapasitas 49 juta ton. Saat ini volume sampah menumpuk telah mencapai 80% dari total kapasitas dengan sampah masuk 7.500 ton sampah per hari dari berbagai wilayah Jakarta [7], 2.023,42 ton sampah per hari dari Jakarta Barat [8].

Dengan adanya beberapa teknologi pemroses sampah, diperlukan pemilihan teknologi yang dapat diterapkan untuk pemanfaatan sampah menjadi energi listrik di Jakarta Barat. Penelitian pemilihan teknologi tepat guna Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) pernah dilakukan berdasarkan volume, karakteristik dan komposisi sampah [9]. Sementara itu, upaya pemerintah dalam mendorong pemanfaatan energi terbarukan dengan pembangunan PLTSa menghadapi berbagai kendala persampahan yang kompleks [10].

2. METODE

2.1. Kesesuaian teknologi untuk Jakarta Barat dengan *Decision Matrix*

Decision Matrix terdiri dari parameter dengan kondisi pengelolaan sampah yang direkomendasikan untuk masing-masing teknologi *waste to energy*. Kondisi pengelolaan sampah Jakarta Barat dinilai dengan *Decision Matrix* untuk mendapatkan gambaran awal sehingga pihak terlibat dapat melakukan evaluasi jika ditemukan kondisi yang perlu diperbaiki sebelum penerapan teknologi. DM terdiri dari 12 parameter dengan 4 kondisi, A sangat maju sampai D sangat kurang maju. Warna merah dan kuning perlu diperbaiki hingga menjadi warna hijau kondisi A supaya teknologi dapat diterapkan di Jakarta Barat [11].

Tabel 1. Pengelolaan sampah Jakarta Barat dinilai dengan *Decision Matrix*

Parameter	Kondisi	Kondisi Jakarta Barat Saat Ini				
		Insinerasi	MBT	Anaerobic Digestion	Landfill Gas Collection	Pirolisis dan Gasifikasi
1	C					
2	B					
3	B					
4	A					
5	B					
6	A					
7	B					
8	B					

beberapa teknologi yang sudah diterapkan di Indonesia, pihak publik dan swasta cukup memiliki pengalaman namun membutuhkan pengembangan kapasitas. Perbaikan dilakukan dengan menerapkan prinsip kemitraan yang baik dengan semua pihak yang terlibat, memiliki perjanjian hukum yang kuat, dan pengadaan sosialisasi masyarakat.

Parameter 6 DM adalah waktu dan jarak transportasi tambahan untuk sampah ke fasilitas. Saat ini sampah dibuang ke TPST Bantar Gebang yang berlokasi di Kota Bekasi, Jawa Barat. Jarak antara Jakarta Barat dan TPST Bantar Gebang sekitar 50 km dengan waktu tempuh 1 – 2 jam. Jika fasilitas dibangun di dalam wilayah Jakarta Barat, tidak ada waktu dan jarak transportasi tambahan untuk sampah yang diangkut ke fasilitas pemroses sampah.

Parameter 7 DM adalah pasar yang tersedia dan pembuangan akhir residu hasil pemrosesan sampah menjadi energi. Residu tersebut dapat dimanfaatkan, jika tidak ada pasar untuk residu maka residu hasil proses sampah Jakarta Barat dibuang ke *landfill* TPST Bantar Gebang. Tabel 2 merupakan ketersediaan pasar Jakarta Barat untuk residu teknologi pemroses sampah.

Tabel 2. Ketersediaan pasar Jakarta Barat untuk residu teknologi pemroses sampah

Teknologi	Pasar untuk residu	Ketersediaan pasar
Insinerasi	<i>Fly ash</i> menjadi <i>paving block</i> [20]. <i>Fly ash</i> dan <i>bottom ash</i> untuk pengelolaan batuan dan air asam di tambang batubara [21].	Tidak ada pasar di Jakarta Barat. Pabrik perusahaan <i>paving block</i> terdekat di Tangerang dan Purwakarta.
MBT	Sampah terpilah berukuran besar dan sampah daur ulang [22].	Perlu pengujian lebih lanjut.
AD	<i>Digestate</i> sebagai pupuk dan <i>soil conditioner</i> [11].	Tidak ada pasar di Jakarta Barat.
LGC	Tidak ada residu.	-
Pirolisis dan Gasifikasi	Biochar dari sampah organik meningkatkan kualitas tanah [23].	Perlu pengujian lebih lanjut.

Parameter 8 DM adalah terkait peraturan teknologi *waste to energy* yang berlaku di Jakarta Barat dapat dilihat dalam tabel 3. Dari tabel terlihat bahwa peraturan sudah ada namun belum lengkap untuk semua jenis teknologi.

Tabel 3. Peraturan dan persyaratan yang berlaku untuk Jakarta Barat

Peraturan dan persyaratan	Keterangan
UU No. 18/2008 tentang Pengelolaan Sampah.	Pemanfaatan sampah sebagai sumber daya yang berwawasan lingkungan.
PP 81/2012 tentang Pengelolaan Sampah Rumah Tangga dan Sampah Sejenis Sampah Rumah Tangga.	Pengolahan sampah dilakukan untuk daur ulang energi dengan teknologi ramah lingkungan.
UU No. 30/2009 tentang Ketenagalistrikan.	Pembangkitan energi listrik dengan asas keamanan, keselamatan, dan kelestarian fungsi lingkungan.
Perpres No. 58/2017 tentang Percepatan Pelaksanaan Proyek Strategis Nasional.	Energi listrik yang dihasilkan berasal dari sampah perkotaan.
Perpres No. 35/2018 tentang Percepatan Pembangunan Instalasi Pengolah Sampah Menjadi Energi Listrik Berbasis Teknologi Ramah Lingkungan.	Pengelolaan sampah menjadi sumber daya agar sampah memiliki nilai tambah menjadi energi listrik. Percepatan pembangunan PLTSa dengan kemitraan antara badan usaha dan pemerintah daerah.

Permen ESDM No. 35/2013 jo No. 12/2016 tentang Tata Cara Perizinan Usaha Ketenagalistrikan.	Usaha ketenagalistrikan berdasarkan perundangan bidang perlindungan dan pengelolaan lingkungan hidup, dokumen sistem manajemen mutu sesuai SNI.
Permen LHK No. P.15/MENLHK/SETJEN/KUM.1/4/2019 Tentang Baku Mutu Emisi Pembangkit Listrik Tenaga Termal.	Baku mutu emisi PLTSa meliputi kadar maksimum partikulat, sulfur dioksida, nitrogen dioksida, hidrogen klorida, merkuri, karbon monoksida, hidrogen fluorida, dioksin dan furan.

Diberhentikannya proyek pengelolaan sampah menjadi listrik ITF Sunter Jakarta karena kendala biaya *tipping fee* dan nilai investasi yang tinggi [24], parameter 9 DM yaitu pembiayaan pengelolaan sampah perlu diperhatikan. Saat ini, anggaran pengelolaan sampah di daerah sangat kecil, meski idealnya sebesar 2%–3% dari APBD [10]. Perlu ada jaminan pemenuhan biaya dengan pemungutan retribusi sampah kepada perusahaan dan masyarakat sesuai UU No. 18/2008, PP No. 81/2012 dan peraturan yang berlaku lainnya, menambah anggaran dari APBD, serta dukungan pendanaan *tipping fee* dari pemerintah pusat.

Parameter 10 DM adalah akses terhadap *spare part* dan mata uang asing. Saat ini teknologi *waste to energy* yang telah terbukti dan teruji sebagian besar masih bergantung dari luar negeri atau impor. Kondisi dapat diperbaiki dengan memaksimalkan potensi dalam negeri untuk teknologi yang akan dibangun, seperti pada insinerasi PLTSa Bantar Gebang yang memiliki tingkat komponen dalam negeri mencapai 65% dengan *engineering*, fabrikasi (*boiler furnace*, *waste bunker*, *water treatment plant*, dan *wastewater treatment plant*), dan konstruksi dilakukan dalam negeri. Kemudian 35% sisanya dipenuhi dengan impor dari negara lain [10].

Parameter 11 DM adalah akses ke konsumen. Potensi pemanfaatan dari pemrosesan sampah Jakarta Barat yaitu distribusi energi listrik melalui jaringan listrik PLN Gardu Induk eksisting Kembangan dan *Gas Insulated Substation* Kembangan II [25]. Lokasi area industri dengan permintaan listrik, panas, atau gas dapat meningkatkan jumlah konsumen energi.

Insentif ekonomi sektor energi di Indonesia berupa pajak karbon untuk pembangkit listrik tenaga uap dengan bahan bakar batu bara [26], sehingga parameter 12 DM belum ada insentif ekonomi pembangkitan energi *low carbon* dari sampah. Diperlukan penerapan insentif ekonomi untuk energi dari sampah seperti yang dilakukan Colombia yaitu insentif dengan pemotongan hingga 50% atas investasi melalui pajak penghasilan dan pembebasan PPN [27].

2.2. Penerapan teknologi untuk Jakarta Barat dengan Parameter Tambahan

Dari uraian DM diatas, diperlukan pertimbangan tambahan seperti kebutuhan pembangunan fasilitas tambahan, estimasi luas tanah, persentase sampah diproses, potensi energi listrik dan harga jualnya, serta risiko pencemaran untuk penerapan di Jakarta Barat.

Fasilitas tambahan yang diperlukan sebelum fasilitas pemroses sampah dapat diterapkan di Jakarta Barat adalah pada tabel 4.

Tabel 4. Fasilitas tambahan untuk fasilitas pemroses sampah Jakarta Barat.

Teknologi	Kebutuhan fasilitas tambahan
LGC	Pembangunan <i>sanitary landfill</i> sebelum penerapan, tidak ada SLF di Jakarta Barat.
MBT	Tidak ada.
Insinerasi.	<i>Pre-treatment</i> sebagai opsi untuk meningkatkan nilai kalor sampah [11].
AD	Membutuhkan <i>pre-treatment</i> supaya mikroorganisme dapat bekerja optimal [11].
Pirolisis dan gasifikasi	Membutuhkan <i>pre-treatment</i> untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas energi yang dihasilkan [11].

Luas tanah mempengaruhi biaya pembangunan fasilitas. Estimasi luas tanah fasilitas Jakarta Barat berdasarkan perbandingan dengan fasilitas referensi pada tabel 5.

Tabel 5. Estimasi kapasitas dan luas tanah fasilitas.

Teknologi	Kapasitas dan luas tanah referensi	Estimasi kapasitas dan luas tanah
LGC	7.000 ton/hari, 110,3 ha [6].	1.800 ton/hari, 28,336 ha = ~28,5 ha.
MBT	130.000 ton/tahun, 12 <i>acre</i> [28].	1.800 ton/hari, 24,54 ha = ~25 ha.
Insinerasi	350.000 ton/tahun, 5,3 ha [29].	1.800 ton/hari, 9,979 ha = ~10 ha.
AD	100.000 ton/tahun, 11 <i>acre</i> [30].	1.600 ton/hari, 26,029 ha = ~26,03 ha.
Pirolisis	2.400 ton/hari, 20 <i>acre</i> [31].	1.800 ton/hari, 6,046 ha = ~6,05 ha.
Gasifikasi	300 ton/hari, 5 <i>acre</i> [32].	1.800 ton/hari, 12,164 ha = ~12,2 ha.

Komposisi dan timbulan sampah Jakarta Barat pada tabel 6 untuk mengetahui persentase sampah yang dapat diolah masing-masing teknologi. Sampah logam, kaca, dan lainnya tidak diproses. AD hanya proses sampah organik. Sehingga teknologi LGC, MBT, insinerasi, pirolisis dan gasifikasi proses 85,84% sampah, sementara AD proses 75,55% sampah.

Tabel 6. Komposisi dan timbulan sampah Jakarta Barat [8]

Komposisi Sampah	%	Timbulan Sampah per hari (ton)
Sisa Makanan	69,77%	1.411,74
Kayu dan Rumput	5,78%	116,95
Kertas	3,08%	62,32
Kain	2,99%	60,50
Plastik	2,97%	60,10
Logam	1,49%	30,15
Karet	1,25%	25,29
Kaca	0,01%	0,20
Lainnya	12,66%	256,16
Total	100%	2.023,42

Potensi energi listrik insinerasi berdasarkan data timbulan dan LCV sampah [12], dengan efisiensi *moving grate boiler* insinerasi sekitar 26% [33].

Potensi energi listrik MBT berasal dari pembentukan RDF [34, 35] dengan reduksi massa sampah sekitar 41,7% [36]. RDF dari sampah Jakarta Barat 5.655,40 kal/gr. Nilai kalor dibutuhkan PLTU 5242 kal/gr [37], dengan efisiensi termal PLTU sekitar 22% [38].

Potensi energi listrik AD dan LGC adalah biogas dari dekomposisi sampah tanpa udara [9]. Pipa LGC menangkap 50% biogas [11] dengan kandungan gas metana 50% [39]. Efisiensi AD sebesar 55% [12]. Energi listrik AD dan LGC dibangkitkan oleh turbin gas efisiensi 25% [12].

Potensi pemulihan energi berupa *syngas* dari pirolisis sampah perkotaan sebesar 25% [40], dengan energi listrik dibangkitkan oleh turbin gas. Sedangkan potensi energi listrik gasifikasi [12] dengan energi listrik dibangkitkan oleh turbin gas.

Estimasi harga jual listrik Jakarta Barat sesuai Perpres Nomor 112 tahun 2022 adalah 9,29 *cent* USD/kWh. Dengan nilai konversi mata uang dari USD ke IDR 15.566,45.

Estimasi energi listrik dari pemrosesan sampah Jakarta Barat oleh masing-masing teknologi dan harga jual listrik per ton sampah pada tabel 7.

Tabel 7. Estimasi energi listrik dan harga jual listrik per ton sampah

Teknologi	Insinerasi	MBT	AD	LGC	Pirolisis	Gasifikasi
MWh	1.001,11	1.465,25	273,86	141,44	240,70	962,61
IDR	833.515	1.219.947	259.071	117.760	200.400	801.457

Energi atau residu yang dihasilkan oleh masing-masing teknologi pemroses sampah memiliki risiko pencemaran lingkungan yaitu pada tabel 8.

Tabel 8. Risiko pencemaran lingkungan

Teknologi	Risiko pencemaran lingkungan
LGC	Pencemaran lindi pada tanah dan air [11].
MBT	Emisi udara pembakaran RDF di PLTU atau pabrik semen [41].
Insinerasi	Pencemaran udara dan pencemaran tanah karena logam berbahaya [42].
AD	Pencemaran udara dari pembakaran biogas [43].
Pirolisis dan gasifikasi	Pencemaran udara dan pencemaran tanah dari <i>biochar</i> dengan potensi beracun atau mengandung logam berbahaya [44, 45, 46].

Dari uraian diatas, terdapat 6 parameter tambahan untuk menentukan teknologi yang dapat diterapkan di Jakarta Barat. Parameter tambahan terdiri dari 3 kondisi. Kondisi baik dengan A dan kondisi tidak baik dengan C. Parameter tambahan pada tabel 9.

Tabel 9. Parameter tambahan

1. Kebutuhan pembangunan fasilitas berkaitan dengan pengoperasian teknologi pemroses sampah (<i>sanitary landfill, pre-treatment</i>)		
A. Tidak	B. Tentatif	C. Ya
2. Estimasi luas tanah fasilitas pemroses sampah		
A. 2 – 10 ha	B. 10 – 20 ha	C. 20 – 30 ha
3. Persentase komposisi sampah yang diproses		
A. >60%	B. 30 – 60%	C. <30%
4. Estimasi energi listrik dari sampah		
A. >1000 MWh	B. 500 – 1000 MWh	C. <500 MWh
5. Estimasi harga jual listrik per ton sampah		
A. >1jt rupiah	B. 0,5 – 1jt rupiah	C. <0,5jt rupiah
6. Risiko pencemaran lingkungan (udara, air, tanah)		
A. Hanya satu	B. Dua	C. Ketiganya

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penilaian 12 parameter *Decision Matrix* dengan warna hijau 5,55 poin, kuning 2,77 poin, dan merah 0 poin. Penilaian 6 parameter tambahan dengan A 5,55 poin, B 2,77 poin, dan C 0 poin. Penilaian kondisi pengelolaan sampah Jakarta Barat saat ini dengan *Decision Matrix* dan parameter tambahan pada tabel 10.

Tabel 10. Penilaian *Decision Matrix* dan parameter tambahan Jakarta Barat saat ini

Teknologi	<i>Decision Matrix</i>	Parameter Tambahan	Total
	Kondisi Jakarta Barat Saat Ini		
<i>Co-processing</i> (MBT)	52,7	27,75	80,45
<i>Landfill Gas Collection</i>	61,04	8,32	69,36
Insinerasi	41,59	24,96	66,55
<i>Anaerobic Digestion</i>	36,04	11,1	47,14

Gasifikasi	24,93	16,63	41,56
Pirolisis	24,93	13,87	38,8

Kelebihan dan kelemahan penerapan teknologi untuk Jakarta Barat pada tabel 11.

Tabel 11. Kelebihan dan kelemahan penerapan teknologi untuk Jakarta Barat

MBT 80,45 poin	LGC 69,36 poin	Insinerasi 66,55 poin
Kelebihan:	Kelebihan:	Kelebihan:
• MBT memperbaiki pengelolaan sampah. • Potensi listrik tinggi, estimasi harga jual listrik tinggi.	• Pengolahan sederhana.	• Membutuhkan sedikit lahan. • Potensi listrik tinggi, estimasi harga jual listrik cukup tinggi.
Kelemahan:	Kelemahan:	Kelemahan:
• Kebutuhan lahan cukup luas. • Belum ada pasar RDF.	• Perlu <i>sanitary landfill</i>, belum ada SLF. • Potensi listrik rendah, estimasi harga jual listrik rendah. • Risiko SLF pencemaran lindi pada tanah dan air.	• Tidak dapat diterapkan, tidak ada insentif. • Risiko pencemaran udara dan tanah di sekitar fasilitas.

Kondisi pengelolaan sampah Jakarta Barat saat ini perlu perbaikan kondisi sesuai rekomendasi *Decision Matrix* agar teknologi dapat diterapkan. Tabel 12 adalah penilaian jika dilakukan perbaikan kondisi sesuai rekomendasi parameter *Decision Matrix*.

Tabel 12. Penilaian dengan perbaikan kondisi *Decision Matrix* dan parameter tambahan Jakarta Barat

Teknologi	Kondisi Jakarta Barat Sesuai Rekomendasi <i>Decision Matrix</i>	Parameter Tambahan	Total
<i>Co-processing</i> (MBT)	66,6	27,75	94,35
Insinerasi	66,6	24,96	91,56
<i>Anaerobic Digestion</i>	66,6	11,1	77,7
<i>Landfill Gas Collection</i>	66,6	8,32	74,92
Gasifikasi	36,02	16,63	52,65
Pirolisis	36,02	13,87	49,89

Dengan kondisi Jakarta Barat saat ini MBT dapat diterapkan. Penilaian sama dengan hasil penelitian [9] bahwa teknologi MBT tepat guna untuk sampah lebih dari 1.000 ton per hari.

Setelah ada perbaikan kondisi Jakarta Barat, nilai teknologi tertinggi yaitu MBT 94,35 poin kemudian insinerasi 91,56 poin dan *anaerobic digestion* 77,7 poin.

Sedangkan poin teknologi gasifikasi dan pirolisis masih rendah. Penerapan teknologi tidak disarankan sebelum melakukan studi lebih lanjut karena teknologi yang rumit dan biaya yang tinggi seperti adanya biaya pembersihan *syngas* dan penanganan residu [47].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil *Decision Matrix* berupa gambaran umum teknologi yang sesuai kondisi pengelolaan sampah dan dengan parameter tambahan dapat ditentukan teknologi yang dapat diterapkan di Jakarta Barat saat ini. MBT dapat diterapkan di Jakarta Barat. Dengan perbaikan pengelolaan sampah serta pengadaan insentif maka insinerasi dan *anaerobic digestion* dapat diterapkan. Sedangkan gasifikasi dan pirolisis dapat diterapkan jika sudah ada studi lebih lanjut. RDF dari MBT dapat menjadi energi listrik dengan gasifikasi dan pirolisis.

Saran dan rekomendasi penelitian selanjutnya adalah penelitian dengan analisis tekno-

ekonomi masing-masing teknologi serta penelitian skema pembiayaan proyek.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Kaza, L. Yao, P. Bhada-Tata, & F. Van Woerden, *What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050*, United States of America: World Bank Publications, 2018.
- [2] *Compendium of WHO and other UN guidance on health and environment*, 2022 update. Geneva: World Health Organization; 2022 (WHO/HEP/ECH/EHD/22.01). Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO.
- [3] R. Gumisiriza, J. F. Hawumba, M. Okure, and O. Hensel, "Biomass waste-to-energy valorisation technologies: A review case for banana processing in Uganda," *Biotechnol. Biofuels*, vol. 10, no. 1, pp. 1–29, 2017, doi: 10.1186/s13068-016-0689-5.
- [4] A. Abdeljaber, R. Zannerni, W. Masoud, M. Abdallah, and L. Rocha-Meneses, "Eco-Efficiency Analysis of Integrated Waste Management Strategies Based on Gasification and Mechanical Biological Treatment," *Sustain.*, vol. 14, no. 7, 2022, doi: 10.3390/su14073899.
- [5] A. Aprilia, "Waste Management in Indonesia and Jakarta: Challenges and Way Forward", *Proc. ASEF Summer University* vol. 23, pp. 1-18, 2021.
- [6] UPSTDLH. *Tempat Pengelolaan Sampah Terpadu Bantargebang* [Online]. Available: <https://upstdlh.id/tpst/index>.
- [7] M. Azhar. (2023, Jan. 13). *Mengubah Sampah Menjadi Energi* [Online]. Available: <https://govinsider.asia/indo-en/article/Mengubah-sampah-menjadi-energi>.
- [8] SIPSN. *Timbulan Sampah* [Online]. Available: <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/public/data/timbulan>.
- [9] D. Apriyadi, "Analisa Pemilihan Teknologi Tepat Guna Pembangkit Listrik Tenaga Sampah (PLTSa) Studi Kasus DKI Jakarta," *Universitas Indonesia*, 2013.
- [10] S. N. Qodriyatun, "Pembangkit Listrik Tenaga Sampah: Antara Permasalahan Lingkungan dan Percepatan Pembangunan Energi Terbarukan," *Aspir. J. Masal. Sos.*, vol. 12, no. 1, pp. 63–84, 2021, doi: 10.46807/aspirasi.v12i1.2093.
- [11] D. Mutz, D. Hengevoss, C. Hugl, and T. Gross, "Waste-to-energy options in - municipal solid waste management," 2017, [Online]. Available: https://www.giz.de/en/downloads/GIZ_WasteToEnergy_Guidelines_2017.pdf
- [12] M. R. S. Ramadhan, M. Ikhsan, R. M. Putra, J. W. Simatupang, S. Mau, and E. R. Kaburuan, "Waste-to-Energy Potential Using Municipal Solid Waste as One Implementation of Jakarta Smart City," *J. Serambi Eng.*, vol. 6, no. 4, pp. 2382–2394, 2021, doi: 10.32672/jse.v6i4.3499.
- [13] A. F. Bahrah and C. A. Wicaksono, "Reducing environmental risk through urban waste utilization (case study Benowo waste power plant - Surabaya)," in *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2223. doi: 10.1063/5.0001397.
- [14] J. M. Kadang and N. Sinaga, "Pengembangan Teknologi Konversi Sampah Untuk Efektifitas Pengolahan Sampah dan Energi Berkelanjutan," *J. Tek.*, vol. 15, no. 1, pp. 33–44, 2020.
- [15] H. K. Kurniawan, "Studi Deskriptif Strategi Public Private Partnership Pengelolaan Sampah di TPA Benowo Kota Surabaya," *J. Kebijak. dan Manaj. Publik*, vol. 4, no. 2, pp. 210–219, 2016.
- [16] W. S. Winanti, W. Purwanta, and Wiharja, "Utilization of municipal solid waste into electricity energy: A performance of PLTSa Bantargebang pilot project," *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 1034, no. 1, 2022, doi: 10.1088/1755-1315/1034/1/012003.
- [17] R. Ferza, M. I. A. Hamudy, and M. S. Rifki, "Regional Waste Management Cooperation in West Java," *Bisnis Birokrasi J.*, vol. 26, no. 2, 2019, doi: 10.20476/jbb.v26i2.10019.

- [18] I. Chaerudin and V. Sarasi, "Boosting Circular Economics On Municipal Waste Management: Case Study In, West Java," vol. 2, no. 6, pp. 434–444, 2023.
- [19] A F. Lantara. (2023, May 4). DLH Jabar belum pastikan pengoperasian TPPAS Lulut Nambo [Online]. Available: <https://www.antaranews.com/berita/3520305/dlh-jabar-belum-pastikan-pengoperasian-tppas-lulut-nambo>.
- [20] I. Oktafianingsih, "Pemanfaatan Fly Ash Hasil Insinerasi Pembakaran Resin Dan Limbah Plastik Dalam Pembuatan Paving Block," Jur. Kim. Fak. Mat. Dan Ilmu Pengetah. Alam Univ. Negeri Semarang, 2020.
- [21] C. Nugraha and Rolliyah, Pemanfaatan Fly Ash Dan Bottom Ash Untuk Pengelolaan Batuan dan Air Asam di Tambang Batubara. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2021.
- [22] S. Pantini, I. Verginelli, and F. Lombardi, "Analysis and modeling of metals release from MBT wastes through batch and up-flow column tests," Waste Management, vol. 38, pp. 22-32, 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2014.12.002.
- [23] Y. Prasetyo, B. Hidayat, and S. Bintang, "Karakteristik Kimia Biochar Dari Beberapa Biomassa Dan Metode Pirolisis," Agrium, vol. 23, no. 1, pp. 17–21, 2020, [Online]. Available: <https://jurnal.umsu.ac.id/index.php/agrium/article/view/5653>
- [24] A B. Belia. (2023, Jun. 27). Pemprov DKI Setop Pembangunan ITF Sunter [Online]. Available: <https://news.detik.com/berita/d-6794441/pemprov-dki-setop-pembangunan-itf-sunter>.
- [25] PLN. (2022, Aug. 8). PLN Listriki Jaringan Transmisi Tegangan Tinggi Jakarta-Tangerang untuk Perkuat Keandalan Layanan [Online]. Available: <https://web.pln.co.id/media/2022/08/tak-hanya-di-jawa-pln-tambah-spklu-di-kalimantan-dan-Sulawesi>.
- [26] R. J. A. Wibowo, "Tinjauan Kebijakan Hukum Insentif Perpajakan Pada Sektor Energi dan Transportasi Untuk Mendukung Net Zero Emission Tahun 2060 di Indonesia," Jurnal Pajak Indonesia (Indonesian Tax Review), vol. 7, no. 1, pp. 91-107, 2023.
- [27] S. Alzate-Arias, Á. Jaramillo-Duque, F. Villada, and B. Restrepo-Cuestas, "Assessment of government incentives for energy from waste in Colombia," Sustain., vol. 10, no. 4, 2018, doi: 10.3390/su10041294.
- [28] C. Rosengren. (2017, Apr. 24). BioHiTech signs \$1.09M contract to acquire 12-acre site from New Windsor, NY [Online]. Available: <https://www.wastedive.com/news/update-biohitech-signs-109m-contract-to-acquire-12-acre-site-from-new-wi/437488/>.
- [29] I. Mubeen, and A. Buekens, "Chapter 14 - Energy From Waste: Future Prospects Toward Sustainable Development" in Waste Treatment Processes for Energy Generation, Elsevier, 2019, pp. 283-305.
- [30] D. Sullivan. (2012, Mar. 14). Anaerobic Digestion In The Northwest [Online]. Available: <https://www.biocycle.net/anaerobic-digestion-in-the-northwest/>.
- [31] A. Drabek & K. L. Chey. Pyrolysis of Switchgrass to Fuels [Online]. Available: <https://www.ou.edu/class/che-design/a-design/projects-2008/Switchgrass.pdf>
- [32] Ravensr. FAQ How big are the units? [Online]. Available: <https://ravensr.com/faq/>.
- [33] M. Cyranka, and M. Jurczyk, "Energy recovery from municipal waste based on moving grate technology," Agricultural Engineering, vol. 20, no. 1, pp. 23-33, 2016.
- [34] M. F., Rania, I. G. E. Lesmana, and E. Maulana, "Analisis potensi refuse derived fuel (rdf) dari sampah pada tempat pembuangan akhir (tpa) di kabupaten Tegal sebagai bahan bakar incinerator pirolisis," SINTEK JURNAL, vol. 13, no. 1, pp. 51-59, 2019.
- [35] H. Widyatmoko, M. M. Sintorini, E. Suswantoro, E. Sinaga, and N. Aliyah, "Potential of

- refused derived fuel in Jakarta,” in IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci., 2021, vol. 737, no. 1, p. 012005. doi: 10.1088/1755-1315/737/1/012005.
- [36] A. Abdeljaber, R. Zannerni, W. Masoud, M. Abdallah, and L. Rocha-Meneses, “Eco-Efficiency Analysis of Integrated Waste Management Strategies Based on Gasification and Mechanical Biological Treatment,” *Sustain.*, vol. 14, no. 7, 2022, doi: 10.3390/su14073899
- [37] B. Zaman, N. Hardyanti, B. P. Samadikun, M. S. Restifani, and P. Purwono, “Conversion of municipal solid waste to refuse-derived fuel using biodrying,” in IOP Conf. Series: Earth and Environ. Sci., 2021, vol. 623, no. 1, p. 012003.
- [38] O. W. Irawan, L. S. Pratama, and C. Insani, “Analisis Termodinamika Siklus Pembangkit Listrik Tenaga Uap Kapasitas 1500 kW,” *JTM-ITI*, vol. 5, no. 3, pp. 109-118, 2021.
- [39] D. Notosudjono, B. D. Ramadhon, A. T. Prasetyo, H. Samaulloh, A. Mudianto, and A. Asri, “Characteristic evaluation of organic waste power plant in Bantargebang waste processing plant,” in AIP Conference Proceedings, 2020, vol. 2228.
- [40] M. M. Hasan, M. G. Rasul, M. M. K. Khan, N. Ashwath, and M. I. Jahirul, “Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments,” *Renew. and Sustain. Energy Rev.*, vol. 145, no. 111073, 2021.
- [41] P. Brożek, E. Złoczowska, M. Staude, K. Baszak, M. Sosnowski, and K. Bryll, “Study of the Combustion Process for Two Refuse-Derived Fuel (RDF) Streams Using Statistical Methods and Heat Recovery Simulation,” *Energies*, vol. 15, no. 24, pp. 9560, 2022.
- [42] J. Wei, H. Li, and J. Liu, “Heavy metal pollution in the soil around municipal solid waste incinerators and its health risks in China,” *Environ. Research*, vol. 203, no. 111871, 2022.
- [43] A. A. Werkneh, “Biogas impurities: environmental and health implications, removal technologies and future perspectives,” *Heliyon*, vol. 8, no. 10, 2022.
- [44] M. K. Islam, M. S. Khatun, M. A. Arefin, M. R. Islam, and M. Hassan, “Waste to energy: An experimental study of utilizing the agricultural residue, MSW, and e-waste available in Bangladesh for pyrolysis conversion,” *Heliyon*, vol. 7, no. 12, 2021.
- [45] S. M. Ndirangu, Y. Liu, K. Xu, S. Song, “Risk evaluation of pyrolyzed biochar from multiple wastes,” *Journal of Chemistry*, vol. 2019, pp. 1-28, 2019.
- [46] N. Kamińska-Pietrzak, and A. Smoliński, “Selected environmental aspects of gasification and co-gasification of various types of waste,” *J. of Sustain. Min.*, vol. 12, no. 4, pp. 6-13, 2013.
- [47] M. Alsabbagh, “Mitigation of CO₂e emissions from the municipal solid waste sector in the Kingdom of Bahrain,” *Climate*, vol. 7, no. 8, 2019, doi: 10.3390/cli7080100.