

Penentuan teknologi pengolahan sampah menjadi energi di Kabupaten Boyolali dengan *Analytic Hierarchy Process (AHP)*

Novica Ayu Sari¹, Mayang Ananda Rini², Whindy Ndaru Oktaviani³, Rarastika Nur Ghaida⁴, Mega Mutiara Sari^{5*}, I Wayan Koko Suryawan⁶

^{1,2,3,4,5,6}Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Perencanaan Infrastruktur, Universitas Pertamina

*Koresponden E-mail: mega.ms@universitaspertamina.ac.id

(Diterima: 02 November 2021 | Disetujui: 06 Januari 2022 | Diterbitkan: 31 Januari 2022)

Abstract: *The waste composition in Boyolali Regency consists of 37.13% garden waste. The waste can be treated with a thermal process so that it can be reused for energy. The method of sorting waste with thermal technology consists of various types adapted to the gods. This study aimed to evaluate the most co-cog heat treatment processes for waste processing in Boyolali Regency. The determination process is carried out using a literature review, while the selection process uses the Analytical Hierarchy Process (AHP) method. The alternatives given in this research are carbonization, pyrolysis, and synergy processes. In the alternative selection, there are three criteria, namely mass balance, CO2 residue, and energy volatility. In terms of mass balance, the waste that the carbonization process can treat tends to be higher than that of the pyrolysis and incineration processes. Meanwhile, the carbonization process is better than pyrolysis and carbonization for wood waste for emission and energy requirements. The result of AHP shows that the carbonization process is suitable to be applied in Boyolali Regency. However, it is necessary to conduct further studies on non-technical aspects to strengthen alternative election results.*

Keywords: *waste; AHP; mass balance; CO2 residue; energy*

PENDAHULUAN

Berdasarkan data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, jumlah timbulan sampah di Kabupaten Boyolali pada tahun 2017-2018 adalah sebesar 395,9 ton/hari (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2019). Dari jumlah timbulan sampah tersebut hanya 57,9 ton/hari sampah yang ditimbun di TPA dan sebanyak 338 ton/hari sampah tidak dikelola. Adapun komposisi sampah yang terdapat di Kabupaten Boyolali adalah 0,35% berupa sampah makanan; 37,13% sampah ranting dan kebun; 56,12% sampah plastik, 1,15% sampah kertas, dan 5,25% sampah lainnya (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2019).

Pada umumnya, teknologi pengolahan sampah dibagi menjadi tiga kategori, yaitu teknologi pengolahan sampah berbasis fisik, biologi, dan termal. Pada teknologi pengolahan sampah berbasis fisik biasanya diperlukan adanya tahap *pre-treatment* sebelum dilakukan tahap pengolahan selanjutnya yang lebih rinci. Teknologi pengolahan berbasis fisik antara lain adalah *compacting, shredding, pulping, granulating, roll crushing*, dan *Refused Derived Fuel (RDF)*. Sementara itu teknologi pengolahan berbasis biologi yaitu *composting, anaerobic digestion*, dan *landfill gas recovery* memiliki proses yang lama dan rumit (Yodi *et al.*, 2020). Kemudian ada juga pengolahan sampah berbasis termal, yaitu pembakaran/insenerasi, gasifikasi, dan pirolisis. Prinsip utama dari pengolahan sampah berbasis termal ini adalah berkurangnya mas-

sa sampah yang nantinya akan ada produk samping yang dapat dimanfaatkan sebagai energi (Xu *et al.*, 2019).

Konversi waste to energy (WtE) memberikan alternatif yang sangat baik untuk pembakaran bahan bakar fosil (Ahmed *et al.*, 2018; Suryawan *et al.*, 2021). Sumber energi alternatif dari proses pembakaran sampah secara praktis lebih ramah lingkungan daripada banyak bahan bakar fosil (Psomopoulos *et al.*, 2019). Emisi (dioksin, furan, merkuri, kadmium, timbal, asam klorida, sulfur dioksida, dan partikulat) dari fasilitas limbah padat menjadi energi kota di Amerika Serikat ditemukan lebih rendah daripada fasilitas bahan bakar fosil yang sebanding (Psomopoulos *et al.*, 2019).

RDF adalah bahan bakar yang sangat kompleks dan heterogen, mengandung beberapa fraksi bahan seperti limbah kertas, plastik, sisa makanan, logam, dan kayu dengan karakteristik fisik dan kimia yang berbeda (Sarwono *et al.*, 2021). Konsentrasi dan asosiasi kimia yang berbeda dari unsur-unsur yang berbeda berada dalam fraksi material yang berbeda, sehingga nasib yang berbeda selama insinerasi. Sebagaimana diketahui secara prinsip kimia, logam yang masuk ke insinerator tidak akan hancur selama perlakuan panas (Linak & Wendt, 1993). Efisiensi pemulihan energi tergantung pada sejumlah variabel antara lain teknologi, dan kualitas limbah. Penerapan pengolahan sampah menjadi RDF menunjukkan bahwa substitusi kokas minyak bumi sebesar 15% dari RDF untuk menghasilkan satu juta ton klinker dapat

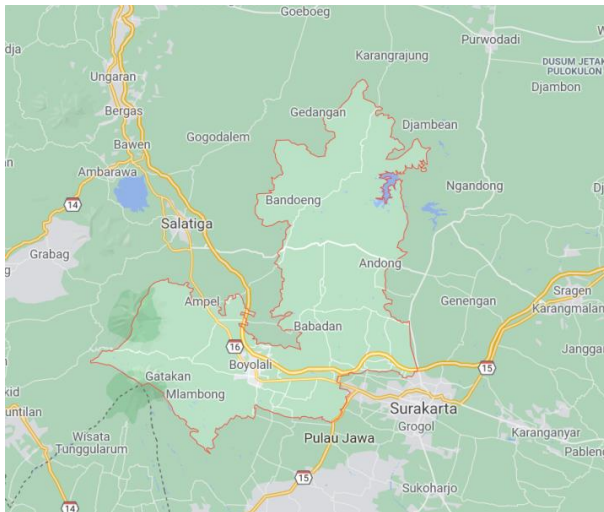
meminimalkan 28970 tCO₂eq emisi per tahun (Ouigmane *et al.*, 2021). Penggantian bahan bakar fosil dengan bahan bakar alternatif dari limbah rumah tangga dapat meminimalkan beban polutan lindi dan mengurangi emisi gas rumah kaca (Mlonka-Mędrala *et al.*, 2021; Ouigmane *et al.*, 2021; Suryawan *et al.*, 2021).

Melihat komposisi sampah Kabupaten Boyolali yang lebih dari setengah total komposisinya mengandung sampah plastik maka proses thermal sangat cocok untuk diterapkan. Plastik dan kebun merupakan salah satu komposisi sampah yang mempunyai nilai kalor diatas 3000 kkal/kg sehingga sangat memungkinkan untuk diolah dalam proses *thermal* (Qonitan *et al.*, 2021). Tujuan studi ini adalah untuk melakukan analisa teknologi konversi energi dari sampah yang cocok dilakukan di Kabupaten Boyolali.

BAHAN DAN METODE

Lokasi Penelitian

Lokasi studi ini berada di Kabupaten Boyolali, Jawa Tengah. Pusat administrasi Kabupaten ini berada di daerah Kemiri dan Mojosongo. Lokasi tersebut terletak sekitar 25 km sebelah barat Kota Surakarta (Gambar 1).



Gambar 1. Peta Lokasi Studi Kabupaten Boyolali (Google Map, 2021)

Pengumpulan Data

Dalam *decision analysis* digunakan dalam penelitian ini dikumpulkan dari data sekunder. Data sekunder tersebut didapatkan dari penelitian dan laporan yang terkait dengan pengelolaan sampah di Kabupaten Boyolali. Selain itu data timbulan dan komposisi sampah diakses melalui halaman Sistem Informasi Sampah Nasional (Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan, 2019). Review dilakukan dengan melalui jurnal, prosiding, dan buku yang diterbitkan secara nasional dan internasional.

Penentuan dan Pemilihan Alternatif

Penentuan alternatif dilakukan melalui studi literatur yang disesuaikan dengan jenis sampah yang harus diolah di Kabupaten Boyolali. Pemilihan alternatif yang dibuat dilakukan dengan *Analytic Hierarchy Process* (AHP). AHP yang diusulkan Saaty (Saaty, 2003) telah diterapkan secara luas untuk mengevaluasi alternatif multi kriteria yang kompleks di sejumlah bidang termasuk bidang Teknik Lingkungan Chaerul & Rahmania, 2019; Devianto *et al.*, 2021; Mlonka-Mędrala *et al.*, 2021). AHP memberikan kemudahan penggunaan, penataan masalah secara sistematis dan menghitung bobot kriteria dan prioritas alternatif (Liu *et al.*, 2020).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penentuan Alternatif Pengolahan

Karbonisasi termasuk teknologi yang digunakan untuk mengubah limbah padat menjadi arang sebagai produk utamanya dengan memasukkan biomassa sebagai bahan bakar utamanya pada suhu 400–600°C (Ridhuan & Suranto, 2017). Karbonisasi merupakan termasuk dalam pengolahan thermal dengan prinsip pirolisis, dengan waktu yang lebih lambat supaya menghasilkan arang yang lebih banyak (Rahmatullah *et al.*, 2019). Karbonisasi dilakukan dengan membakar biomassa padat untuk menghilangkan kandungan air atau kandungan lain yang tidak dibutuhkan oleh arang (Suranto & Ridhuan, 2017). Mutu arang akan semakin baik jika laju proses karbonisasi lambat (Lempang, 2014). Pada penelitian yang dilakukan Liliana menjelaskan bahwa suhu karbonisasi berbanding terbalik dengan arang yang dihasilkan (Liliana, 2010). Semakin tinggi suhu pada proses karbonisasi, maka arang yang didapatkan semakin rendah, dan sebaliknya. Sedangkan suhu karbonisasi berbanding lurus menggunakan nilai kalor pembakaran, meningkat suhu karbonisasi maka nilai kalor yang didapatkan meningkat. Faktor-faktor yg bisa menghipnotis proses karbonisasi diantaranya: (1) Waktu karbonisasi, tergantung dalam jenis & jumlah bahan yang diolah; (2) Suhu karbonisasi, menghipnotis output arang lantaran meningkat suhu pembakaran maka arang yang diperoleh semakin berkurang. Hal ini ditimbulkan lantaran semakin banyak zat yang dapat terurai serta teruapkan (Dewi, 2014); dan (3) Ukuran bahan baku, semakin kecil ukuran bahan baku yang digunakan maka semakin cepat perataan panas keseluruhan bahan baku, sehingga proses karbonisasi berjalan maksimal (Dewi, 2014).

Prinsip dari proses karbonisasi adalah pembakaran yang dilakukan dengan jumlah suplai oksigen sangat minim. Limbah domestik di Boyolali yang memiliki persentase jenis sampah organik cukup besar (sampah plastik 56,12% dan sampah kebun 37,13%) dapat dimanfaatkan sebagai bahan pembuatan briket. Bahan-bahan yang berasal dari

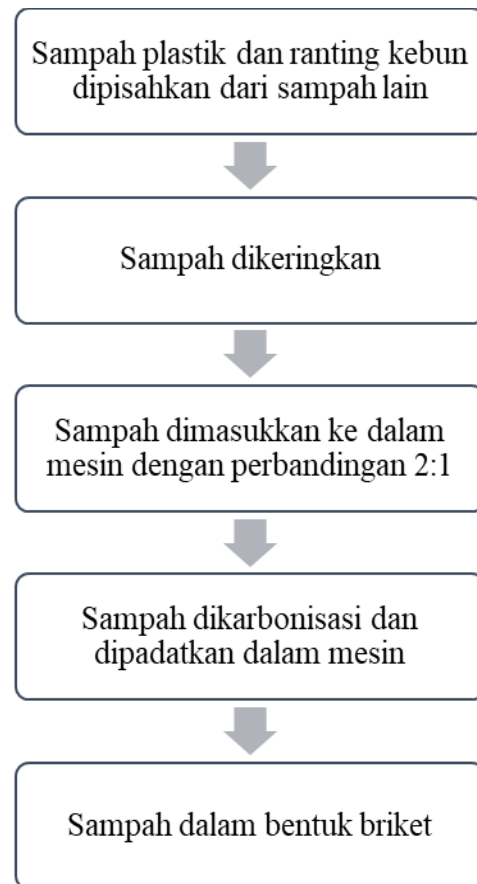
limbah domestik Kabupaten Boyolali yang digunakan dalam pembuatan briket menurut Naryono (2019) antara lain: (1) Sampah plastik yang berasal dari jenis plastik LDPE dari tutup galon air mineral, jenis plastik PP dari kemasan makanan ringan dan kantong plastik, dan jenis plastik PET dari botol air mineral; dan (2) Sampah ranting/ kebun.

Adapun standar yang digunakan untuk menentukan kualitas briket adalah menggunakan SNI 01-6235-2000 sebagaimana dapat dilihat pada Tabel 1. Sedangkan secara menyeluruh proses pengolahan dengan karbonisasi jika diterapkan di Kabupaten Boyolali dapat dilihat pada Gambar 2.

Tabel 1. Standar Kualitas Briket Berdasarkan SNI 01-6235-2000

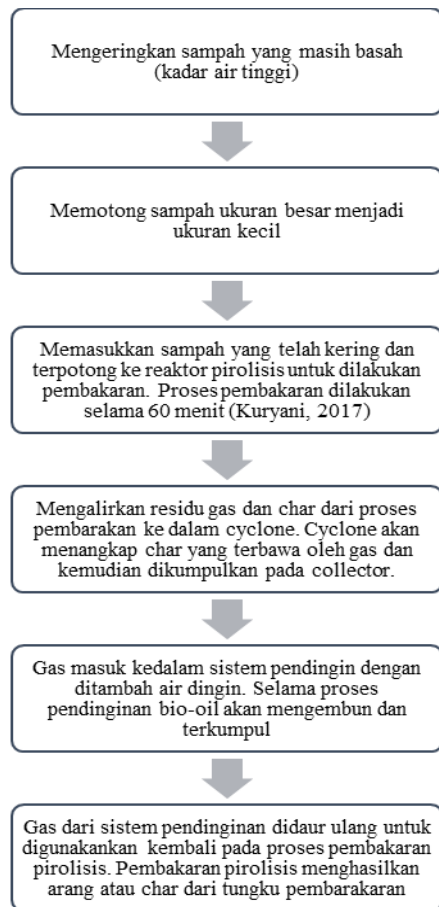
No.	Parameter	Satuan	Kisaran
1	<i>Inherent Moisture</i>	%	Maks 8
2	<i>Ash Content</i>	%	Maks 8
3	<i>Volatile Matter Fixed</i>	%	Maks 15
4	<i>Carbon</i>	%	Min 77
5	<i>Calorific Value</i>	cal/gr	Min 5000

Alternatif kedua adalah dengan proses pirolisis. Pirolisis adalah proses dekomposisi termokimia dari material organik yang terjadi tanpa oksigen. Umumnya proses pirolisis terjadi pada suhu 300°C - 600°C (Basu, 2010). Secara umum, produk akhir pirolisis berupa residu padat dengan kandungan karbon tinggi; produk cair berupa tar, hidrokarbon, dan air; serta produk gas (Caroline *et al.*, 2020). Dalam proses pengolahan sampah plastik dan sampah kebun, proses pirolisis dapat diaplikasikan guna mengubah timbulan sampah menjadi energi yang dapat dimanfaatkan kembali. Hal ini dapat mengurangi jumlah timbulan sampah plastik dan sampah kebun di Kabupaten Boyolali. Salah satu aplikasi pirolisis yang telah dilakukan di Tangerang Selatan dengan menggunakan mesin Musayama (Musnah Kaya Manfaat), dapat mengolah 15-ton sampah per hari dari 10.000 rumah tangga (Tokohinspirasi.id, 2019). Pada penelitian yang dilakukan oleh Kuryani, proses pirolisis dimulai dengan menyiapkan alat dan bahan yang akan digunakan saat proses pirolisis (Kuryani, 2017). Alat yang diperlukan yaitu rangkaian reaktor pirolisis. Sedangkan bahan yang digunakan pada proses pirolisis adalah sampah plastik HDPE dan sampah ranting atau kayu.



Gambar 2. Diagram alir perencanaan proses pengolahan sampah di Kabupaten Boyolali dengan proses karbonasi

Proses pembakaran pirolisis terdiri dari beberapa tahap, seperti tertera pada Gambar 3. Faktor-faktor yang mempengaruhi proses pirolisis adalah komposisi bahan, jenis bahan, suhu, waktu pembakaran reaktor, ukuran bahan baku, dan kelembaban bahan bakar. Penambahan bahan plastik pada proses pirolisis dapat meningkatkan kandungan hidrogen pada produk minyak (Auxilio *et al.*, 2017). Penggunaan pirolisis dapat menghasilkan produk yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar (Kuryani, 2017). Hasil produk dari pirolisis yaitu berupa char, minyak, dan gas. Char atau arang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Keunggulan lain dari Rare adalah dapat digunakan sebagai adsorben pengolahan air limbah untuk menghilangkan logam berat. Gas yang dihasilkan dapat digunakan sebagai sumber energi, tetapi digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi total dari proses pirolisis (Kuryani, 2017).



Gambar 3. Diagram alir perencanaan proses pengolahan sampah di Kabupaten Boyolali dengan proses pirolisis

Alternatif terakhir adalah dengan pengolahan insinerasi. Insinerasi adalah teknologi yang mengubah materi padat (limbah) menjadi gas. Proses insinerasi menggunakan suhu diatas 850°C sehingga dapat menghasilkan energi panas (Suresh Kumar *et al.*, 2020). Energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan kembali sebagai bahan bakar insinerasi (*recovery energy*). Tidak semua sampah dapat menjadi bahan bakar insinerator. Terdapat persyaratan agar proses pembakaran berjalan dengan baik yaitu bahan bakar sampah memiliki nilai kalor sebesar 7 MJ/kg (BPSDM PU, 2018), jika nilai kalor tidak memenuhi persyaratan maka diperlukan proses *pre-treatment* atau bahan bakar tambahan untuk meningkatkan nilai kalor (Sarwono *et al.*, 2021).

Kriteria Pemilihan Alternatif

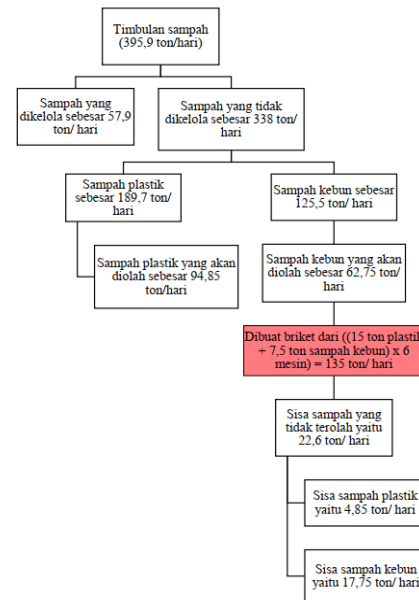
Alternatif rancangan yang akan dipilih dievaluasi dengan menggunakan metode AHP, yaitu metode untuk menentukan keputusan dengan menggunakan model matematis. AHP berperan dalam menentukan prioritas dari beberapa kriteria dengan membandingkan masing-masing dari kriteria. Hasil akhir yang diperoleh dari AHP adalah prioritas alternatif yang akan digunakan. Terdapat tiga alter-

natif dalam perencanaan pengolahan sampah, yaitu karbonisasi, pirolisis, dan insinerasi. Sementara itu sistem pengolahan yang akan dipilih memiliki empat kriteria yang digunakan dalam pemilihan alternatif, yaitu: (1) *Mass balance* jumlah sampah terolah. Kriteria ini menjadi paling penting di antara yang lainnya dikarenakan disesuaikan dengan tujuan pengolahan adalah untuk mengurangi timbulan sampah plastik dan sampah kebun; (2) Residual CO_2 . Pengolahan sampah menggunakan energi termal dikenal dengan emisi yang dihasilkannya, oleh karena itu diperlukan kriteria ini untuk membandingkan jumlah residual CO_2 yang dikeluarkan dari tiap alternative; dan (3) Penggunaan energi diharapkan dengan jumlah yang kecil, sehingga lebih ramah lingkungan dan biaya.

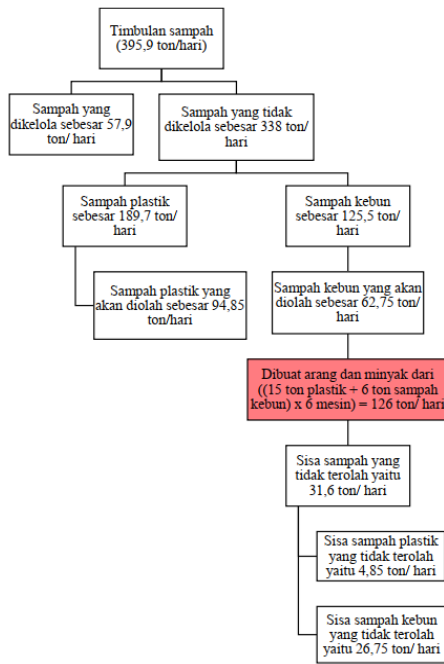
Mass Balance

Proses pembakaran karbonisasi akan menghasilkan arang yang selanjutnya akan dibuat menjadi briket. Alat yang digunakan untuk proses karbonisasi berupa alat pembakaran yang akan langsung menghasilkan briket dengan diameter 12 mm. Alat ini memiliki kapasitas pembakaran sebesar 1 ton/ jam. Komposisi sampah yang dibakar pada proses karbonisasi memiliki perbandingan 2 : 1. Gambar 4 menunjukkan bagan dari mass balance proses karbonisasi.

Proses pembakaran pada pirolisis akan menghasilkan arang dan minyak yang dapat digunakan menjadi bahan bakar. Alat yang digunakan dalam proses pirolisis memiliki kapasitas 1 ton/ batch. Perbandingan komposisi bahan bakar yang digunakan dalam proses ini yaitu 2,5 : 1 antara plastik dan sampah kebun. Gambar 5 menunjukkan bagan dari *mass balance* proses pirolisis.

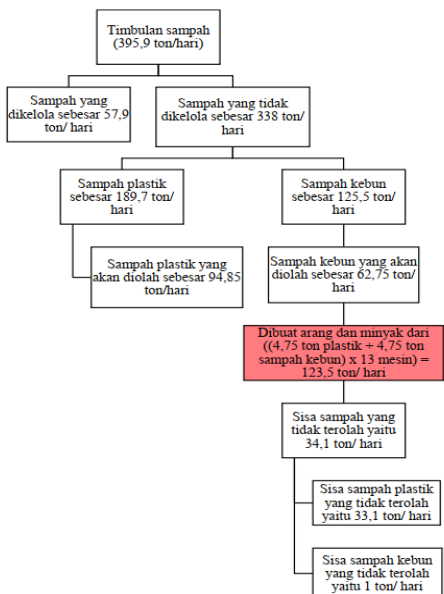


Gambar 4. Diagram alir *mass balance* perencanaan proses pengolahan sampah di Kabupaten Boyolali dengan proses karbonisasi



Gambar 5. Diagram alir *mass balance* perencanaan proses pengolahan sampah di Kabupaten Boyolali dengan proses pirolisis

Proses pembakaran pada insinerasi akan menghasilkan *char*, minyak, dan gas yang dapat digunakan menjadi bahan bakar. Alat yang digunakan dalam proses insinerasi memiliki kapasitas 500 kg/ jam. Perbandingan komposisi bahan bakar yang digunakan dalam proses ini yaitu 1:1 antara plastik dan sampah kebun. Gambar 6 menunjukkan bagan dari *mass balance* proses insinerasi.



Gambar 6. Diagram alir *mass balance* perencanaan proses pengolahan sampah di Kabupaten Boyolali dengan proses insinerasi

Residual CO₂

Jumlah residu CO₂ diketahui berdasarkan kajian literature sebelumnya yang pernah dilakukan terkait tiga proses thermal tersebut. Perhitungan emisi total dari proses pembakaran dapat dilakukan dengan menggunakan faktor emisi dan jumlah aktivitas. Hasil perhitungan jumlah emisi CO₂ untuk masing masing pengolahan di Kabupaten Boyolali dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Emisi residu CO₂ untuk masing-masing proses alternatif proses thermal pengolahan sampah di Kabupaten Boyolali

Alternatif	Emission Factor (kg CO ₂ eq./ton)	Sumber	Jumlah Sampah yang Dio-lah (ton/hari)	Jumlah Emisi (ton CO ₂ eq./hari)
Karbonisasi	146,1	(Wang et al., 2013)	135	19.72
Pirolisis	175	(Thomsen et al., 2011)	126	22.05
Insinerasi	443,643	(Jie et al., 2013)	123,5	54.79

Kebutuhan Energi

Menipisnya cadangan sumber energi konvensional, bersama dengan tangkas konsumsinya yang lebih tinggi daripada pembangkitan telah menempatkan peningkatan permintaan pada pasokan sumber energi non-konvensional (Zendehboudi *et al.*, 2018). Perhitungan energi dari karbonisasi, pirolisis dan insinerator didapatkan dari spesifikasi dari Tabel 3.

Tabel 3. Spesifikasi unit proses pengolahan sampah dengan proses karbonisasi

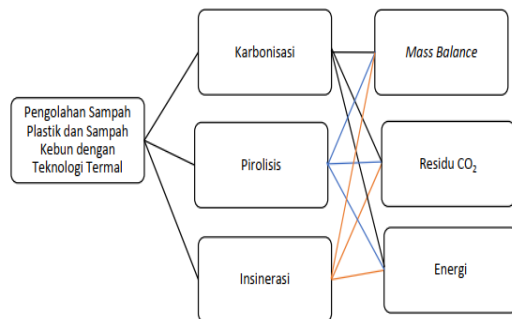
Spesifikasi	Unit
Karbonisasi	
Layanan Hidup	5 Tahun
Power	50 kW atau 56,25 kVA
Kapasitas	1.000 kg/jam
Pirolisis	
Pemakaian Bahan Bakar	Pemanas listrik atau bakar
Layanan Hidup	5 Tahun
Power	20 kW atau 25 kVA
Kapasitas	500 kg-10 ton per batch
Incinerator	
Pemakaian Bahan Bakar	Mesin Diesel/LPG/Gas Alam
Layanan Hidup	10-20 Tahun
Tegangan	220V, 50hz/60 hz
Power	114 kW

Sebagai alternatif kedua, pirolisis adalah teknologi umum lainnya untuk mengubah biowaste basah menjadi energi dan sumber daya. Beberapa

produk berharga termasuk *pyrochar*, *bio-oil* dan biogas yang dihasilkan selama proses pirolisis (Laird *et al.*, 2009), dan kebutuhan energi tergantung pada kondisi operasional. Jika hanya dibandingkan dengan kebutuhan power proses karbonisasi membutuhkan tenaga yang lebih rendah dibandingkan dengan insinerasi dan pirolisis.

Pemilihan Alternatif

Matris alternatif terhadap kriteria pengolahan sampah dengan teknologi thermal di Kabupaten Boyolali dapat dilihat pada Gambar 7. Pembobotan yang dihitung melalui matriks berpasangan AHP berkontribusi signifikan terhadap ketidakjelasan pendekatan keputusan multikriteria (Cabrera-Barona & Ghorbanzadeh, 2018).



Gambar 7. Matriks AHP pemilihan proses pengolahan thermal sampah di Kabupaten Boyolali

Pembobotan dilakukan berdasarkan kajian kriteria dan alternatif yang dilakukan sebelumnya. dengan pembuatan matriks untuk masing-masing kriteria. Proses insinerasi memiliki bobot tertinggi dimana sampah yang diolah lebih banyak dibandingkan dengan alternatif lain. Sedangkan untuk jumlah residu CO₂ karbonisasi lebih ramah lingkungan dibandingkan dengan proses pirolisis dan insinerasi. Sedangkan untuk kebutuhan energi proses karbonisasi lebih tinggi. Kriteria yang memiliki bobot tertinggi adalah kebutuhan energi. Hasil akhir perhitungan matriks antara kriteria dan alternatif dapat dilihat pada persamaan 1.

Tabel 4. Matriks Pemilihan Alternatif dan Kriteria

	Mass Balance	Residu CO ₂	Energi	Kriteria dan Kriteria	
Karbonisasi	0,82	0,60	1,25	0,055	0,41
Pirolisis	0,22	0,25	0,68	x 0,1	= 0,21
Insinerasi	0,09	0,10	0,25	0,247	0,07

Berdasarkan kriteria yang ditentukan yaitu mass balance, residu CO₂ dan kebutuhan energi proses karbonisasi merupakan alternatif yang memiliki bobot paling tinggi, sehingga proses ini paling cocok

untuk diterapkan dalam pengolahan sampah di Kabupaten Boyolali. Akan tetapi juga perlu diperhatikan dalam kajian ini kriteria yang dipilih hanya berdasarkan kajian teknis. Teknis lain yang perlu diperhatikan dalam proses thermal adalah kebutuhan lahan, lokasi, biaya operasional, biaya investasi, dan lainnya. Sedangkan aspek non teknis juga perlu dipertimbangkan dalam pengambilan keputusan seperti anggaran, peraturan, peran serta masyarakat, dan instansi pemerintah.

KESIMPULAN

Berdasarkan kriteria *mass balance*, residu CO₂, dan kebutuhan energi dalam proses pengolahan sampah di Kabupaten Boyolali adalah proses karbonisasi. Proses karbonisasi lebih banyak dapat mengolah sampah, menghasilkan CO₂ yang lebih rendah, dan membutuhkan energi dalam proses dibandingkan dengan alternatif pirolisis dan insinerator.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penelitian ini merupakan salah satu hasil dari Kuliah *Capstone Design*. Untuk para penulis berterima kasih kepada reviewer eksternal yang telah membantu meningkatkan kualitas desain.

DAFTAR PUSTAKA

Ahmed, S. I., Fatta, A. Al, Hossain, M. J., & Tanvir, S. (2018). Potential of Waste to Energy (WtE) Technologies for Efficient Management of Municipal Solid Waste in Bangladesh. *International Conference on Energy & Environment, October*, 1–5. Paper ID_2018_170.

Auxilio, A. R., Choo, W.-L., Kohli, I., Chakravartula Srivatsa, S., & Bhattacharya, S. (2017). An experimental study on thermo-catalytic pyrolysis of plastic waste using a continuous pyrolyser. *Waste Management*, 67, 143–154. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.011>.

Basu, P. (2010). *Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory*. Academic press.

BPSDM PU. (2018). *Modul Pelatihan Teknologi WtE Termal Insinerasi*. Kepala Pusat Pendidikan dan Pelatihan Jalan, Perumahan, Permukiman, dan Pengembangan Infrastruktur Wilayah. https://bpsdm.pu.go.id/center/pelatihan/uploads/edok/2019/04/e34ac_9_Modul_Insinerasi.pdf.

Cabrera-Barona, P., & Ghorbanzadeh, O. (2018). Comparing Classic and Interval Analytical Hierarchy Process Methodologies for Measuring Area-Level Deprivation to Analyze Health Inequalities. In *International Journal of Environmental Research and Public Health* (Vol. 15, Issue 1). <https://doi.org/10.3390/ijerph15010140>.

- Caroline, R. C., Peter, G., Lucejko, J. J., & Leme, C. L. D. (2020). *Using analytical pyrolysis and scanning electron microscopy to evaluate charcoal formation of four wood taxa from the caatinga of north-east Brazil*. Università di Pisa. <https://arpi.unipi.it/handle/11568/1051919#.YYm897oRVPY>. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0165237020304241>.
- Chaerul, M., & Rahmania, S. (2019). Multikriteria Analisis dalam Pemilihan Alat Pengumpul Sampah dengan Pembobotan Kombinasi Hasil Analisis Hierarchy Process (AHP) dan Time Motion Study (TMS). *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 17(2), 222 <https://doi.org/10.14710/jil.17.2.222-230>.
- Devianto, L. A., Dewi, N. N. A. M. S. U., Helmy, Q., & Chaerul, M. (2021). Faecal sludge treatment facility site selection using GIS-based multi-criteria analysis and AHP: Case study of Bogor Regency. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 733(1), 12150. <https://doi.org/10.1088/1755-%201315/733/1/012150>.
- Dewi, D. (2014). *Pembuatan Biocoal Dari Campuran Batubara Lignit, Sekam Padi, Dan Tempurung Kelapa (Pengaruh Temperatur Karbonisasi Dan Ukuran Material)*. Doctoral dissertation, Politeknik Negeri Sriwijaya). Google Map. (2021). *Google Map*. <https://www.google.com/maps/place/>.
- Jie, P., Xingzhong, Y., Hongwei, J., Huajun, H., & Wenkai, B. (2013). Analysis on greenhouse gas emissions from different sewage sludge treatments and disposal processes. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 7(6), 2285–2290. <http://www.cjee.ac.cn/en/article/id/20130648>.
- Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan. (2019). *Sistem informasi Pengelolaan Sampah Nasional*. <http://sipsn.menlhk.go.id>.
- Kuryani, E. (2017). *Pirolisis Sampah dengan Variasi Jenis Ranting dan Kantong Plastik HDPE*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Laird, D. A., Brown, R. C., Amonette, J. E., & Lehmann, J. (2009). Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3(5), 547–562. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/bbb.169>.
- Lempang, M. (2014). Pembuatan dan Kegunaan Karbon Aktif. *Info Teknis EBONI*, 11(2), 65–80. <http://ejournal.forda-mof.org/ejournal-litbang/index.php/buleboni/article/view/5041/4463arang>.
- Liliana, W. (2010). *Peningkatan kualitas biopelet bungkil jarak pagar sebagai bahan bakar melalui teknik karbonisasi*. Institut Pertanian Bogor.
- Linak, W. P., & Wendt, J. O. L. (1993). Toxic metal emissions from incineration: Mechanisms and control. *Progress in Energy and Combustion Science*, 19(2), 145–185. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0360-1285\(93\)90014-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0360-1285(93)90014-6).
- Liu, Y., Eckert, C. M., & Earl, C. (2020). A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements. *Expert Systems with Applications*, 161, 113738. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113738>.
- Mlonka-Mędrala, A., Dziok, T., Magdziarz, A., & Nowak, W. (2021). Composition and properties of fly ash collected from a multifuel fluidized bed boiler co-firing refuse derived fuel (RDF) and hard coal. *Energy*, 234, 121229. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121229>.
- Naryono, E. (2019). Pembuatan briket campuran sampah organik sisa makanan dan sampah plastik sebagai binder untuk bahan bakar padat. *Seminar Nasional Rekayasa Proses Industri Kimia*, 3(1), 7–9. <https://prosiding.polinema.ac.id/sngbr/index.php/snrpik/article/view/245/205>.
- Ouigmane, A., Boudouch, O., Hasib, A., Ouhine, O., Abba, E. H., Isaifan, R. J., & Berkani, M. (2021). The Impact of RDF Valorization on the Leachate Quality and on Emissions from Cement Kiln (Case Study of a Region in Morocco). *Pollution*, 7(2), 293–307. <https://doi.org/10.22059/poll.2021.309346.890>.
- Psmopoulos, C. S., Limperis, I., & Kalkanis, K. (2019). Evaluating the energy demand for municipal solid wastes treatment facilities: A critical approach toward sustainable development. *AIP Conference Proceedings*, 2190(1), 20046. <https://doi.org/10.1063/1.5138532>.
- Qonitan, F. D., Wayan Koko Suryawan, I., & Rahman, A. (2021). Overview of Municipal Solid Waste Generation and Energy Utilization Potential in Major Cities of Indonesia. *Journal of Physics: Conference Series*, 1858(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1858/1/012064>.
- Rahmatullah, Rizka Wulandari Putri, & Enggal Nurisman. (2019). Produksi bio-oil dari limbah kulit durian dengan proses pirolisis lambat. *Jurnal Teknik Kimia*, 25(2), 50–53. <https://doi.org/10.36706/jtk.v25i2.425>.
- Ridhuan, K., & Suranto, J. (2017). Perbandingan Pembakaran Pirolisis Dan Karbonisasi Pada Biomassa Kulit Durian Terhadap Nilai Kalori. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, 5(1), 50–56. <https://doi.org/10.24127/trb.v5i1.119>.
- Saaty, T. L. (2003). Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research*, 145(1), 85–91. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(02\)00227-8](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(02)00227-8).
- Sarwono, A., Septiariva, I. Y., Qonitan, F. D., Zahra, N. L., Sari, N. K., Fauziah, E. N., Ummatin, K. K., Amoa, Q., Faria, N., Wei, L. J., & Suryawan, I.W. K. (2021). Municipal Solid Waste Treatment

- for Energy Recovery Through Thermal Waste-To-Energy in Depok City, Indonesia. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 85. Mohon di cek kembali. https://semarakilmu.com.my/journals/index.php/fluid_mechanics_thermal_sciences/article/view/22.
- Suresh Kumar, A., Muthukannan, M., & Sri Krishna, I. (2020). Optimisation of bio medical waste ash in GGBS based of geopolymer concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 872, 12163. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/872/1/012163>.
- Suryawan, I. W. K., Wijaya, I. M. W., Sari, N. K., & Yenis, I. (2021). Potential of Energy Municipal Solid Waste (MSW) to Become Refuse Derived Fuel (RDF) in Bali Province, Indonesia. *Jurnal Bahan Alam Terbarukan*, 10(1).09-15 (mohon di cek kembali sumbernya). <https://journal.unnes.ac.id/nju/index.php/jbat/article/view/29804>.
- Thomsen, T., Hauggaard-Nielsen, H., Bruun, E. W., & Ahrenfeldt, J. (2011). *The potential of pyrolysis technology in climate change mitigation - influence of process design and - parameters, simulated in SuperPro Designer software*. ??? Rujukan ini merupakan technical Report (Denmark). <https://www.osti.gov/etdeweb/biblio/1004725>.
- Tokohinspirasi.id. (2019). *Musayama, Mesin Pemusnah Sampah Kaya Manfaat*. <https://tokohinspirasi.id/musayama-mesin-pemusnah-sampah-kaya-manfaat>.
- Wang, N.-Y., Shih, C.-H., Chiueh, P.-T., & Huang, Y.-F. (2013). Environmental Effects of Sewage Sludge Carbonization and Other Treatment Alternatives. In *Energies* (Vol. 6, Issue 2). <https://doi.org/10.3390/en6020871>.
- Xu, H., Lin, W. Y., Dal Magro, F., Li, T., Py, X., & Romagnoli, A. (2019). Towards higher energy efficiency in future waste-to-energy plants with novel latent heat storage-based thermal buffer system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 324–337. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.009>.
- Yodi, Y., Suryawan, I. W. K., & Afifah, A. S. (2020). Estimation of Green House Gas (GHG) emission at Telaga Punggur landfill using triangular, LandGEM, and IPCC methods. *Journal of Physics: Conference Series*, 1456(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1456/1/012001>.
- Zendehboudi, A., Baseer, M. A., & Saidur, R. (2018). Application of support vector machine models for forecasting solar and wind energy resources: A review. *Journal of Cleaner Production*, 199, 272–285. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.164>
-