



FROM TRASH TO TREASURE: TINJAUAN METODE *PRE-TREATMENT* PADA LIMBAH RUMAH TANGGA DAN PENILAIANNYA TERHADAP ANALISIS SIKLUS HDUP

Mahdiyyah Naurah Salsabila

naurahsalsabila01@student.ppns.ac.id

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Florentina Ratna Eris Nanda

florentinaratna@student.ppns.ac.id

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Salwa Permata A'yun

salwapermata@student.ppns.ac.id

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Aisyah Lala Aprillia

aisyahlala@student.ppns.ac.id

Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya

Denny Oktavina Radianto

dennyokta@gmail.com

Program Studi D-4 Teknik Pengolahan Limbah, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya, Indonesia

Abstract Waste pollution has become a trending topic which involves pollution of the ecology, ecosystem, and requires certain processes. Solutions regarding this have changed along with technological developments in converting waste or rubbish into high-value products. Recovery of this waste requires various methods ranging from chemical, thermal, thermochemical, physical, biological and microbiological methods. The use and application of the method in industry has been proven and explained in detail. In this article, a systematic literature review method is used using predetermined keywords so that 46 references are obtained and discussed in the results and discussion section. Data is sorted and created into several dimensions. The largest composition of waste is dominated by household waste, based on its source, and organic waste such as food waste, based on its composition. The pre-treatment methods given to waste also have their own advantages and limitations. In addition, the life cycle assessment of various methods also shows the impact of each pre-treatment on the environment, social sustainability and a better environment. Therefore, it can be concluded that the government must determine the latest methods in managing this waste by considering its impact on ecology, ecosystems and the environment.

Keywords: household waste, organic waste, pre-treatment methods, recycling, life cycle analysis

Abstract Pencemaran limbah telah menjadi topik yang *trending* yang melibatkan pencemaran ekologi, ekosistem, dan memerlukan proses tertentu. Solusi terkait hal ini telah berubah seiring dengan perkembangan teknologi dalam mengonversi limbah atau sampah menjadi produk yang bernilai tinggi. Pemulihan limbah ini memerlukan metode yang berbagai macam mulai dari metode kimia, termal, termokimia, fisika, biologi, dan mikrobiologi. Pemanfaatan dan penerapan metode dalam industri telah dibuktikan dan dijelaskan secara rinci. Pada artikel ini, metode tinjauan literatur secara sistematis digunakan dengan menggunakan kata kunci yang telah ditentukan sehingga didapatkan 46 referensi dan dibahas pada bagian hasil dan diskusi. Data disortir dan dibuat menjadi beberapa dimensi. Komposisi sampah terbesar didominasi oleh sampah rumah tangga, berdasarkan sumbernya, dan sampah organik seperti sisa makanan, berdasarkan komposisinya. Metode pra-perlakuan yang diberikan kepada limbah juga memiliki keunggulan dan keterbatasan tersendiri. Selain itu, penilaian siklus hidup berbagai metode juga menunjukkan dampak masing-masing pra-perlakuan terhadap lingkungan, keberlanjutan sosial, dan lingkungan yang lebih baik. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa pemerintah harus menentukan metode yang mutakhir dalam mengelola limbah ini dengan mempertimbangkan dampaknya terhadap ekologi, ekosistem, dan lingkungan

Keywords: limbah rumah tangga, limbah organik, metode pra-perlakuan, daur ulang, analisis siklus hidup

Received April 30, 2024; Revised Mei 06, 2024; Juni 01, 2024

* Mahdiyyah Naurah Salsabila, *naurahsalsabila01@student.ppns.ac.id*

Pendahuluan

Limbah rumah tangga akhir-akhir ini dinggap sebagai permasalahan yang serius sehingga banyak pembahasan mengenai metode yang tepat berdasarkan penilaian *life cycle assessment* (LCA). Secara global, berdasarkan data statistik The World Counts (2022) bahwa terdapat sekitar sepertiga (700 miliar ton pada pertengahan bulan Juli 2022) dari seluruh limbah diduduki oleh limbah sisa makanan yang tentu saja berasal dari rumah tangga. FAO (2020) juga melaporkan bahwa 14.7% limbah dihasilkan dari benua Asia Tenggara. Oleh karena itu, dibutuhkan inovasi untuk meningkatkan produktivitas pengelolaan sampah.

Berdasarkan capaian kinerja pengelolaan sampah yang dilakukan oleh SIPSN dan dilakukan pada 135 kota atau kabupaten se-Indonesia pada tahun 2023 bahwa jumlah timbulan sampah yang dihasilkan oleh Indonesia sebesar 17,517,782.30 ton/tahun dengan angka pengurangan sampah mencapai 16.57%/tahun. Dalam hal ini, penanganan sampah di Indonesia telah mencai persentase sebesar 51.16% tetapi dengan angka 32.28% pada sampah yang tidak terkelola (SIPSN, 2024). Selain itu, terdapat 2,151,787.36 ton sampah didaur ulang setiap tahunnya. Komposisi sampah, secara nasional, didominasi oleh sampah sisa makanan (40.9%) dan plastik (18.33%) yang dimana sumber sampah terbesar didapatkan dari rumah tangga sebesar 38.87% (SIPSN, 2024). Sehingga dapat disimpulkan bahwa sampah organik rumah tangga merupakan salah satu sampah penyumbang sampah kota yang signifikan di Indonesia.

Jumlah penduduk dan kepadatan penduduk di Indonesia telah mencapai angka masing-masing 275 juta jiwa dan 146 per km² pada tahun 2022. Apalagi, jumlah di atas selalu meningkat per tahunnya di tiap daerah. Peningkatan angka ini menjadi pemicu laju penimbunan sampah dimana laju pertumbuhan penduduk di Indonesia mencapai 1.19% pada tahun 2015 hingga 2020 dan asumsi pertumbuhan perkiraan timbulan sampah 1% per tahun (Direktorat Pengelolaan Sampah-KLHK, 2016). Padahal, pengelolaan sampah yang diterapkan dengan baik dapat berpotensi pada ekonomi masyarakat lokal. Hal ini dibuktikan oleh penelitian (Dwioktovanny dkk., 2017) bahwa penerapan konsep 3R meningkatkan pendapatan kolektor di Kota Kudus menjadi Rp8.052.679,00/hari. Hal ini mengindikasikan bahwa komposisi di sampah organik memiliki potensi khusus secara komersial dan perlu dikaji kembali.

Sampah organik merupakan sampah yang dapat terurai dengan baik, biasanya mencakup sisa makanan, sisa-sisa hewan dan tumbuhan yang dapat menyebabkan kerusakan lingkungan yang signifikan dan potensi ancaman pada makhluk hidup (Misslin dkk., 2022; Li dkk., 2023). Substansi utama dalam limbah organik rumah tangga adalah fraksi organik dari sisa makanan dan limbah hijau yang dihasilkan dari proses rumah tangga (Zorpas dkk., 2018). Salah satu potensi ancaman limbah organik yang sangat terlihat dengan jelas adalah polusi dan berdampak kepada kelangsungan hidup makhluk hidup dan perusakan ekosistem. Oleh karena itu, pengelolaan limbah yang efektif dan efisien terutama dalam pengelolaan limbah organik perlu dikaji lebih lanjut.

Pengomposan juga merupakan pendekatan yang menjamin efektifitas pengelolaan limbah yang memiliki dampak positif kepada lingkungan (Li dkk., 2023; Shi dkk., 2021). Tetapi, manajemen pengomposan yang tidak tepat ternyata berkontribusi negatif kepada lingkungan. Hal ini dikonfirmasi oleh (Neugebauer dkk., 2021; Ren dkk., 2022) bahwa pengomposan menghasilkan gas rumah kaca, meningkatkan efek rumah kaca, dan menurunkan unsur hara tanah secara serius. Dengan demikian, pengendalian efektif untuk mengatasi isu-isu di atas perlu dikaji kembali.

Daur ulang limbah merupakan suatu pengelolaan yang sangat direkomendasikan sebagai sebuah jalan untuk mengatasi tantangan global seperti perubahan iklim, penurunan emisi gas

karbon, dan keamanan pangan (Chabbi dkk., 2017). Sinddhu dkk., (2019) mengakui bahwa metode daur ulang dari limbah ini harus dikembangkan agar layak secara komersial. Akhir-akhir ini, metode daur ulang yang sering digunakan adalah metode secara mekanik, kimia, termokimia, biologi, dan mikrobiologi (Prajapati dkk., 2021).

Pengelolaan sampah rumah tangga masih menjadi permasalahan dan tantangan tersendiri karena masih menjadi sumber permasalahan sampah kota, biaya yang mahal, efektivitas dan efisiensi penanganan limbah. Tujuan dari artikel ini adalah untuk menggali metode *pre-treatment*, kuantifikasi, penekanan pada analisis komposisi untuk karakterisasi, dan tantangan yang dihadapi karena kurangnya penilaian yang kritis dan lengkap terhadap metode *pre-treatment* limbah organik rumah tangga. Bagian ini memberikan gambaran tentang penimbunan limbah organik rumah tangga di Indonesia, latar belakang yang terdiri beberapa penelitian yang mendukung perlunya pengkajian saat ini. Karya ini diharapkan dapat merekomendasikan dan memberikan gambaran kepada peneliti masa depan mengenai manfaat masing-masing metode dalam berbagai skenario penelitian.

Metode

Metode penelitian yang digunakan adalah metode tinjauan literatur yang dibagi menjadi 4 tahap. Langkah pertama yang dilakukan adalah identifikasi dan mengumpulkan data. Langkah selanjutnya, adalah melakukan penyaringan terhadap jurnal-jurnal yang dikumpulkan. Langkah terakhir adalah melakukan analisis eligibilitas jurnal yang dipilih dan mengkonsep kerangka kerja. Metode analisis yang digunakan merupakan metode analisis kualitatif. Langkah-langkah ini didasarkan pada protokol penelitian (Caestino dkk., 2022). Strategi ini memungkinkan sintesis berbagai publikasi penelitian, memberikan pengetahuan komprehensif tentang praktik pengelolaan limbah, upaya pembagunan berkelanjutan, dan teknik pengolahan awal mutakhir yang digunakan untuk mengatasi limbah makanan sebagai langkah untuk mencapai SDGs.

2.1 Tahap Pertama: Identifikasi dan Pengumpulan Data

Artikel yang tertulis dalam Bahasa Inggris dan Bahasa Indonesia, dipublikasi dari tahun 2014 hingga 2024, dipilih melalui *database* Google Scholar (pencarian Bahasa Indonesia) dan *database* ScienceDirect (pencarian Bahasa Inggris). Pencarian utama dilakukan melalui kata kunci sebagai berikut:

Kata kunci (Bahasa Inggris): “household waste”, “organic waste”, “pretreatment methods”, “waste characterization”,

Kata Kunci (Bahasa Indonesia): “limbah organik rumah tangga”, “implementasi kebijakan”, dan “daur ulang”.

Pencarian di *database* Google Scholar hanya disaring yang berupa tinjauan artikel

Tabel 1. Kombinasi kata kunci dan jumlah data artikel yang diperoleh

No	Kata kunci	Database	Jumlah referensi penelitian (N1)	Jumlah referensi review
1	“household waste” dan “pretreatment methods”	ScienceDirect	12	12
2	“household waste” dan “waste characterization”	ScienceDirect	43	8
3	“organic waste” dan “pretreatment methods”	ScienceDirect	82	52

4	“organic waste” dan “waste characterization”	ScienceDirect	79	9
5	“Household waste” dan “Life cycle assessment”	ScienceDirect	28	8
6	“daur ulang” dan “limbah organik rumah tangga”	Google Scholar	-	51
Total			244	140

2.2 Tahap Kedua : Penyaringan Data

Pada tahap penyaringan data, analisis diprioritaskan pertama pada tinjauan artikel, kemudian diikuti dengan artikel penelitian, seperti yang disajikan di **Tabel 1**. Sebanyak 3 jenis kriteria ditetapkan untuk metode penyaringan berkala. Setelah itu, sampel akhir artikel ditetapkan yang memenuhi ketiga kriteria tersebut sehingga didapatkan **Tabel 2**. Dari **Tabel 2**. Dapat disimpulkan bahwa penulis menemukan banyaknya artikel yang ditemukan duplikat dalam beberapa kata kunci. Selain itu, penulis menemukan ketidaksamaan ruang lingkup yang dibahas sehingga jurnal yang didapatkan sebanyak 15 buah saja.

Tabel 2. Jenis kriteria dan sampel akhir artikel

Jenis kriteria	Maksud kriteria	Jumlah referensi terpilih
Kriteria 1	Artikel duplikat dihapus dan dianalisis judul, abstrak, dan kesimpulan artikel	46
Kriteria 2	Artikel yang melakukan studi di luar bidang dan kata kunci yang telah ditentukan akan dihilangkan, seperti limbah elektronik, rumah sakit, tekstil, limbah obat, dan lain sebagainya, kecuali limbah sisa makanan.	
Kriteria 3	Artikel yang berfokus pada pendekatan LCA/pengelolaan limbah berkelanjutan/SDGs	

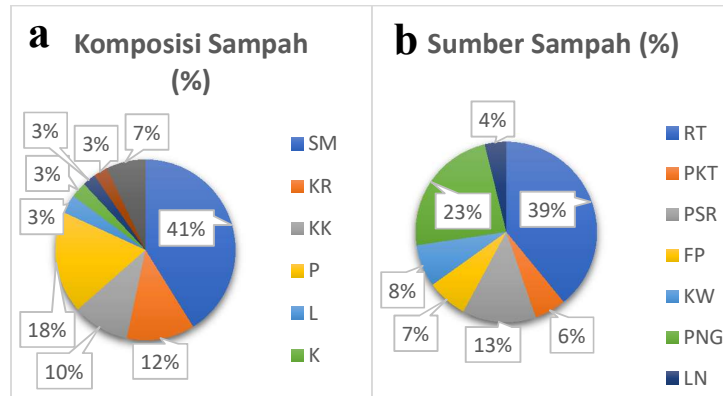
2.3 Tahap Ketiga : Analisis Kualitatif dan Pembuatan Kerangka Kerja

Analisis kualitatif dilakukan melalui pendekatan deduktif-induktif berdasarkan strategi yang dilakukan oleh (Calestino dkk., 2022). Dari pendekatan deduktif, dilakukan analisa artikel sesuai dengan aspek dan sub-aspek yang telah dibagi, yaitu **a)** karakteristik dan komposisi limbah rumah tangga; **b)** metode pra-perlakuan pengelolaan limbah; **c)** penilaian metode pra-perlakuan secara *life cycle assessment*; **d)** Kebijakan implementasi. Selanjutnya, dilakukan analisis pendekatan induktif untuk disimpulkan secara realtif antara pra-perawatan limbah organik rumah tangga dan karakteristiknya untuk mengetahui pengaruhnya terhadap pendekatan *life cycle assessment* (LCA) dan kebijakan implementasi. Kemudian, kerangka kerja dibangun untuk menyediakan informasi kepada para peneliti, pembuat kebijakan, dan praktisi di bidang yang relevan dengan studi ini.

Hasil dan Diskusi

3.1. Karakteristik dan Komposisi Limbah Rumah Tangga

Berdasarkan data yang diperoleh dari capaian SIPSN (2023) mengenai komposisi sampah dan sumber sampah di 39 provinsi di Indonesia, penulis menyimpulkan data dan informasi tersebut di **Gambar 4**. secara rinci dalam . Abreviasi yang digunakan dalam **Gambar 1**. berupa: SM (Sisa Makanan); KR (Kayu-Ranting); KK (Kertas-Karton); P (Plastik); L (Logam); K (Kain); KKU (Karet-Kulit); KC (Kaca); LN (Lainnya); RT (Rumah Tangga); PKT (Perkantoran); PSR (Pasar); PNG (perniagaan); FP (Fasilitas Publik); KW (Kawasan)



Gambar 1. (a) Komposisi sampah berdasarkan jenis sampah; (b) Komposisi sampah berdasarkan sumber sampah (SIPSN, 2023).

Tabel 3. Kategori utama sampah rumah tangga beserta fraksinya (Khoshnevisan dkk., 2018; Narozno dkk., 2016; Kalyanasundaram dkk., 2023).

Kategori sampah	Definisi	Sub-kategori atau fraksi sampah
Sampah basah	Sampah mudah terurai yang sering dimanfaatkan sebagai kompos	1) Sampah dapur 2) Sampah sisa makanan hewani dan nabati 3) Sampah taman 4) Sampah kertas 5) 6) Dan lainnya
Sampah kering	Sampah yang tidak dapat terurai atau sukar terurai, biasanya dilakukan metode 3R untuk kategori sampah ini	7) Sampah plastik 8) Sampah kemasan 9) Limbah logam 10) Limbah kaca 11) Limbah tekstil 12) Dan lainnya
Limbah sanitasi	Sampah yang tercampur dengan limbah cair biologis	13) Limbah sanitasi
Limbah B3	Sampah yang bersifat beracun dan membahayakan bagi lingkungan, ekosistem, dan makhluk hidup jika berkontak secara langsung, bahkan bisa menyebabkan kematian.	14) Limbah kimia 15) Benda tajam
Limbah biokimia tidak berbahaya	Sampah ini mudah terdegradasi dan memiliki potensi yang sangat besar, dan biasanya tersedia dalam kadar yang sedikit	16) Abu 17) Lemak 18) Protein 19) Serat 20) Bahan organik yang dapat terurai oleh enzim 21) Dan lainnya

3.2. Metode Pra-perlakuan Pengelolaan Limbah

Limbah yang diperlakukan dengan baik bisa berdampak langsung kepada lingkungan yang mencakup semua elemen, yaitu tanah, air, dan udara. Pengelolaan limbah sendiri dapat dilakukan

melalui proses fisika, kimia, dan biologi. Metode-metode ini akan terus berkembang sehingga dapat diaplikasikan secara maksimal (Sunarsih, 2014). Selain itu, konversi sampah menjadi produk yang bernilai tambah juga dapat membantu sirkular ekonomi Indonesia dan dunia secara signifikan. Oleh karena itu, penulis akan membagi pembahasan-pembahasan tersebut menjadi sub-dimensi tertentu.

3.2.1. Metode Fisika

Metode pra-perlakuan fisik dikenal dengan metode mekanis dan termal yang digunakan untuk meningkatkan luas permukaan substrat limbah untuk proses degradasi dan pencernaan anaerobik dengan penyediaan hubungan yang baik antara mikroorganisme dengan substrat (Elgarhy dkk., 2023). Metode fisika ditinjau keuntungan dan keterbatasannya dalam bentuk **Tabel 4**.

Tabel 4. Metode pra-perlakuan secara fisik

Metode	Referensi	Keuntungan	Kekurangan
Penggilingan	(Gallego-García dkk., 2022)	Tidak menghilangkan materi limbah dalam jumlah yang signifikan dan menghasilkan konsentrasi rendah dari senyawa inhibitor.	Kebutuhan energi masih tergolong sangat tinggi
Ultrasonikasi	(Elgarhy dkk., 2023); (Joshi & Gogate, 2019); (Wu dkk., 2022)	Mengubah sifat fisikokimia untuk memproduksi produk bernilai tambah dan meningkatkan hasil pencernaan anaerobik	Tidak semua jenis limbah bersifat responsive terhadap gelombang ultrasonik.
Teknologi kejut listrik	(Arshad dkk., 2021)	Membutuhkan energi yang lebih sedikit dan efektif	Tidak bersifat aplikatif jika diterapkan pada volume limbah yang besar
Iradiasi	(Kumar dkk., 2022); (Kaithola dkk., 2019)	Energi relatif rendah dan tidak perlu bantuan katalis	Penetrasi yang buruk
Ekstruksi	(Gallego-García dkk., 2022); (Wahid dkk., 2015); (Chen dkk., 2022)	Kerusakan produk yang minimal	Efektifitas dipengaruhi oleh kondisi lingkungan sehingga perlu pengaturan lebih lanjut

Penggilingan adalah proses menumbuk, menggesar, mengompresi, menghancurkan, menggosok, dan meregangkan materi (Gallego-García dkk., 2022). Proses ini sering dikenal dengan istilah *milling* dan *grinding* di dalam literatur. (Zhang dkk., 2018) membandingkan beberapa metode dan menyimpulkan bahwa penggilingan memiliki banyak kelebihan dalam pra-perlakuan terhadap limbah seperti pengoperasian yang lebih mudah dan menghasilkan etanol yang paling tinggi pada residu jerami padi. Selain itu, metode pada ultrasonikasi memiliki dampak yang sangat signifikan karena mampu mengonversi materi bioaktif ke fase cair secara efektif dan mengurangi waktu dari pra-perlakuan (Menon dkk., 2016)

3.2.2. Metode Kimia

Metode ini merupakan jalur yang umum digunakan dalam manajemen pengelolaan limbah. Teknik ini membutuhkan senyawa dan bahan kimia untuk melakukan pra-perlakuan pada limbah. Biasanya menggunakan senyawa yang bersifat asam, basa, oksidatif, cairan ionik, dan sebagainya. Menurut (Pilli dkk., 2020) bahwa metode pra-perlakuan secara kimia dapat menginterferensi

senyawa organik sehingga lebih bersiifat aksesibel bagi mikroorganisme selama proses *anaerobic digestion*. Pra-perlakuan kimia biasanya dimanfaatkan untuk menghasilkan biogas. Efisiensi dari metode ini juga bergantung pada jenis dan karakter limbah, dosis, biaya, dan durasi. Sehingga, penulis meringkas metode kimia pada **Tabel 5**.

Tabel 5. Persentase biogas yang dihasilkan dari metode kimia

Metode	Referensi	Keuntungan	Keterbatasan
Basa	(Solowski dkk., 2020); (Phummala dkk., 2014); (Surra dkk., 2018); (Kumar dkk. 2019)	Tidak rentan terhadap degradasi asam	Meningkatkan durasi
Asam	(Dai dkk., 2018); (Taherdanak dkk., 2016)	Generasi biomolekul dan biogas yang relative tinggi	Memproduksi senyawa inhibitor dan bersifat sangat korosif
Ozonasi	(Ai dkk., 2019)	Efektif dalam proses delignifikasi.	Perlu volume ozon yang besar
Proses Fenton	(Huang dkk., 2020)	Memproduksi biogas dalam skala yang tinggi	Biaya yang cukup tinggi

Solowski dkk., (2020) menunjukkan perbandingan antara metode asam dan basa pada atikelnnya. Metode asam dan basa merupakan metode yang paling murah pada metode *pre-treatment* kimia. Metode asam, terutama asam sulfat, sangat efektif dalam pengelolaan limbah. Melarutkan hampir 80% lignoselulosa dalam limbah. Tetapi, penggunaan asam kuat di sini menyebabkan korosi dan munculnya senyawa inhibitor sehingga diperlukan pemuliha, tentu saja dengan biaya yang cukup tinggi dalam pemulihannya. Sedangkan metode basa terlihat >80% lebih efektif dibandingkan dengan metode asam, terutama pada materi yang kaku atau rigid yang bahkan senyawa asam tidak bisa. Selain itu (Ai dkk., 2019) juga menyimpulkan dari jurnal-jurnal yang diperoleh bahwa proses ozonasi dapat menghambat proses korosi pada instrument, tidak menghasilkan senyawa toksik dan mengurangi pembentukan produk degradasi yang dapat mengganggu proses yang lain.

3.2.3. Metode Biologi

Metode pra-perlakuan secara biologi memecah senyawa organik kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana melalui proses enzimatik maupun mikroba sehingga hasil akhir yang diperoleh bersifat mudah diuraikan. Mishra dkk., (2018) menyatakan bahwa metode secara biologi dapat meningkatkan stabilitas pH, laju hidrolisis tanpa menghasilkan senyawa inhibitor. Tinjauan dari Harirchi dkk., (2022) juga mendukung hal tersebut bahwa metode ini dapat meningkatkan kuantitas biogas yang dihasilkan dengan mengurangi bahan kimia yang bersifat merugikan bagi mikroorganisme anaerobik. Akan tetapi, metode ini masih harus memperhatikan dan mempertimbangkan bahan yang akan diolah dan kondisi perlakuan. Efek penggunaan jenis mikroorganisme dan enzim yang digunakan diringkaskan dalam be bentuk **Tabel 6**

Tabel 6. Perbedaan efek dari penggunaan variasi mikroorganisme dan enzim

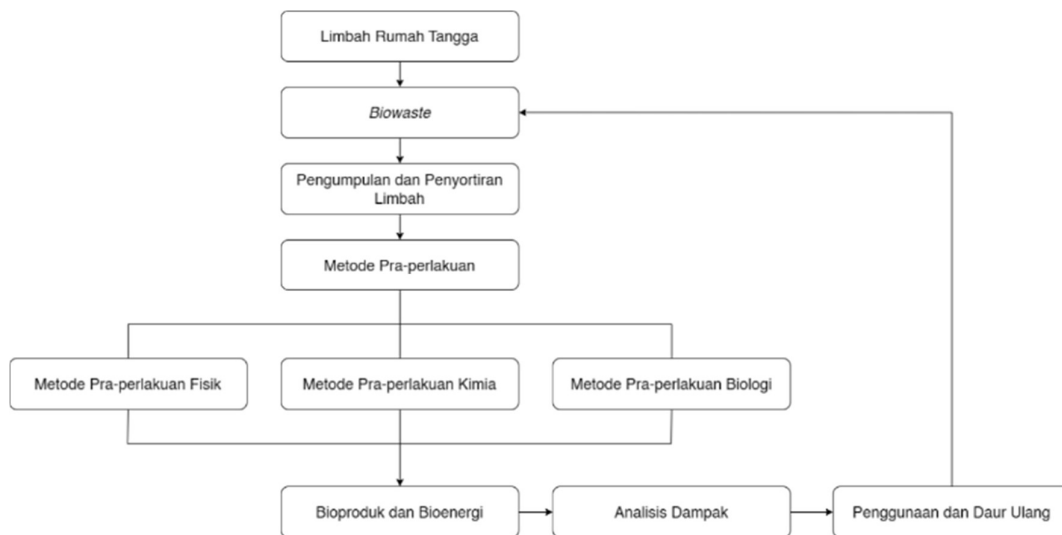
Metode	Referensi	Keuntungan	Keterbatasan
Mikroba	(Hua dkk., 2016);(Yuan dkk., 2014)	Mampu mengolah beragam bahan dalam kondidisi aerobik stasioner	pH dan konsetrasi substrat mempengaruhi hambatan aktivitas mikroba
Jamur	(Mutschlechner dkk., 2015);(Kainthola dkk., 2021)	Sangatlah efektif pada keaadann air optimal dan meningkatkan efisiensi produktivitas biogas	Kecepatan reaksi yang lambat

Enzim (Koupaie dkk., 2019);(Agabo-García dkk., 2019) Meningkatkan produktivitas biogas dan senyawa *biodegradable* Biaya metode yang cukup tinggi, dan memerlukan fasilitas yang sangat steril.

Selain dari biogas, konversi limbah menjadi menjadi produk bernilai tambah lainnya juga banyak dilakukan dan biasanya disebut dengan proses fermentasi. Hasil ini merupakan efek sinergistik dari jamur dan enzyme (Elgahary dkk., 2023). Disimpulkan di sini bahwa perlakuan awal biologis bisa menjadi solusi yang signifikan untuk keberlanjutan *pre-treatment* limbah. Tetapi, dalam prosesnya, diperlukan waktu yang lebih lama dan fasilitas pengolahan dengan penyimpanan yang lebih besar. Sehingga biaya yang dikeluarkan bisa dikatakan relatif tinggi.

3.3. Life Cycle Assessment

Penilaian analisis siklus hidup (LCA) merupakan analisis yang paling efektif dan signifikan dalam menilai keberlanjutan metode pra-perlakuan limbah seperti yang dibahas di atas. Analisis ini juga mencakup kuantitas emisi yang diproduksi selama perjalanan siklus dan menyimpulkan dampaknya terhadap lingkungan sehingga dapat dipahami oleh pemerintah atau pengambil keputusan. Singkatnya, penilaian siklus hidup ini digambarkan pada **Gambar 2**. Keberlanjutan metode ini terdiri dari tiga hal yaitu pertimbangan lingkungan, dampak sosial, dan kelayakan ekonomi. Metode penilaian ini sangatlah penting karena dalam meringkas faktor penting dalam perubahan iklim, pengasaman, eutrofikasi, dan toksisitas manusia (Prasad dkk., 2016). Dampak terhadap lingkungan dipengaruhi oleh faktor penentu seperti kebutuhan energi, durasi, dan emisi (Ryan dan Yaseneva, 2021).



Gambar 2. Penilaian Siklus Hidup

Hurtado dkk., (2021) menggunakan Aspen Plus sebagai model yang layak dalam menilai LCA dari metode pra-perlakuan limbah secara sistematis. Penetapan kebijakan harus menyadari manfaatnya dan biaya yang dibutuhkan dalam melakukan pra-perlakuan limbah ini sehingga dapat menciptakan penerapan pra-perlakuan yang berkelanjutan dan insentif. **Tabel 7.** Membahas secara singkat dan jelas mengenai penilaian LCA terhadap masing-masing metode pra-perlakuan yang dibahas di atas.

Tabel 7. Penilaian LCA terhadap jenis metode *pre-treatment* limbah

Metode	Penilaian LCA	Referensi
Fisik atau Mekanis	- Penggunaan energi yang sangat tinggi	(Larsen dkk., 2018);(Chen dkk., 2017)
	- Terdapat pelepasan molekul SO ₂ dan NO	
	- Pengasaman	
	- Eutrofikasi	
	- Biaya operasional tinggi karena kebutuhan energi yang tinggi juga	
Kimia	- Metode basa berpotensi menghasilkan emisi	(Kakar dkk., 2021);(Chen dkk., 2017)
	- Konsumsi energi tinggi jika memerlukan temperature yang tinggi	
Biologi	- Potensi pengasaman dan eutrofikasi	(Jensen dkk., 2017);(Khoo dkk., 2016).
	- Kebutuhan energi yang rendah	
	- Produksi gas emisi yang rendah	
	- Tidak berpotensi pada pengasaman dan eutrofikasi	
	- Durasi yang sangat lama	
	- Kontaminasi bisa menjadi permasalahan	

Kesimpulan

Konversi limbah menjadi bioproduct melalui beberapa metode pra-perlakuan di atas telah menarik banyak minat dan perhatian. Konversi telah menjadi manajemen yang penting untuk mengurangi limbah yang dibuang ke lingkungan. Akan tetapi, pengembangan teknologi pengendalian harus ditingkatkan secara berkala untuk mencegah hal-hal atau kecelakaan di luar kendali. Selain itu, tantangan dalam memperbaharui operasi pra-perlakuan yang sederhana dan efisien harus dihadapi untuk meningkatkan metode-metode yang sudah ada. Pembaharuan ini biasanya berupa sebagai *combined methods* atau *hybrid methods*. Selain itu, mekanisme reaksi dan keadaan fisika harus digali lebih lanjut untuk membangun model pra-perlakuan yang relevan dan memaksimalkan proses. Dengan melakukan pendekatan analisis komprehensif dapat disimpulkan bahwa setiap metode memiliki kelebihan dan keterbatasannya masing-masing. Studi penilaian hidup memberikan arah keberlanjutan untuk mendukung pengonversian limbah menjadi bioproduct atau bioenergy dengan produk sampingan yang bernilai tinggi dan tidak bersifat toksik kepada lingkungan. Dengan demikian, pembuat kebijakan dapat bersikap lebih bijak dalam menentukan metode yang tepat dalam hal manajemen limbah.

REFERENCES

- Agabo-García, C., Pérez, M., Rodríguez-Morgado, Parrado, J., dan Solera, R. 2019. Biomethane production improvement by enzymatic pre-treatments an enhancers of sewage sludge anaerobic digestion. *Fuel*. 255:115713. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.115713>.
- Ai, P., Zhang, X., Dinarmar, C., Elsayed, M., Yu, L., Xi, J., dan Mei, Z. 2019. Different effects of ozone and aqueous ammonia in a combined pretreatment method on rice straw and dairy manure fiber for enhancing biomethane production. *Bioresource Technology*. 282:275-284. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.03.021>.
- Arshad, R.N., Abdul-Malek, Z., Roobab, U., Qureshi, M.I., Khan, N., Ahmad, M.H., Liu, Z-W., dan Aadil R.M. 2020. Effective valorization of food wastes and by-products through pulsed electric field: A systematic review. *Journal of Food Process Engineering*. 44 (3):e13629. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13629>.
- Calestino, E., Carvalho, A., dan Palma-Oliveira, J.M. 2022. Household organic waste: Integrate psychosocial factors to define strategies toward a circular economy. *Journal of Cleaner Production*. 378:134446. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134446>.
- Chabbi, A., Lehmann, J., Ciais, P., Loescher, H.W., Cotrufo, M.F., Don, A., SanClements, M., Schipper, L., Six, J., Smith, P., dan Rumpel, C. 2017. Aligning agriculture and climate policy. *Nature Climate Change*. 7:307-309. <https://doi.org/10.1038/nclimate3286>.

- Chen, H., Liu, J., Chang, X., Chen, D., Xue, Y., Liu, P., Lin, H., dan Han, S. A review on the pretreatment of lignocellulose for high-value chemicals. *Fuel Processing Technology*. 160:196-206. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.12.007>.
- Dai, B.L., Guo, X.J., Yuan, D.H., dan Xu, J.M. 2018. Comparison of different pretreatments of rice straw substrate to improve biogas production. *Waste Biomass Valorization*. 9:1503-1512. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9950-9>.
- Dwioktovanny, Y., Syafrudin, dan Rezagama, A. 2017. Studi potensi peningkatan nilai ekonomi sampah anorganik melalui konsep daur ulang dalam rangka optimalisasi pengelolaan sampah kecamatan Kota Kudus (Studi kasus; Kecamatan Kota Kudus, Jawa Tengah). *Jurnal Teknik Lingkungan*. 6 (2):1-11. <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/tlingkungan/article/view/16338>.
- Elgahary, A.M., Eloffy, M.G., Alengebawy, A., El-Sehrif, D.M., Gaballah, M.S., Elwakeel, K.Z., dan El-Qelish, M. 2023. Sustainable management of food waste; pre-treatment strategies, techno-economic assessment, bibliometric analysis, and potential utilisations: A systematic review. *Environmental Research*. 225:115558. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115558>.
- FAO. 2020. Global Food Losses | Sustainable Development Goals [WWW Document]. Food Agriculture Organization Unites Nations.
- Gallego-García, M., Moreno, A.D., Manzanares, P., Negroo, M.J., dan Duque, A. 2022. Recent advances on physical technologies for the pretreatment of foo waste and lignocellulosic residues. *Bioresource Technology*. 128397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128397>.
- Harirchi, S., Wainaina, S., Sar, T., Nojourni, S.A., Parchami, M., Varjani, S., Khanal, S.K., Wong, J., Awasthi, M.K., dan Taherzadeh, M.J. 2022. Microbial insights into anaerobic digestion for biogas, hydrogen or volatile fatty acids (VFAs): a review. *Bioengineered*. 13:6521-6557. <https://doi.org/10.1080/21655979.2022.2035986>.
- Hua, B., Dai, J., Liu, B., Zhang, H., Yuan, X., Wang, X., dan Cui, Z. 2016. Pretreatment of non-sterile, rotted silage maize straw by the microbial community MC1 increases biogas production. *Bioresource Technology*. 216:699-705. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.06.001>.
- Huang, W., Yang, F., Huang, W., Lei, Z., dan Zhang, Z. 2020. Enhanced methane production from anaerobic digestion of rice straw pretreated by Fe³⁺/CaO₂ catalyzed Fenton-like process. *Bioresource Technology Reports*. 11:100472. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100472>.
- Jensen, M.B., Moller, J., Monster, J., dan Scheutz, C. 2017. Quantification of greenhouse gas emissions from a biological waste treatment facility. *Waste Managements*. 67:375-384. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2017.05.033>.
- Joshi, S.M., dan Gogate, P.R. 2019. Intensifying the biogas production from food waste using ultrasound: Understanding into effect of operating parameters. *Ultrasonics Sonochemistry*. 59:104755. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104755>.
- Kainthola, J., Podder, A., Fechner, M., dan Goel, R. 2021. An overview of fungal pretreatment processes for anaerobic digestion: Applications, bottlenecks and future needs. *Bioresource Technology*. 321:124397. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124397>.
- Kakar, F.L., Purohit, N., Okoye, F., Liss, S.N., dan Elbeshbishy, E. 2021. Combined hydrothermal and free nitrous acid, alkali and acid pretreatment for biomethane recovery from municipal sludge. *Waste Management*. 131:376-385. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2021.06.021>.
- Kalyanasundaram, M., Krishnan, K., Singh, S., Sahoo, K.C., Soni, R., Parashar, V., Mathankar, N., Pathak, A., Sabde, Y., Lundborg, C.S., Atkins, S., Rousta, K., dan Diwan, V. 2023. Composition analysis (pick analysis) of waste generated from household: A pilot study in Ujjain city, India. *Heliyon*. 9:e19902. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19902>.
- Khoo, H.H., Ee, W.L., dan Isoni, V. 2016. Bio-chemicals from lignocellulose feedstock: Sustainability, LCA and the green conundrum. *Green Chemistry*. 18 (7):1912-1922. <https://doi.org/10.1039/c5gc02065d>.
- Khoshnevisan, B., Tsapekos, P., Alvarado-Morales, M., Rafiee, S., Tabatabaei, M., Angelidaki, I. 2018. Life cycle assessment of different strategies for energy and nutrient recovery from source sorted organic fraction of household waste. *Journal of Cleaner Production*. 180:(360-374). <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.198>.
- Koupaie, E.H., Dahadha, S., Lakeh, A.A.B., Azizi, A., dan Elbeshbishy, E. 2019. Enzymatic pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biomethane production-a review. 233:774-784. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.09.106>.
- Kumar, S., Gandhi, P., Yadav, M., Paritosh, K., Pareek, N., dan Vivekanand, V. Weak alkaline treatment of wheat and pearl millet straw for enhanced biogas production and its economic analysis. *Renewable Energy*. 139:753-764. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.133>.

- Kumar, S.D., Yasasve, M., Karthigadevi, G., Aashabharathi, M., Subbaiya, R., Karmegam, N., dan Govarthanan, M. 2022. Efficiency of microbial fuel cells in the treatment and energy recovery from food wastes: Trends and applications-a review. *Chemosphere*. 287:132439. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132439>.
- Larsen, J.D., ten Hoeve, M., Nielsen, S., dan Scheutz, C. 2018. Life cycle assessment comparing the treatment of surplus activated sludge in a sludge treatment reed bed system with mechanical treatment on centrifuge. *Journal of Cleaner Production*. 195:148-156. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.02.193>.
- Li, M., Li, S., Meng, Q., Chen, S., Wang, J., Guo, X., Ding, F., dan Shi, L. Feedstock optimization with rice husk chicken manure and mature compost during chicken manure composting: Quality and gaseous emissions. *Bioresource Technology*. 387:129694. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129694>.
- Menon, A., Ren F., Wang, J.Y., dan Giannis, A. 2016. Effect of pretreatment techniques on food waste solubilization and biogas production during thermophilic batch anaerobic digestion. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. 18:222-230. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0395-6>.
- Mishra, S., Singh, P.K., Dash, S., Pattnaik, R. 2018. Microbial pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biomethanation and waste management. *3 Biotech*. 8:458. <https://doi.org/10.1007/s13205-018-1480-z>.
- Misslin, R., Clivot, H., Levavasseur, F., Villerd, J., Solié, J-C. Houot, S., dan Therond, O. Integrated assessment and modelling of regional recycling of organic waste. *Journal of Cleaner Production*. 379 (2):134725. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134725>.
- Mutschlechner, M., Illmer, P., dan Wagner, A.O. 2015. Biological pre-treatment: enhancing biogas production using the highly cellulolytic fungus *Trichoderma viride*. *Waste Management*. 43:98-107. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2015.05.011>.
- Naroznova, I., Möller, J., Larsen, B., dan Scheutz, C. 2016. Evaluation of a new pulping technology for pre-treating source-separated organic household waste prior to anaerobic digestion. *Waste Management*. 50:65-74.
- Phummala, K., Imai, T., Reungsang, A., Chairattananokorn, P., Sekine, M., Higuchi, T., Yamamoto, L., dan Kanno, A. 2014. *Journal of Environmental Sciences*. 26 (6):1261-1368. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(13\)60612-9](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(13)60612-9).
- Prajapati, P., Varjani, S., Singhanian, R.R., Patel, A.K., Awasthi, M.K., Sindhu, R., Zhang, Z., Binod, P., Awasthi, S.K., dan Chaturvedi, P. 2021. Critical review on technological advancements for effective waste management of municipal solid waste – Updates and way forward. *Environmental Technology Innovation*. 23:101749. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101749>.
- Ren, X., Wang, Z., Zhao, M., Xie, J., Zhang, Z., Yang, F., Tsui, T-H., Wang, Q., dan Ding Y. 2022. Role of selenite on the nitrogen conservation and greenhouse gases mitigation during the goat manure composting process. *Science of the Total Environment*. 838:155799. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155799>.
- Shi, L., Li, S., Li, J., Li, Y., and Yaya. 2021. Role of phosphorous additives on nitrogen conservation and maturity during pig manure composting. *Environmental Science and Pollution Research*. 28:17981-17991. <https://doi.org/10.1007/s11356-020-11694-z>.
- Sunarsih, E. 2014. Konsep Pengolahan Limbah Rumah Tangga dalam Upaya Pencegahan Pencemaran Lingkungan. *Jurnal Ilmu Kesehatan Masyarakat*. 5 (3):162-167. <https://ejournal.fkm.unsri.ac.id/index.php/jikm/article/download/158/114/219>.
- Surra, E., Bernardo, M., Lapa, N., Esteves, I.A.A.C., Fonseca, I., dan Mota, J.P. 2018. Enhanced biogas production through anaerobic co-digestion of OFMSW with maize cob waste pre-treated with hydrogen peroxide. *Chemical Engineering Transactions*. 65:121-126.
- Shindu, R., Gnansounou, E., Rebello, S., Binod, P., Varjani, S., Thakur, I.S., Nair, R.B., dan Pandey, A. 2019. Conversion of food and kitchen waste to value-added products. *Journal of Environmental Management*. 241: 619-630. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.053>.
- SIPSN. 2023. Sistem Informasi Pengolahan Sampah Nasional. <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/>. (Diakses pada tanggal 24 April 2024).
- Solowski, G., Konkol, I., dan Cenian, A. 2020. Production of hydrogen and methane from lignocellulose waste by fermentation. A review of chemical pretreatment for enhancing the efficiency of the digestion process. *Journal of Cleaner Production*. 267:121721. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121721>.

- Taherdanak, M., Zilouei, H., dan Karimi, K. 2016. The influence of dilute sulfuric acid pretreatment on biogas production from wheat plant. *International Journal of Green Energy*. 13 (11):1129-1134. <https://doi.org/10.1080/15435075.2016.1175356>.
- The World Counts. 2022. Wasted Food Statistics ([WWW Document]).
- Wu, Y., Yao, S., Narale, B.A., Shanmugam, A., Mettu, S., Ashokkumar, M. 2022. Ultrasonic processing of food waste to generate value-added products. *Foods*. 11 (14):2035. <https://doi.org/10.3390/foods11142035>.
- Yuan, X., Wen, B., Ma, X., Zhu, W., Wang, X., Chen, S., dan Cui, Z. 2014. Enhancing the anaerobic digestion of lignocellulose of municipal solid waste using a microbial pretreatment method. *Bioresource Technology*. 154:1-9. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.11.090>.
- Zhang, H., Zhang, P., Ye, J., Wu, Y., Liu, J., Fang, W., Xu, D., Wang, B., Yan, L., and Zeng, G. 2018. Comparison of various pretreatments for ethanol production enhancement from solid residue after rumen fluid digestion of rice straw. *Bioresource Technology*. 247:147-156. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.09.065>.
- Zorpas, A.A., Lasaridi, K., Pociovalisteanu, D.M., dan Loizia, P. 2018. Monitoring and evaluation of prevention activities regarding household organics waste from insular communities. *Journal of Cleaner Production*. 172:3567-3557. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.155>.