

Studi Teknologi Pengolahan *Biowaste* Perkotaan dan Potensi Timbulan Gas Rumah Kaca

Almira Rahmadya Muslih dan Arseto Yekti Bagastyo
Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: bagastyo@enviro.its.ac.id

Abstrak—Komposisi timbulan sampah perkotaan di Indonesia didominasi oleh *biowaste*. Dalam sektor persampahan, *biowaste* merupakan salah satu penyumbang terbesar emisi GRK. Namun, pengolahan *biowaste* di Indonesia masih belum optimal. Teknologi biokonversi berpotensi baik dalam pengolahan *biowaste* karena secara umum lebih sederhana dan tidak membutuhkan banyak pengolahan awal. Studi pustaka ini membahas teknologi pengolahan *biowaste* dengan biokonversi dan potensi timbulan GRK. Teknologi yang dibahas adalah *landfill*, komposter, dan *anaerobic digester*. Kajian pustaka dilakukan dengan mengumpulkan data dan informasi dari studi terdahulu mengenai mekanisme proses, aspek teknis, dan potensi timbulan GRK setiap teknologi. Hasil kajian digunakan sebagai dasar dari penyelesaian studi kasus berupa penentuan teknologi pengolahan *biowaste* yang optimal berdasarkan aspek teknis dan potensi timbulan GRK di Kota Surabaya. Potensi timbulan GRK dihitung dengan persamaan dari IPCC 2006 yang diadopsi dari Emission Quantification Tool (EQT) IGES. Penentuan teknologi pengolahan optimal pada studi kasus dilakukan dengan Analytic Hierarchy Process (AHP). Kesimpulan yang dapat diambil dari studi ini adalah urutan teknologi terpilih yaitu two stage AD, single stage AD, controlled landfill, sanitary landfill, in-vessel composting, BSFL composting, windrow composting, aerated static pile composting, dan vermicomposting.

Kata Kunci—*Anaerobic Digester, Biowaste, Gas Rumah Kaca, Komposter, Landfill.*

I. PENDAHULUAN

KOMPOSISI timbulan sampah perkotaan di Indonesia didominasi oleh *biowaste* sebanyak 60% hingga 74% [1-5]. Di Indonesia, pada tahun 2020, *biowaste* sebanyak 40,5% tidak dikelola. Pengolahan *biowaste* umumnya dilakukan dengan proses konversi biologis atau termal. Pengolahan termal membutuhkan proses pre-treatment yang lebih intensif, menimbulkan emisi lebih besar, serta membutuhkan biaya lebih mahal [6-8]. Maka dari itu, pengolahan biokonversi secara umum lebih diminati.

Pada tahun 2020, 51,9% *biowaste* di Indonesia diolah dengan *landfilling*. Padahal, *landfilling* menimbulkan emisi GRK relatif lebih besar daripada alternatif teknologi pengolahan lainnya, seperti komposting maupun *anaerobic digestion* [9]. Komposter dan *anaerobic digester* menimbulkan GRK bersih (*net greenhouse gas*) lebih kecil karena menghasilkan produk berupa kompos atau biogas yang dapat dimanfaatkan sebagai pengganti energi.

Selain itu, pengomposan dengan cacing (*vermicomposting*) dapat menimbulkan gas metana lebih rendah daripada pengomposan konvensional [10]. Vermicomposting dan black soldier composting juga dapat menghasilkan produk berupa pakan ternak sehingga menimbulkan GRK bersih lebih rendah.

Kajian teknologi pengolahan *biowaste* telah dilakukan untuk diketahui kesesuaiannya di negara berpenghasilan

rendah dan sedang [11]. Studi di Kota Malang dan Kota Semarang juga telah dilakukan untuk menghitung emisi GRK yang ditimbulkan dari pengelolaan sampah di masing-masing kota tersebut. Kedua studi menggunakan acuan IPCC 2006 dalam perhitungannya [12-13]. Selain itu, EQT sebagai alat penghitung emisi GRK juga telah digunakan oleh studi di Filipina [14]. Studi-studi tersebut membahas secara terpisah pemilihan teknologi pengolahan sampah dan estimasi emisi GRK. Maka dari itu, studi teknologi pengolahan *biowaste* dan potensi timbulan GRK ini dilakukan untuk mengkaji teknologi pengolahan *biowaste*, perhitungan estimasi GRK, serta pemilihan teknologi optimal pada studi kasus di Indonesia.

II. METODE

Studi pustaka ini terdiri dari dua tahapan pelaksanaan, yaitu kajian pustaka dan studi kasus. Suatu kasus pada studi pustaka ini berupa studi penerapan alternatif teknologi pengolahan *biowaste* di Kota Surabaya. Studi ini menggunakan data sekunder yang bersumber dari DKRTH Surabaya dan dari beberapa sumber berupa jurnal, website, surat kabar, laporan penelitian, dan laporan seminar.

A. Perhitungan Potensi Emisi GRK

Beberapa skenario dibuat untuk membandingkan timbulan GRK pada setiap teknologi pengolahan untuk diterapkan pada studi kasus. Pada setiap studi kasus, skenario yang diuji adalah: (1) Skenario 1: 100% *biowaste* diangkut dan diolah dengan komposting. (2) Skenario 2 100% *biowaste* diangkut dan diolah dengan *landfilling*. (3) Skenario 3: 100% *biowaste* diangkut dan diolah dengan AD. Perhitungan potensi emisi GRK dihitung berdasarkan persamaan oleh IPCC 2006 yang diadopsi dari EQT IGES.

B. Analytical Hierarchy Process

Tahap pelaksanaan AHP adalah sebagai berikut: (a) Penentuan hirarki berupa kriteria, sub-kriteria, dan alternatif yang akan dianalisis. (b) Pembuatan kuesioner yang berisi matriks perbandingan berpasangan. (c) Pembagian kuesioner kepada stakeholder terkait. (d) Penentuan bobot masing-masing kriteria, sub-kriteria, dan alternatif. (e) Penilaian teknologi alternatif berdasarkan kajian pustaka dan bobot yang telah ditetapkan.

Dua kriteria utama yang dianalisis adalah aspek teknis, aspek lingkungan. Pada aspek teknis, sub-kriteria yang diuji adalah efisiensi teknologi, timbulan residu, kemudahan operasi dan perawatan, dan kebutuhan lahan. Aspek lingkungan yang diuji berupa timbulan GRK yang merupakan gas karbon dioksida dan gas metana.

Kuesioner dibagikan kepada Dinas Kebersihan dan Ruang Terbuka Hijau (DKRTH) Kota Surabaya, sebagai perwakilan pemerintah daerah, dan akademisi, berupa dosen dari

Tabel 1.
Peringkat Teknologi Terpilih oleh Responden

Peringkat	Akademisi 1	Akademisi 2	Akademisi 3	Pemerintah
1	Sanitary landfill	TSAD	SSAD	Controlled landfill
2	Controlled landfill	SSAD	TSAD	TSAD
3	SSAD	Sanitary landfill	Controlled landfill	SSAD
4	BSFL composting	Controlled landfill	In-vessel composting	Sanitary landfill
5	TSAD	Aerated static pile composting	Aerated static pile composting	Aerated static pile composting
6	Vermicomposting	In-vessel composting	Windrow composting	In-vessel composting
7	Windrow composting	Windrow composting	Vermicomposting	Windrow composting
8	In-vessel composting	Vermicomposting	Sanitary landfill	Vermicomposting
9	Aerated static pile composting	BSFL composting	BSFL composting	BSFL composting

Tabel 2.
Estimasi kebutuhan lahan setiap teknologi pengolahan

Teknologi Komposting	Kebutuhan lahan	Panjang	Lebar	Jumlah	Luas total (Ha)
Windrow Composting	Windrow	300	5,5	110	19,31
Aerated Static Pile Composting	Windrow	27	5	5112	69,01
In-vessel Composting	Windrow	50	2,5	1032	12,90
Vermicomposting	Windrow	50	3	7575	113,63
BSFL composting	Bangunan berisi tumpukan reaktor	17	17	780	23,40
Sanitary landfill	Zona timbunan	1000	1000	4	400
Controlled landfill	Zona timbunan	1000	1000	4	400
Single stage AD	Reaktor	40	-	40	0,013
	Lahan drying	6	5	3	0,009
	Lahan komposting	15	3	3	0,0135
					0,035
Two-stage AD	Reaktor 1	20,1		35	0,003
	Reaktor 2	20,1		58	0,003
	Lahan drying	6	5	3	0,009
	Lahan komposting	15	3	3	0,0135
					0,029

Tabel 3.
Urutan teknologi pengolahan berdasarkan kemudahan operasi dan pengolahan

Teknologi	Operasi dan perawatan	Peringkat
Windrow composting	Pembentukan tumpukan, pembalikan windrow dengan windrow turner, penambahan kadar air secara manual bila dibutuhkan	7
Aerated static pile composting	Pembentukan tumpukan, penambahan kadar air bila dibutuhkan	6
In-vessel composting	Pembentukan tumpukan dan pengamatan sistem	5
Vermicomposting	Pembentukan tumpukan, penambahan cacing, pengamatan dan penyesuaian jumlah cacing	8
BSFL composting	Pemindahan bahan organik ke reaktor, penambahan larva, aerasi manual bila dibutuhkan, pengamatan setiap harinya, pemisahan kompos dan larva atau alat, pengembangbiakan telur menjadi larva	9
Controlled landfill	Pemasangan liner dasar secara manual, penutupan timbunan dengan tanah penutup setiap minggu	1
Sanitary landfill	Pemasangan liner dasar secara manual, penutupan timbunan dengan tanah penutup setiap hari	2
Single stage AD	Pengamatan sistem digester, pemindahan <i>digestate</i> ke SDB, dan pembentukan tumpukan kompos	3
Two stage AD	Pengamatan sistem digester, pemindahan <i>digestate</i> ke SDB, dan pembentukan tumpukan kompos	4

beberapa instansi berbed a. Selanjutnya, hasil kuesioner disusun dalam matriks perbandingan berpasangan dan dihitung bobot dari masing-masing kriteria, sub-kriteria, serta alternatif.

Bobot dari kriteria dan sub-kriteria menjadi acuan dalam mengkaji teknologi pengolahan biowaste di dua kota studi. Bobot dari alternatif teknologi pengolahan digunakan sebagai acuan persentase teknologi pengolahan yang digunakan pada skenario 5 perhitungan timbulan GRK.

Pada skenario 5, dihitung total timbulan GRK bila setiap alternatif teknologi pengolahan digunakan sesuai dengan persentase yang dihitung berdasarkan opini stakeholder terkait.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Biowaste Perkotaan

Biowaste perkotaan terdiri dari sampah kebun dan sampah makanan atau sampah dapur. Persentase komposisi *biowaste*

tergantung pada sumber timbulannya [15]. Sampah kebun mengandung selulosa, lignin (terlarut dan tidak terlarut), dan hemiselulosa [16]. Sampah makanan nabati mengandung karbohidrat, protein, dan lipid [17]. Sampah makanan hewani umumnya mengandung protein dan lemak [18].

Degradasi selulosa, hemiselulosa, lignin, serta makromolekul berupa karbohidrat, lipid, dan protein, baik oleh mikroorganisme maupun fungi, akan menghasilkan molekul monomer. Selanjutnya, molekul monomer mengalami degradasi lagi hingga menjadi karbon dioksida dan molekul air, bila dalam kondisi aerobik secara sempurna, serta gas metana dan gas karbon dioksida, bila dalam kondisi anaerobik secara sempurna [19-21].

B. Pengolahan Awal

Pengolahan awal yang umumnya dilakukan adalah penyaringan (screening), reduksi ukuran material, dan pengkondisian material. Sampah perkotaan yang diangkut ke tempat pengolahan tidak hanya terdiri dari *biowaste* sehingga

Tabel 4.
Estimasi perhitungan emisi GRK setiap teknologi pengolahan

Teknologi	Emisi degradasi (kg CO ₂ eq/ton)	Emisi kegiatan operasional (kg CO ₂ eq/ton)	Emisi terhindari (kg CO ₂ eq/ton)	Peringkat
Windrow composting	177	0,15	-21,18	3
ASP composting	177	0,62	-19,03	4
In-vessel composting	177	0,53	-13,79	9
Vermicomposting	177	0,06	-9,47	7
BSFL composting	177	0,00	-12,30	5
Controlled landfill	10,43	8,24	0,00	8
Sanitary landfill	4,17	12,86	-61,90	6
Single stage AD	22,47	2,81	-89,38	2
Two stage AD	22,47	12,99	-194,56	1

perlu dilakukan screening. Proses penyaringan sampah dapat dilakukan secara manual atau berdasarkan ukuran, densitas, dan komponen logam [22]. Penyaringan manual umumnya dilakukan dengan conveyor belt [23]. Teknik ini membutuhkan energi lebih sedikit dibandingkan teknik penyaringan lainnya walaupun membutuhkan tenaga kerja lebih banyak. Penyaringan berdasarkan densitas atau *air classification* biasanya digunakan untuk daur ulang sampah dengan kadar air rendah [24]. Teknologi ini kurang tepat digunakan untuk *biowaste* karena kadar air tinggi pada sampah. Tingginya kadar air pada material dapat menurunkan persentase recovery dan efisiensi penyaringan [25]. Penyaringan berdasarkan ukuran biasanya dilakukan dengan trommel screens atau rotary screens dan disc screens [22]. Selain itu, *waste separation press* juga dapat digunakan dengan efisiensi penyaringan bahan organik hingga 90% [26].

Reduksi ukuran material bertujuan untuk menghomogenkan ukuran material. Reduksi ukuran material dapat memperbesar luas permukaan yang dapat berkontak dengan mikroorganisme sehingga degradasi dapat berlangsung lebih cepat dan efisien [27]. Teknologi yang dapat digunakan adalah shredder [22]. Selain direduksi ukurannya, material perlu dikondisikan untuk menyesuaikan parameter seperti rasio C/N, pH, alkalinitas, dan kadar inokulum agar proses dekomposisi berlangsung dengan baik [28].

C. Lahan Urug (Landfill)

Teknologi lahan urug di Indonesia dibagi menjadi dua, yaitu controlled landfill dan sanitary landfill. Perbedaan utama controlled landfill dan sanitary landfill terletak pada kelengkapan sarana dan prasarana, yaitu kriteria liner dasar, sistem pengendalian lindi, sistem pengendalian gas, dan tanah penutup.

Controlled landfill umumnya dirancang untuk kota yang belum dapat menerapkan sanitary landfill, sehingga sistem ini dirancang dengan kelonggaran tertentu. Lapisan dasar yang digunakan lahan urug terkendali berupa tanah dengan permeabilitas rendah dan dipadatkan 2 x 30 cm, lapisan geomembran, ataupun geotekstil serta lapisan dasar berbahan polimer lainnya.

Sedangkan, lapisan dasar pada sanitary landfill dipadatkan 3 x 30 cm. Controlled landfill hanya perlu melapisi timbunan dengan tanah penutup seminggu sekali sedangkan sanitary landfill perlu melakukannya setiap hari. Sanitary landfill diwajibkan untuk mengumpulkan dan memulihkan landfill gas menjadi energi sedangkan controlled landfill tidak diwajibkan.

D. Komposter

1) Windrow Composting

Material organik yang telah seragam ukuran partikelnya ditumpuk dalam bentuk windrow [22]. Windrow dapat dibuat dalam bentuk segitiga ataupun trapesium [31-32]. Dimensi windrow dapat dibuat berukuran 2,5 m - 3 m tinggi dan 6 m - 7,5 m lebar alas [22]. Ukuran windrow yang umum diterapkan adalah lebar 1,5 m - 3 m dan tinggi 1 m - 2 m [29-33]. Tinggi windrow dibuat terbatas karena keterbatasan dimensi windrow turner dan untuk menyediakan aerasi optimal [32]. Panjang windrow dibuat sesuai kuantitas bahan yang akan dikomposkan, nilainya dapat mencapai 12 m dan 80 m [29-34]. Pembentukan windrow dapat dilakukan dengan front-end loader atau wheel loader [33-35].

Windrow perlu dibalik untuk menyediakan aerasi pada tumpukan biowaste serta untuk meratakan kembali material dan panas pada tumpukan agar proses degradasi, termasuk destruksi telur cacing, merata [35]. Frekuensi pembalikan pada minggu-minggu awal komposting dapat mencapai 3 hingga 5 kali seminggu [29-33]. Selanjutnya, frekuensi pembalikan menurun dan disesuaikan dengan suhu serta kadar air pada windrow [31-33]. Pembalikan windrow dapat dilakukan secara manual dengan shovel [30-32]. Secara mekanis dengan traktor yang dilengkapi shovel, front-end loader atau bucket loader, serta windrow turner [29], [32-33].

Durasi fase komposting biowaste berada dalam rentang 6 minggu hingga 16 minggu [29], [30], [32], [36]. Durasi fase maturasi juga sangat beragam, rentangnya yaitu 3 minggu hingga 8 minggu [29], [36]. Fase maturasi bisa lebih lama, yaitu hingga 16 minggu, bila kadar air awal bahan organik relatif tinggi [30], [33].

2) Aerated Static Pile (ASP) Composting

ASP composting adalah proses komposting pada tumpukan statis yang diaerasikan tanpa pembalikan. Bentuk tumpukan biasanya dibuat seperti windrow composting. Sistem komposting ini terdiri dari pipa aerasi atau exhaust pada dasar tumpukan material organik yang dikomposkan [22]. Pipa utama dibentangkan secara horizontal dan dipasang pipa paralel untuk mendistribusi udara [37]. Blower digunakan untuk menyediakan aerasi aktif pada tumpukan [38]. Alas tumpukan pada sistem ini adalah bed yang dibuat menggunakan kompos matang atau bahan bulking agent untuk mencegah aliran lindi [38-39]. Tumpukan juga dilapisi dengan jenis material yang sama, setebal 5 cm - 15 cm, sebagai biofilter untuk mencegah bau, lalat, dan heat loss [38]. Pelapisan tumpukan dapat menginsulasi panas sehingga fase termofilik lebih lama dan panas pada tumpukan

lebih merata, hal ini dapat meningkatkan reduksi patogen pada kompos.

Durasi komposting sistem ini lebih singkat dari windrow composting karena adanya aerasi aktif dari blower. Kontrol aerasi dapat dilakukan secara manual atau otomatis sesuai dengan deteksi suhu tumpukan [38]. Laju aerasi beragam dari 0,3 hingga 0,9 m³/menit/ton [38-39]. Durasi komposting aktif beragam dari 11 minggu hingga 14 minggu [40-41]. Dilanjutkan dengan fase maturasi selama 4 hingga 8 minggu [41-42]. Tinggi tumpukan yang umum digunakan adalah 1,4 hingga 1,5 meter tumpukan bahan organik dan tambahan 0,1 atau 0,2 meter biofilter atau bed padding sehingga total tinggi tumpukan adalah 1,6 atau 1,7 meter [37-39], [43]. Lebar tumpukan dalam rentang 3 hingga 5 meter. Lebar tumpukan fasilitas kompos skala sedang atau kecil dapat dibuat lebih kecil yaitu 0,5 hingga 1,5 meter [37-38], [44]. Panjang tumpukan terbatas hingga 21 atau 27 meter agar distribusi udara pada pipa aerasi merata.

3) *In-vessel Composting*

Sistem komposting ini dilakukan di dalam wadah atau kontainer tertutup [22]. Reaktor in-vessel horizontal yang dapat diterapkan adalah sistem saluran. Pada sistem saluran, bahan organik ditumpuk dalam bentuk windrow yang dibatasi tembok dengan tinggi antara 1 hingga 3 meter dan berjarak 6 meter. Panjang channel biasanya adalah 50 meter. Aerasi dilakukan dengan kombinasi forced aeration dan turning. Bila dioperasikan secara continuous, material baru dapat dimasukkan harian. Pergerakan material pada sistem ini dibagi menjadi longitudinal dan lateral. Pada sistem longitudinal, material digeser dari tempat loading ke unloading dengan turning machine. Material dapat bergerak 2 hingga 3 meter per turning. Pada sistem lateral, material bergerak secara lateral ke baris selanjutnya. Conveyor biasanya digunakan setiap 2 hingga 3 hari untuk proses ini.

4) *Vermicomposting*

Vermicomposting dapat dilakukan di ruang terbuka yang teduh. Proses ini dapat dilakukan dalam bentuk windrow [45]. Lubang dapat dibuat dengan panjang 3 meter dan lebar 2,5 meter sedangkan windrow dapat dibuat dengan panjang hingga 50 meter, tinggi 1 meter, dan lebar 3 meter [45-46]. Bedding dibangun pada dasar windrow dan bahan organik ditumpuk di atasnya dengan alat berat berupa front-end loader [45]. Bedding dipersiapkan dengan menginokulasikan cacing pada bahan organik yang sesuai seperti kompos yang sudah matang atau serpihan kayu [47-48]. Penambahan bahan organik dapat dilakukan secara berkala setiap 3 minggu sekali dengan tinggi 30 cm [49]. Durasi vermicomposting sistem batch adalah 90 hingga 172 hari tergantung dari komposisi bahan organik dan katalisnya [48], [50]. Sedangkan, sistem continuous dapat berlangsung dari 3 bulan hingga lebih dari 12 bulan, tergantung dari ketinggian tumpukan windrow [49].

5) *Black Soldier Fly Larvae (BSFL) Composting*

Komposting BSFL dilakukan dalam reaktor sederhana seperti kontainer plastik berukuran 49 cm x 32 cm dengan tinggi 14,5 cm untuk 7 kg bahan organik [51]. Kontainer-kontainer tersebut ditumpuk sehingga dengan luas 1 m² dapat digunakan untuk mengolah 60 kg biowaste. Antar kontainer diberi jarak 3 hingga 8 cm pada rak [52]. Durasi pengomposan beragam dari 9 hari hingga 14 hari [53-55]. Larva sejumlah 10.000 dapat ditambahkan pada 15 kg berat

basah biowaste. Tumpukan reaktor dijaga kadar airnya dengan menyediakan ventilasi pasif. Bila persentase kadar air lebih dari 84% hingga 90%, dapat diadakan ventilasi aktif dengan laju aerasi 0,86 - 1,42 m²/jam/kg berat basah [54]. Ketika proses selesai, larva dipisahkan dari residu secara manual maupun otomatis. Selanjutnya, residu mengalami masa curing untuk menstabilkan kompos selama dua bulan. Lalat, yang merupakan hasil evolusi larva, dibawa ke love cage. Pada love cage disediakan media untuk tumbuhnya telur untuk digunakan pada proses komposting selanjutnya. Larva yang telah berumur 5 hari (5-DOL) dapat digunakan untuk proses komposting selanjutnya.

E. *Anaerobic Digester (AD)*

1) *Single Stage Anaerobic Digester (SSAD)*

Pada SSAD, empat (4) fase pada anaerobic digestion terjadi pada satu reaktor. Reaktor ini umumnya merupakan tangki berbentuk silinder dengan diameter sebesar 6 hingga 40 m dan dasar reaktor berbentuk kerucut. Slope kerucut berukuran 1:4-6 (vertikal terhadap horizontal). Waktu retensi pada reaktor adalah 14 hingga 20 hari [56]. Proses pada reaktor dapat dilakukan dengan atau tanpa pengadukan. Pengadukan juga dapat mencegah timbulnya sedimen dan kerak [57]. Reaktor tanpa pengadukan dapat menggunakan mixing pump untuk mencampurkan bahan organik awal sehingga proses degradasi dalam reaktor tetap dapat berlangsung dengan baik. Mixing pump juga dapat meresirkulasi *digestate* kembali ke dalam reaktor. Sebagian *digestate* yang tidak dipompa dikeluarkan dari digester menggunakan conveyor [56], [58].

2) *Two Stage Anaerobic Digester (TSAD)*

Mekanisme kerja two stage anaerobic digestion (TSAD) mirip dengan SSAD, hanya saja digunakan reaktor terpisah untuk fase metanogenesis. Reaktor dapat dirancang dengan kedalaman reaktor 14,86 m, diameter 20,1 m, dan kedalaman cone 1,65 m [59]. Efluen dari reaktor pertama yang relatif homogen dipindahkan ke reaktor kedua menggunakan pompa. Pompa juga digunakan untuk meresirkulasi sebagian *digestate* dari reaktor kedua kembali ke reaktor pertama untuk menginokulasi substrat. *Digestate* tersisa dikeluarkan dari reaktor menggunakan pompa [56].

F. *Pengelolaan Biowaste di Kota Surabaya*

Kota Surabaya adalah salah satu kota terbesar di Indonesia dengan populasi hampir mencapai tiga juta penduduk pada tahun 2020. Timbulan sampah di Kota Surabaya pada tahun 2020 adalah 2091,39 ton/hari dengan komposisi *biowaste* 56%. Pengolahan *biowaste* di Kota Surabaya secara umum dilakukan dengan *landfilling* dan hanya sebagian kecil diolah dengan komposting. Terdapat 26 rumah kompos di Kota Surabaya dengan rata-rata 75% (v/v) bahan organik masuk dapat dikonversi menjadi kompos.

Biowaste yang tercampur dengan jenis sampah lainnya dan tidak dikomposkan diangkut bersama-sama ke lahan urug dan ditimbun. Jenis lahan urug yang diterapkan adalah sanitary landfill dengan timbulan sampah masuk sebesar 1654 ton/hari dari total timbulan sampah 2091,39 ton/hari pada tahun 2020. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat 437 ton/hari yang kemungkinan hanya dibuang sembarangan atau dibakar karena tidak diangkut ke landfill dan bila pengomposan tidak dilakukan.

G. Kuesioner AHP

Berdasarkan keempat responden, dua teknologi yang selalu berada di peringkat tiga besar adalah single stage AD, lalu alternatif lainnya adalah antara sanitary landfill, controlled landfill, atau two-stage AD (Tabel 1).

Nilai peringkat aspek teknis oleh akademisi 1, akademisi 2, akademisi 3, dan pemerintah adalah 0,17; 0,75; 0,50; dan 0,34. Opini Akademisi 2 dan 3, yang menaruh poin relatif tinggi pada aspek teknis, menghasilkan peringkat tinggi kepada AD sebagai teknologi pengolahan. Hal ini karena secara teknis, AD memiliki efisiensi relatif lebih besar, membutuhkan lahan relatif lebih kecil, menghasilkan timbunan residu lebih kecil, dan operasionalnya dalam sistem otomatis dan sensor. AD secara teknis lebih unggul daripada landfill.

H. Penilaian Aspek Teknis

1) Efisiensi Teknologi

Efisiensi teknologi ditentukan oleh kemampuan teknologi untuk mendegradasi bahan organik menjadi produk berupa kompos atau *digestate*, serta biogas. Pada teknologi komposting, hal ini dapat diamati dari beberapa parameter seperti temperatur, kandungan karbon, kandungan nitrogen, kandungan VS, evolusi karbon dioksida, dan rasio C/N [60]. Parameter tersebut sangat dipengaruhi oleh efisiensi aerasi. Aerasi aktif diterapkan pada semua teknologi komposting kecuali BSFL composting dan vermicomposting. Reduksi volatile solid lebih efisien pada windrow composting dengan turning daripada aerated static pile composting dengan aerasi pasif. Walau tanpa aerasi, vermicomposting dapat mendegradasi material organik 2 hingga 5 kali lebih cepat dari proses komposting konvensional (dengan fase termofilik) [61]. BSFL komposting juga lebih efisien dalam mendegradasi material organik daripada komposting konvensional, dengan persentase reduksi berat kering hingga 60–68% [62]. Dibandingkan vermicomposting, BSFL membutuhkan waktu relatif singkat untuk mendegradasi bahan organik sehingga siklus degradasi dapat dilakukan lebih cepat.

Pada teknologi *landfilling*, sanitary landfill cenderung lebih efisien dari controlled landfill. Penutupan timbunan dengan tanah penutup dapat membantu percepatan degradasi, sehingga sanitary landfill lebih unggul karena frekuensi penutupan lebih banyak daripada controlled landfill. Walaupun, efisiensi *landfilling* secara signifikan lebih kecil daripada komposting karena proses komposting membutuhkan waktu yang lebih sedikit untuk mengkonversi bahan organik.

Teknologi anaerobic digester secara umum lebih efisien daripada komposting dan *landfilling*. Teknologi ini dioperasikan dalam sistem tertutup dan terkontrol sehingga kinerja sistem dapat diamati dengan lebih efektif. Pada two stage anaerobic digester, pemisahan fase metanogenesis pada reaktor berbeda meningkatkan efisiensi teknologi. Sehingga, TSAD lebih efisien daripada SSAD. Maka dari itu, urutan teknologi pengolahan *biowaste* dari yang paling efisien berdasarkan kajian yang telah dilakukan adalah two stage AD, single stage AD, BSFL composting, vermicomposting, in-vessel composting, aerated static pile composting, windrow composting, sanitary landfill, dan controlled landfill.

2) Timbunan Residu

Produk dari windrow composting, aerated static pile composting, dan in-vessel composting adalah kompos, sedangkan produk sampingannya dapat berupa lindi dan bahan organik yang belum terdegradasi secara sempurna. Sedangkan pada BSFL composting, larva yang digunakan untuk membantu degradasi bahan organik akan berevolusi menjadi lalat dan lalat tersebut akan berkembangbiak dan meninggalkan telur yang selanjutnya akan menjadi larva dan digunakan kembali untuk degradasi bahan organik. Pada vermicomposting, cacing juga akan berkembang biak dan kembali dimanfaatkan untuk proses degradasi selanjutnya.

Kompos yang dihasilkan perlu diproses lebih lanjut untuk dapat digunakan atau dipasarkan. Kompos ini biasanya disaring dan dipisahkan dari material yang bukan kompos, seperti bahan organik yang belum terdegradasi, cacing, larva, ataupun bahan pengotor lainnya. Baik windrow composting, aerated static pile composting, in-vessel composting, BSFL composting, dan vermicomposting membutuhkan perlakuan yang sama. Pada in-vessel composting, lindi dapat dengan mudah diresirkulasikan sehingga timbunan lindi dapat lebih kecil. Komposting di ruangan terbuka, seperti windrow composting dan aerated static pile composting berisiko mendapatkan presipitasi hujan sehingga timbunan lindi dapat meningkat. Berdasarkan timbunan residunya, windrow composting dan aerated static pile composting memiliki potensi lebih besar dari in-vessel composting, BSFL composting, dan vermicomposting.

Timbunan residu pada *landfilling* juga merupakan lindi. Lindi yang dihasilkan pada landfill, baik controlled landfill maupun sanitary landfill secara signifikan lebih banyak dari komposting karena tidak ada aerasi ataupun pembalikan sehingga tingkat evaporasi kadar air lebih kecil. Pada anaerobic digester, lindi juga dihasilkan dari reaktor digester. Kadar air pada *digestate* akan ter-evaporasi saat proses dewatering sehingga timbunan lindi anaerobic digester juga relatif lebih kecil dari landfill. Pada anaerobic digester juga tidak ada risiko kadar air berlebih karena air hujan, sehingga timbunan lindi relatif lebih rendah dari teknologi komposting.

Maka dari itu, urutan teknologi yang menimbulkan lindi dari yang terkecil hingga terb[esar adalah single stage AD dan two stage AD; in-vessel composting dan BSFL composting; windrow composting, aerated static pile composting, dan vermicomposting; serta sanitary landfill dan controlled landfill.

3) Kebutuhan Lahan

Kebutuhan lahan berkaitan erat dengan waktu komposting. Semakin lama waktu yang dibutuhkan, maka semakin banyak lahan yang dibutuhkan untuk menampung material baru setiap harinya. Kebutuhan lahan berdasarkan tipikal dimensinya dari setiap jenis teknologi dapat dilihat pada Tabel 2.

4) Kemudahan Operasi dan Perawatan

Kemudahan operasi dan perawatan pada studi ini diukur dari frekuensi pekerja melakukan pekerjaan fisik dan frekuensi pengamatan serta perawatan teknologi yang perlu dilakukan. Urutan teknologi yang paling mudah dioperasikan hingga yang disajikan dalam Tabel 3.

I. Penilaian Aspek Lingkungan

Berdasarkan perhitungan dengan rumus dari IGES (2018) yang diadopsi dari IPCC 2006, estimasi perhitungan emisi GRK dari setiap teknologi pengolahan disajikan dalam Tabel 4.

Penentuan Teknologi Pengolahan Biowaste Perkotaan Terpilih

Opini responden yang digunakan adalah yang memiliki jumlah tidak konsisten paling sedikit dan opini yang dinamis dalam pengisian kuesioner, yaitu akademisi 2. Opini responden digunakan pada prioritas global, sedangkan penilaian prioritas lokal didasarkan pada peringkat teknologi setiap sub-kriteria.

Tingkat kepentingan aspek teknis dan lingkungan oleh responden adalah 0,750 dan 0,250 berturut-turut. Penilaian nilai prioritas berdasarkan kajian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa urutan prioritas sub-kriteria aspek teknis adalah kebutuhan lahan, kemudahan operasi dan perawatan, efisiensi, serta timbulan residu. Urutan prioritas sub-kriteria secara keseluruhan berdasarkan kombinasi opini responden dan kajian yang telah dilakukan adalah kebutuhan lahan, potensi timbulan GRK, kemudahan operasi dan perawatan, efisiensi, dan timbulan residu.

Hasil prioritas akhir menunjukkan bahwa urutan teknologi pengolahan biowaste yang paling sesuai untuk diterapkan di Kota Surabaya adalah two stage AD, single stage AD, controlled landfill, sanitary landfill, in-vessel composting, BSFL composting, windrow composting, aerated static pile composting, dan vermicomposting. Peringkat ini memiliki kemiripan dengan peringkat berdasarkan opini stakeholder terkait (Tabel 1), yaitu Single stage AD berada dalam peringkat 3 besar, dengan two stage AD, controlled landfill, serta sanitary landfill menjadi alternatif peringkat tinggi lainnya.

Timbulan sampah di Kota Surabaya setiap tahun meningkat dalam 5 tahun terakhir, kecuali pada tahun 2020. Penurunan timbulan sampah pada tahun tersebut dimungkinkan karena terjadi wabah pandemi pada tahun tersebut sehingga fasilitas umum banyak yang ditutup. Mengasumsikan bahwa timbulan sampah akan terus meningkat berdasarkan informasi tersebut, maka teknologi yang diperlukan beberapa tahun kedepan adalah yang berkapasitas besar dengan efisiensi tinggi. Maka dari itu, two stage anaerobic digester dan single stage anaerobic digester masih relevan untuk diterapkan. Penerapan controlled landfill dan sanitary landfill kurang relevan karena tingkat kesulitan pengadaan lahan akan semakin tinggi seiring dengan tingginya tingkat populasi. Teknologi komposting yang juga relevan adalah in-vessel composting. Efisiensi tinggi pada sistem terkontrol dapat mengolah biowaste dalam kurun waktu relatif singkat sehingga sesuai untuk teknologi skala besar. Teknologi komposting yang paling tidak relevan untuk digunakan adalah BSFL composting dan vermicomposting. Walaupun efisiensinya tinggi, dibutuhkan lahan besar dan perawatan relatif intensif sehingga kurang efektif untuk teknologi berskala besar.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan aspek teknisnya, keunggulan teknologi pengolahan *biowaste* dilihat dari efisiensi, timbulan residu,

kemudahan operasi dan perawatan, serta kebutuhan lahan. Potensi timbulan GRK teknologi pengolahan *biowaste* dipengaruhi oleh peralatan yang digunakan selama operasional, emisi degradasi bahan organik tersebut, serta emisi yang dapat dihindari dari pemanfaatan residu menjadi pupuk atau pemulihan energi. Berdasarkan hasil kajian serta pertimbangan dari pendapat stakeholder terkait, tiga teknologi pengolahan yang paling sesuai untuk diterapkan di Kota Surabaya adalah two-stage anaerobic digester, single stage anaerobic digester, dan controlled landfill.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bakesbangpol Surabaya, DLH Surabaya, DKRTH Surabaya, serta tiga (3) responden akademisi yang telah membantu pengisian kuesioner ataupun memberikan data sekunder terkait. Selain itu, penulis juga berterima kasih kepada Ibu Susi, Ibu Firda, Ibu Warma, dan Ibu Nieke yang telah memberi masukan terhadap studi ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Pasang, G. A. Moore, and G. Sitorus, "Neighbourhood-based waste management: A solution for solid waste problems in Jakarta, Indonesia," *Waste Manag.*, vol. 27, no. 12, Jan. 2007, doi: 10.1016/j.wasman.2006.09.010.
- [2] U. N. Ngoc and H. Schnitzer, "Sustainable solutions for solid waste management in Southeast Asian countries," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 6, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.08.031.
- [3] C. Zurbrugg, M. Gfrerer, H. Ashadi, W. Brenner, and D. Kufer, "Determinants of sustainability in solid waste management – The Gianyar Waste Recovery Project in Indonesia," *Waste Manag.*, vol. 32, no. 11, Nov. 2012, doi: 10.1016/j.wasman.2012.01.011.
- [4] A. S. Permana, S. Towoloe, N. A. Aziz, and C. S. Ho, "Sustainable solid waste management practices and perceived cleanliness in a low income city," *Habitat Int.*, vol. 49, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.habitatint.2015.05.028.
- [5] P. Yadav and S. R. Samadder, "A critical review of the life cycle assessment studies on solid waste management in Asian countries," *J. Clean. Prod.*, vol. 185, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.02.298.
- [6] L. Capuano Mascarenhas, B. Ness, M. Oloko, and F. O. Awuor, "Multi-criteria analysis of municipal solid waste treatment technologies to support decision-making in Kisumu, Kenya," *Environ. Challenges*, vol. 4, Aug. 2021, doi: 10.1016/j.envc.2021.100189.
- [7] S. Y. Cheng *et al.*, "Incorporating biowaste into circular bioeconomy: A critical review of current trend and scaling up feasibility," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 19, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.eti.2020.101034.
- [8] Y. P. Rago, D. Surroop, and R. Mohee, "Assessing the potential of biofuel (biochar) production from food wastes through thermal treatment," *Bioresour. Technol.*, vol. 248, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.biortech.2017.06.108.
- [9] L. Bastian, J. Yano, Y. Hirai, and S. Sakai, "Greenhouse gas emissions from biogenic waste treatment: options and uncertainty," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 15, no. 1, Jan. 2013, doi: 10.1007/s10163-012-0087-4.
- [10] A. Swati and S. Hait, "Greenhouse gas emission during composting and vermicomposting of organic wastes-A review," *CLEAN - Soil, Air, Water*, vol. 46, no. 6, Jun. 2018, doi: 10.1002/clen.201700042.
- [11] C. R. Lohri, S. Diener, I. Zabaleta, A. Mertenat, and C. Zurbrugg, "Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products: a review with focus on low- and middle-income settings," *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology*, vol. 16, no. 1, Mar. 2017, doi: 10.1007/s11157-017-9422-5.
- [12] S. Sunarto, P. Purwanto, and S. Hadi, "Quantification of greenhouse gas emissions from municipal solid waste recycling and disposal in Malang City Indonesia," *J. Ecol. Eng.*, vol. 18, no. 3, May 2017, doi: 10.12911/22998993/70237.
- [13] Syafrudin, Mochamad Arief Budihardjo, Nany Yulastuti, and Bimastyaji Surya Ramadan, "Assessment of greenhouse gases emission from integrated solid waste management in Semarang City, Central Java, Indonesia," *Evergreen*, vol. 8, no. 1, Mar. 2021, doi: 10.5109/4372257.

- [14] D. G. J. Premakumara *et al.*, "Reduction of greenhouse gases (GHGs) and short-lived climate pollutants (SLCPs) from municipal solid waste management (MSWM) in the Philippines: Rapid review and assessment," *Waste Manag.*, vol. 80, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.09.036.
- [15] D. E. Rahayu and Y. Sukmono, "Kajian potensi pemanfaatan sampah organik pasar berdasarkan karakteristiknya (Studi kasus pasar Segiri Kota Samarinda)," *J. Sains dan Teknol. Lingkung.*, vol. 5, no. 2, pp. 77–90, 2013.
- [16] S. K. Mishra and K. D. Yadav, "Disposal of garden waste using food waste inoculant in rotary drums and their ranking using analytical hierarchy process," *Bioresour. Technol. Reports*, vol. 15, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.biteb.2021.100710.
- [17] M. R. Kosseva, "Sources, characteristics and treatment of plant-based food waste," in *Food Industry Wastes*, Elsevier, 2020, pp. 37–66.
- [18] M. R. Kosseva, "Sources, characteristics, treatment, and analyses of animal-based food wastes," in *Food Industry Wastes*, Elsevier, 2020, pp. 67–85.
- [19] P. Béguin and J.-P. Aubert, "The biological degradation of cellulose," *FEMS Microbiol. Rev.*, vol. 13, no. 1, pp. 25–58, Jan. 1994, doi: 10.1111/j.1574-6976.1994.tb00033.x.
- [20] J. L. Chen, R. Ortiz, T. W. J. Steele, and D. C. Stuckey, "Toxicants inhibiting anaerobic digestion: A review," *Biotechnol. Adv.*, vol. 32, no. 8, pp. 1523–1534, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.biotechadv.2014.10.005.
- [21] G. Janusz, A. Pawlik, J. Sulej, U. Świdarska-Burek, A. Jarosz-Wilkolazka, and A. Paszczyński, "Lignin degradation: microorganisms, enzymes involved, genomes analysis and evolution," *FEMS Microbiol. Rev.*, vol. 41, no. 6, pp. 941–962, Nov. 2017, doi: 10.1093/femsre/flux049.
- [22] G. Tchobanoglous, H. Theisen, and S. Vigil, *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues*, 1st ed. Singapore: McGraw-Hill, 1993.
- [23] US EPA, *Composting: Yard and Municipal Solid Waste*, 1st ed. Pennsylvania: CRC Press, 1995.
- [24] R. A. Boettcher, *Air Classification of Solid Wastes Performance of Experimental Units and Potential Applications for Solid Waste Reclamation*, 1st ed. Washington: U.S. Environmental Protection Agency, 1972.
- [25] J. Bartlett and P. Vesilind, "The effect of moisture on air classification of municipal solid waste," *Waste Manag. Res.*, vol. 1, no. 4, pp. 347–357, 1983, doi: 10.1016/0734-242x(83)90038-1.
- [26] A. Jank, W. Müller, I. Schneider, F. Gerke, and A. Bockreis, "Waste Separation Press (WSP): A mechanical pretreatment option for organic waste from source separation," *Waste Manag.*, vol. 39, May 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.02.024.
- [27] H. Chen *et al.*, "Improving two-stage thermophilic-mesophilic anaerobic co-digestion of swine manure and rice straw by digestate recirculation," *Chemosphere*, vol. 274, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.129787.
- [28] L. Ding, Y. Chen, Y. Xu, and B. Hu, "Improving treatment capacity and process stability via a two-stage anaerobic digestion of food waste combining solid-state acidogenesis and leachate methanogenesis/recirculation," *J. Clean. Prod.*, vol. 279, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123644.
- [29] I. Gavilanes-Terán, J. Jara-Samaniego, J. Idrovo-Novillo, M. A. Bustamante, R. Moral, and C. Paredes, "Windrow composting as horticultural waste management strategy – A case study in Ecuador," *Waste Manag.*, vol. 48, pp. 127–134, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.wasman.2015.11.026.
- [30] S. De Silva and M. Yatawara, "Assessment of aeration procedures on windrow composting process efficiency: A case on municipal solid waste in Sri Lanka," *Environ. Nanotechnology, Monit. Manag.*, vol. 8, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.enmm.2017.07.008.
- [31] M. Hrad, E. Binner, M. Piringner, and M. Huber-Humer, "Quantification of methane emissions from full-scale open windrow composting of biowaste using an inverse dispersion technique," *Waste Manag.*, vol. 34, no. 12, pp. 2445–2453, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.wasman.2014.08.013.
- [32] H. Jalalipour, N. Jaafarzadeh, G. Morscheck, S. Narra, and M. Nelles, "Potential of producing compost from source-separated municipal organic waste (A case study in Shiraz, Iran)," *Sustainability*, vol. 12, no. 22, Nov. 2020, doi: 10.3390/su12229704.
- [33] K. Marešová and M. Kollárová, "Influence of compost covers on the efficiency of biowaste composting process," *Waste Manag.*, vol. 30, no. 12, pp. 2469–2474, Dec. 2010, doi: 10.1016/j.wasman.2010.06.014.
- [34] S. S. Dalahmeh, G. Thorsén, and H. Jönsson, "Open-air storage with and without composting as post-treatment methods to degrade pharmaceutical residues in anaerobically digested and dewatered sewage sludge," *Sci. Total Environ.*, p. 151271, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.151271.
- [35] T. Mengistu, H. Gebrekidan, K. Kibret, K. Woldetsadik, B. Shimelis, and H. Yadav, "Comparative effectiveness of different composting methods on the stabilization, maturation and sanitization of municipal organic solid wastes and dried faecal sludge mixtures," *Environ. Syst. Res.*, vol. 6, no. 1, Jan. 2018, doi: 10.1186/s40068-017-0079-4.
- [36] K. Alate, G. Mawussi, K. Ayisah, and K. Sanda, "Agronomic potential value of household urban solid wastes by composting and composts quality assessment," *Int. J. Agric. Res. Innov. Technol.*, vol. 9, no. 2, pp. 1–8, Feb. 2020, doi: 10.3329/ijarit.v9i2.45403.
- [37] B. Yue, T.-B. Chen, D. Gao, G.-D. Zheng, B. Liu, and D.-J. Lee, "Pile settlement and volume reduction measurement during forced-aeration static composting," *Bioresour. Technol.*, vol. 99, no. 16, pp. 7450–7457, Nov. 2008, doi: 10.1016/j.biortech.2008.02.029.
- [38] W. Luo, T. B. Chen, G. D. Zheng, D. Gao, Y. A. Zhang, and W. Gao, "Effect of moisture adjustments on vertical temperature distribution during forced-aeration static-pile composting of sewage sludge," *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 52, no. 4, pp. 635–642, Feb. 2008, doi: 10.1016/j.resconrec.2007.08.004.
- [39] M. Rasapoor, T. Nasrabadi, M. Kamali, and H. Hoveidi, "The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method," *Waste Manag.*, vol. 29, no. 2, pp. 570–573, Feb. 2009, doi: 10.1016/j.wasman.2008.04.012.
- [40] H. Maricou, W. Verstraete, and K. Mesuere, "Hygienic aspects of biowaste composting: Airborne microbial concentrations as a function of feedstock, operation and season," *Waste Manag. Res.*, vol. 16, no. 4, pp. 304–311, 1998, doi: 10.1177/0734242X9801600402.
- [41] R. Cáceres, N. Coromina, K. Malińska, and O. Marfà, "Evolution of process control parameters during extended co-composting of green waste and solid fraction of cattle slurry to obtain growing media," *Bioresour. Technol.*, vol. 179, pp. 398–406, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.biortech.2014.12.051.
- [42] A. De Lucas Martínez, I. A. Pastor, J. V. Camacho, and J. J. P. Vivó, "Biowaste composting kinetics at Almagro domestic solid waste management facilities," in *Waste Management and the Environment*, 2002, pp. 181–189.
- [43] C. Fang, H. Yin, L. Han, S. Ma, X. He, and G. Huang, "Effects of semi-permeable membrane covering coupled with intermittent aeration on gas emissions during aerobic composting from the solid fraction of dairy manure at industrial scale," *Waste Manag.*, vol. 131, pp. 1–9, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.05.030.
- [44] Z. Zhang *et al.*, "Downward aeration promotes static composting by affecting mineralization and humification," *Bioresour. Technol.*, vol. 338, p. 125592, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.biortech.2021.125592.
- [45] G. Munroe, *Manual of on-Farm Vermicomposting and Vermiculture*, 1st ed. Canada: Organic Agriculture Centre of Canada, 2007.
- [46] K. A. Wani, Mamta, and R. J. Rao, "Bioconversion of garden waste, kitchen waste and cow dung into value-added products using earthworm *Eisenia fetida*," *Saudi J. Biol. Sci.*, vol. 20, no. 2, pp. 149–154, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.sjbs.2013.01.001.
- [47] A. M. Hobson, J. Frederickson, and N. B. Dise, "CH₄ and N₂O from mechanically turned windrow and vermicomposting systems following in-vessel pre-treatment," *Waste Manag.*, vol. 25, no. 4, pp. 345–352, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.wasman.2005.02.015.
- [48] C. H. Lalander, A. J. Komakech, and B. Vinnerås, "Vermicomposting as manure management strategy for urban small-holder animal farms – Kampala case study," *Waste Manag.*, vol. 39, pp. 96–103, May 2015, doi: 10.1016/j.wasman.2015.02.009.
- [49] A. Hanc, T. Castkova, S. Kuzel, and T. Cajthaml, "Dynamics of a vertical-flow windrow vermicomposting system," *Waste Manag. Res.*, vol. 35, no. 11, pp. 1121–1128, Nov. 2017, doi: 10.1177/0734242X17725161.
- [50] B. Zhou *et al.*, "Earthworm biomass and population structure are negatively associated with changes in organic residue nitrogen concentration during vermicomposting," *Pedosphere*, vol. 31, no. 3, pp. 433–439, Jun. 2021, doi: 10.1016/S1002-0160(20)60089-3.
- [51] T. Liu, M. K. Awasthi, S. K. Awasthi, Y. Duan, and Z. Zhang, "Effects of black soldier fly larvae (Diptera: Stratiomyidae) on food waste and sewage sludge composting," *J. Environ. Manage.*, vol. 256, p. 109967, Feb. 2020, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109967.
- [52] L. Lindberg, B. Vinnerås, and C. Lalander, "Process efficiency in relation to enzyme pre-treatment duration in black soldier fly larvae composting," *Waste Manag.*, vol. 137, pp. 121–127, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.wasman.2021.10.033.
- [53] T. Liu, M. K. Awasthi, H. Chen, Y. Duan, S. K. Awasthi, and Z. Zhang, "Performance of black soldier fly larvae (Diptera: Stratiomyidae) for manure composting and production of cleaner compost," *J. Environ. Manage.*, vol. 251, p. 109593, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.jenvman.2019.109593.

- [54] C. Lalander, E. Ermolaev, V. Wiklicky, and B. Vinnerås, "Process efficiency and ventilation requirement in black soldier fly larvae composting of substrates with high water content," *Sci. Total Environ.*, vol. 729, p. 138968, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138968.
- [55] W. Pang *et al.*, "The influence on carbon, nitrogen recycling, and greenhouse gas emissions under different C/N ratios by black soldier fly," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 27, no. 34, pp. 42767–42777, Dec. 2020, doi: 10.1007/s11356-020-09909-4.
- [56] D. P. Van, T. Fujiwara, B. Leu Tho, P. P. Song Toan, and G. Hoang Minh, "A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends," *Environ. Eng. Res.*, vol. 25, no. 1, pp. 1–17, Mar. 2019, doi: 10.4491/eer.2018.334.
- [57] G. Chinellato, F. Battista, D. Bolzonella, and C. Cavinato, "Single-phase anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste without dilution: Reactor stability and process performance of small, decentralised plants," *Waste Manag.*, vol. 125, pp. 103–111, Apr. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2021.02.009.
- [58] G. Lissens, P. Vandevivere, L. De Baere, E. M. Biey, and W. Verstraete, "Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion," *Water Sci. Technol.*, vol. 44, no. 8, pp. 91–102, Oct. 2001, doi: 10.2166/wst.2001.0473.
- [59] M. Meister, M. Rezavand, C. Ebner, T. Pümpel, and W. Rauch, "Mixing non-Newtonian flows in anaerobic digesters by impellers and pumped recirculation," *Adv. Eng. Softw.*, vol. 115, pp. 194–203, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.advengsoft.2017.09.015.
- [60] T. Loakasikarn, Y. Kubota, M. Koyama, and K. Nakasaki, "Effect of seeding materials on organic matter degradation and microbial community succession during model organic waste composting," *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 37, p. 102182, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.bcab.2021.102182.
- [61] J. Pathma and N. Sakthivel, "Microbial diversity of vermicompost bacteria that exhibit useful agricultural traits and waste management potential.," *Springerplus*, vol. 1, p. 26, 2012, doi: 10.1186/2193-1801-1-26.
- [62] M. Gold, J. K. Tomberlin, S. Diener, C. Zurbrügg, and A. Mathys, "Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review," *Waste Manag.*, vol. 82, pp. 302–318, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2018.10.022.