



Kajian Potensi Emisi Pemanfaatan Lumpur dari Instalasi Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan *Black Soldier Fly* (BSF) dengan Metode *Life Cycle Assessment* (LCA)

Nurani Ikhlas^{1*}, Didi Dwi Anggoro^{1,2}, Haryono Setiyo Huboyo^{1,3}

¹Program Studi Program Profesi Insinyur Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

²Departemen Teknik Kimia Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

³Departemen Teknik Lingkungan Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro,
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus UNDIP Tembalang, Semarang, Indonesia 50275

*Corresponding author: nurani.ikhlas@gmail.com

(Received: July 17, 2025; Accepted: September 20, 2025)

Abstract

Study of Potential Emissions from Sludge Utilization from Tofu Industrial Wastewater Treatment Plants Using Black Soldier Fly (BSF) with Life Cycle Assessment (LCA) Method. This study was conducted to evaluate the potential emissions and environmental impacts of sludge processing from tofu industrial wastewater using black soldier fly (BSF) larvae. This study was conducted based on the potential of nutrient-rich sludge, such as tofu waste sludge, to damage and contaminate the environment. BSF, in this case, can act as a bioconverter that converts organic compounds into biomass. In this study, a life cycle assessment (LCA) was used as the basic method to assess the environmental impact of maggot cultivation, focusing on five main categories frequently used: acidification, eutrophication, global warming potential, abiotic degradation, and ozone layer depletion. The functional units used were 2.5 kg of sludge and 1 kg of food waste used as feed. The results showed that the transportation process unit was the largest contributor to emissions in bioconversion activities using BSF. In addition, the drying process and the BSF bioconversion phase also contributed significantly to the overall emissions. The study results indicate that BSF bioconversion is a fairly effective method for processing organic waste and is able to support the principles of a sustainable economy.

Keywords: black soldier fly, life cycle study, tofu waste sludge, global warming potential

Abstrak

Kajian ini dilakukan untuk mengevaluasi potensi emisi atau dampak lingkungan dari pengolahan lumpur dari limbah cair industri tahu menggunakan *black soldier fly* (BSF) sebagai larva yang mengolah lumpur tersebut. Hal ini dilakukan atas dasar adanya potensi lumpur yang kaya nutrisi seperti lumpur limbah tahu yang mampu merusak dan mengkontaminasi lingkungan. BSF, dalam hal ini, dapat menjadi biokonverter yang merombak senyawa organik menjadi biomassa. Pada kajian ini, *life cycle assessment* atau LCA digunakan sebagai metode dasar untuk menilai dampak lingkungan dari budidaya maggot di mana fokus kategorinya pada 5 kategori utama yang sering digunakan meliputi asidifikasi, eutrofikasi, potensi pemanasan global, penurunan abiotik dan penipisan lapisan ozon. Unit fungsi yang digunakan adalah 2,5 kg lumpur dan 1 kg sampah makanan yang digunakan sebagai umpan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa unit proses transportasi merupakan penyumbang emisi terbesar dalam aktivitas biokonversi menggunakan BSF. Selain itu, proses pengeringan dan fase biokonversi BSF juga berkontribusi cukup besar menghasilkan emisi dalam proses secara keseluruhan. Hasil studi menunjukkan bahwa biokonversi BSF merupakan salah

satu metode pengolahan sampah organik yang cukup efektif dan mampu mendukung prinsip ekonomi berkelanjutan.

Kata kunci: *black soldier fly, kajian daur hidup, lumpur limbah tahu, global warming potential*

How to Cite This Article: Ikhlās, N., Anggoro, D. D., & Huboyo, H. S. (2025). Kajian Potensi Emisi Pemanfaatan Lumpur dari Instalasi Pengolahan Limbah Cair Industri Tahu Menggunakan Black Soldier Fly (BSF) dengan Metode Life Cycle Assessment (LCA). *JPII*, 3(3), 204-213. DOI: <https://doi.org/10.14710/jpii.2025.26873>

PENDAHULUAN

Sampah sisa makanan (*food waste*) menjadi masalah global karena aktivitas manusia menghasilkan 1,3 miliar ton setiap tahunnya. Jumlah volume sampah tersebut merupakan sepertiga dari bahan makanan yang diproduksi untuk konsumsi manusia (FAO, 2018). Permasalahan sampah sisa makanan ini menjadi sangat serius dan harus segera diselesaikan karena sampah sisa makanan merupakan sumber daya yang berharga. Selain itu, sampah sisa makanan juga berkontribusi terhadap terbentuknya emisi gas rumah kaca (GRK) yang juga menimbulkan eutrofikasi (Van Huis, 2013). Oleh karena itu, *Food and Agriculture Organization* (FAO) telah merekomendasikan alternatif pengolahan sampah sisa makanan menggunakan serangga yaitu *Black Soldier Fly* (BSF) yang dapat mendegradasi sampah makanan untuk mengurangi pencemaran akibat pembuangan sampah sisa makanan (FAO, 2013).

BSF yang memiliki nama ilmiah *Hermetia illucens* adalah serangga saprofit yang dimanfaatkan untuk memakan sampah organik yang di dalamnya termasuk sampah sisa makanan. Larva yang tersebar luas di daerah tropis dan subtropis ini, mampu mengubah berbagai substrat organik, di antaranya sampah sisa makanan (Win et al., 2018), kotoran manusia (Lalander et al., 2018), kotoran hewan (Li et al., 2011), menjadi biomassa yang lebih bernilai dan memiliki nilai ekonomis yang tinggi. Larva BSF mencapai berat hingga 220 mg/ekor ketika diberi sampah sisa makanan atau sampah organik (Salomone et al., 2017). Kemampuan BSF untuk mengkonversi berbagai bahan organik menjadi massa tubuh larva itu sendiri menjadi sebuah pilihan pengolahan terbaik untuk mengurangi limbah organik dan menghasilkan pakan yang berkelanjutan. Proses tersebut disebut sebagai biokonversi.

Proses biokonversi larva BSF dipengaruhi oleh jenis substrat/makanan/*feed* yang berperan dalam pertumbuhan dan komposisi kimiawi larva (Lim et al., 2022; Meneguz et al., 2018). Penelitian-penelitian terdahulu telah menunjukkan bahwa larva BSF dapat tumbuh besar dan banyak ditemukan pada substrat seperti sampah sisa makanan, sisa buah dan sayuran, limbah dari rumah pemotongan hewan dan kotoran hewan dengan ukuran larva yang bervariasi tergantung pada kualitas nutrisi substrat (Lalander et al., 2019). Pre-pupa yang dihasilkan oleh larva BSF memiliki kandungan nutrisi

yang sangat tinggi yang dapat dijadikan sebagai bahan pakan ternak.

Karena kandungan protein dan lipid yang tinggi, pre-pupa larva BSF sangat cocok digunakan untuk budidaya perikanan, pakan unggas dan produksi biodiesel (Barragan-Fonseca et al., 2017; Zheng et al., 2012). Selain nutrisinya yang tinggi, larva BSF memberikan manfaat lingkungan yang lebih baik dibandingkan dengan metode pengomposan konvensional (Kibler et al., 2018) karena proses biokonversinya yang lebih cepat 1,6 kali lipat daripada pengomposan biasa sehingga dapat mengurangi waktu pengolahan. Selain itu, larva BSF dewasa tidak berkembang pada habitat manusia dan bukan merupakan vektor penularan penyakit (Lalander et al., 2019).

Penelitian-penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya berfokus pada potensi aplikasi larva BSF dalam memproduksi biodiesel dan pakan ternak (Surendra et al., 2016; Win et al., 2018), serta potensi aplikasi pada berbagai jenis limbah (Beskin et al., 2018) dan berfokus pada upaya untuk mengoptimalkan efisiensi proses biokonversi (Jiang, 2018; Li et al., 2018). Berdasarkan perspektif siklus hidup BSF, penelitian yang telah dilakukan oleh Smetana et al. (2016), Salomone et al. (2017) dan Allegrretti et al. (2018) telah mengidentifikasi dan menjabarkan dampak lingkungan dari proses biokonversi larva BSF pada skala industri dan skala laboratorium. Penelitian-penelitian tersebut menegaskan bahwa produksi protein yang berasal dari serangga dapat memberikan manfaat lingkungan 2-5 kali lebih besar dibandingkan dengan sumber protein konvensional, terutama dalam mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK) dan meminimalkan konsumsi energi. Namun keterbatasan dalam penelitian terdahulu belum menampilkan transparansi data dan ketergantungan pada data emisi dari spesies serangga lain misalnya larva BSF. Salomone et al. (2017) dan Allegrretti et al. (2018) mengkaji sistem biokonversi larva BSF di Italia Selatan dan Brazil, masing-masing dengan menggunakan metodologi *Life Cycle Assessment* (LCA) atau kajian daur hidup untuk mengevaluasi dampak lingkungan. Mertenat et al. (2019) melakukan penelitian terkait fasilitas pengolahan BSF di Indonesia kemudian membandingkan dengan sistem pengolahan sampah terbuka (*open landfill*) terhadap potensi pemanasan global (*Global Warming Potential*). Hasil penelitian tersebut menekankan bahwa

perlunya basis data yang terperinci mengenai komposisi substrat, penggunaan energi dan proses transformasi untuk memfasilitasi perbandingan yang akurat antara teknologi biokonversi dengan BSF dan pengolahan sampah organik konvensional.

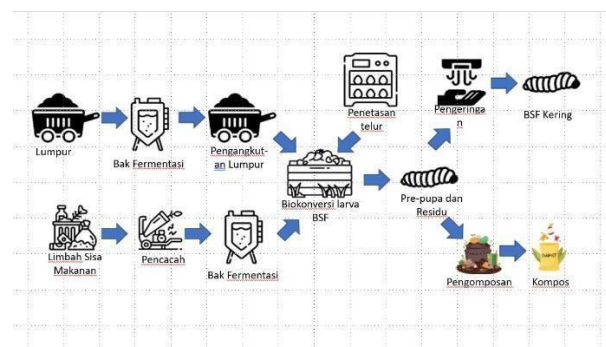
Material Flow Analysis (MFA) merupakan sebuah metode untuk memahami dan mengukur aliran material dan zat dalam sistem biokonversi BSF. MFA sering kali menjadi dasar *Life Cycle Inventory* (LCI) dan memberikan wawasan tentang distribusi nutrisi dan emisi dalam proses pengolahan limbah (Allesch & Brunner, 7 2017; Jensen et al., 2017). Dalam proses biokonversi larva BSF, MFA dapat mendeskripsikan rangkaian karbon, nitrogen dan elemen lainnya, yang menjadi dasar strategi untuk mengoptimalkan konversi limbah menjadi sumber daya. Namun studi MFA khususnya untuk sistem biokonversi BSF masih terbatas, dengan sebagian besar penelitian berfokus pada pengomposan konvensional atau proses pengolahan anaerobik untuk sampah rumah tangga (Guo et al., 2019).

Oleh karena itu, penelitian ini berupaya untuk mengatasi keterbatasan penelitian sebelumnya dengan melakukan kajian LCA yang komprehensif dari biokonversi BSF menggunakan lumpur limbah cair tahu sebagai substrat. Meskipun penelitian sebelumnya telah meneliti biokonversi BSF dari limbah makanan, namun penggunaan produk samping industri seperti lumpur dari hasil pengolahan limbah cair industri tahu masih belum banyak diteliti. Produksi tahu menghasilkan lumpur air limbah yang kaya akan nutrisi, namun jika tidak diolah dengan baik dan dibuang langsung ke lingkungan dapat mencemari badan air.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengkaji daur hidup BSF dan mengoptimalkan strategi untuk penurunan emisi dari pengelolaan BSF menggunakan lumpur limbah cair tahu. Manfaat lingkungan dari pendekatan ini dievaluasi melalui penilaian *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA) fokus pada kategori dampak utama seperti pemanasan global, asidifikasi, eutrofikasi, penipisan sumber daya dan penipisan lapisan ozon. Keutamaan kajian ini menekankan pada potensi untuk berkontribusi pada praktik pengolahan limbah yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Selain itu, dampak kelima tersebut yang sering muncul dan menjadi dampak utama dalam OpenLCA (Pratiwi et al., 2023). Seiring dengan meningkatnya limbah makanan dan produksi samping industri, solusi inovatif dan berkelanjutan seperti biokonversi BSF memberi wawasan yang lebih luas dan harapan ke depan menuju ekonomi sirkular, di mana limbah makanan dapat diubah menjadi barang yang berharga. Selain itu hasil dari penelitian ini dapat memberikan referensi desain dan pengoperasian sistem biokonversi BSF, terutama di daerah yang mayoritas memiliki UMKM industri tahu dan industri makanan serupa.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan di Desa Sugihmanik, di mana lumpur limbah cair tahu dan sisa makanan digunakan sebagai substrat untuk biokonversi larva BSF. Lumpur limbah cair tahu dengan limbah makanan dicampurkan bertujuan untuk mengoptimalkan pertumbuhan BSF dan sistem kinerja lingkungan. Unit fungsi yang digunakan adalah setiap 2,5 kg lumpur dan 1 kg sampah sisa makanan yang diberikan kepada maggot dalam bentuk 1 gram telur hingga fase pre-pupa. Diagram skematik dari sistem produk biokonversi disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Sistem produk biokonversi menggunakan BSF

Ruang lingkup penelitian ini meliputi pengumpulan substrat, persiapan, biokonversi oleh BSF dan proses hilir seperti pengeringan dan pengolahan residu. Proses-proses seperti pembangunan fasilitas, pengangkutan produk dan produksi energi tidak masuk dalam ruang lingkup penelitian ini.

Pengumpulan dan Persiapan Substrat

Substrat utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah lumpur limbah cair tahu, yang merupakan produk sampingan dari industri tahu lokal. Lumpur ini dikumpulkan dari instalasi pengolahan air limbah di Desa Sugihmanik. Limbah makanan yang bersumber dari restoran dekat kandang BSF dicacah dan difermentasi untuk meningkatkan daya cernanya sebelum dicampur dengan lumpur dengan perbandingan 1:2,5 (berat basah). Fermentasi dilakukan menggunakan molase dan mikroorganisme efektif (EM4) selama 7 hari untuk mencapai kondisi optimal pemberian pakan larva BSF. Kadar air, rasio karbon terhadap nitrogen dan sifat kimia lainnya dari substrat diukur mengikuti beberapa metode dan protokol standar.

Konfigurasi Penelitian

Percobaan biokonversi dilakukan dalam 3 wadah yang masing-masing menampung 5 kg substrat siap pakai dan 1 gram larva BSF. Larva berumur 0 hari pada awal percobaan. Rasio pemberian makan substrat-larva dipertahankan pada 1:1, berdasarkan kebutuhan

perkembangan larva. Percobaan dijalankan selama 18 hari, dengan pemantauan harian terhadap parameter lingkungan seperti suhu pada 25°C dan kelembaban relatif 70%. Degradasi substrat, pertumbuhan larva dan pembentukan residu dicatat dan sampel yang mewakili diambil secara berkala untuk analisis lebih lanjut.

Inventarisasi Daur Hidup (*Life Cycle Inventory/LCI*)

Life Cycle Inventory (LCI) disusun berdasarkan data yang dikumpulkan selama percobaan. Inventarisasi tersebut mencakup *input* seperti air, energi (misalnya listrik dan bahan bakar) dan bahan baku (misalnya tetes tebu, bahan fermentasi), serta keluaran seperti pra-pupa, residu dan emisi. Emisi gas, termasuk metana (CH₄), dinitrogen oksida (N₂O), dan amonia (NH₃), tidak diukur pada tahapan utama proses namun hanya menggunakan faktor emisi. Sistem inventarisasi dinormalisasi ke unit fungsional 2,5 kg lumpur tahu.

Penilaian Dampak Siklus Daur Hidup (*Life Cycle Assessment/LCA*)

Penilaian ini menggunakan metode *Life Cycle Assessment* (LCA) dengan OpenLCA untuk mengevaluasi dampak lingkungan dan berfokus pada kategori utama seperti Potensi Pemanasan Global (GWP), Asidifikasi atau Pengasaman, Eutrofikasi, Penipisan Lapisan Ozon dan Penipisan Abiotik. Faktor karakterisasi diperoleh dari *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD). Kesenjangan data diatasi dengan mengadopsi nilai-nilai dari literatur yang ada, seperti Mertenat et al. (2019) dan Guo et al. (2021).

Penilaian Dampak Siklus Daur Hidup

Analisis sensitivitas dan normalisasi dilakukan untuk mengidentifikasi parameter penting yang memengaruhi kinerja sistem produk yang telah dijelaskan sebelumnya. Hanya parameter bahan bakar yang divariasikan sedemikian rupa untuk menilai dampaknya terhadap hasil LCIA.

Rekomendasi Pengurangan Emisi atau Dampak Lingkungan

Setelah mendapatkan hasil dampak lingkungan yang dihasilkan dari sistem biokonversi BSF, selanjutnya memberikan rekomendasi perbaikan atau pengurangan emisi atau dampak lingkungan yang telah dihasilkan yang bertujuan untuk membuat pengoperasian kandang BSF dalam sistem biokonversi BSF dengan memanfaatkan lumpur limbah tahu menjadi lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Inventarisasi Daur Hidup

Data LCI menguraikan masukan, keluaran dan emisi yang terkait dengan sistem biokonversi larva BSF, yang mencakup proses seperti fermentasi lumpur,

penyiapan sisa makanan, biokonversi dan pengeringan. Data ini dirangkum dalam Tabel 1.

Tabel 1. Data *Life Cycle Inventory* (LCI) biokonversi BSF sisa makanan. Beberapa data diambil dari pangkalan data

No	Material	Total	Unit	Per FU
Fermentasi Lumpur				
<i>Input</i>				
1	Lumpur	2,5	kg	2,5
2	Air	12,5	L	12,5
3	Molase	0,375	kg	0,375
4	EM4	0,375	kg	0,375
<i>Output</i>				
1	Lumpur fermentasi	2	kg	2
Pengangkutan Lumpur				
<i>Input</i>				
1	Bensin	0,1875	kg	0,1875
2	Pengangkutan	2*32	t*km	2*32
3	Lumpur fermentasi	2	kg	2
<i>Output</i>				
1	Lumpur yang sudah diangkut	2	kg	2
Pencacahan				
<i>Input</i>				
1	Limbah sisa makanan	1	kg	1
2	Bensin	0,1875	kg	0,1875
<i>Output</i>				
1	Limbah sisa makanan yang sudah dicacah	1	kg	1
Penetasan telur				
<i>Input</i>				
1	Limbah sisa makanan	0,5	kg	0,5
2	Air	10	mL	10
<i>Output</i>				
1	Telur	1	g	1
Substrat yang sudah difermentasi				
<i>Input</i>				
1	Limbah sisa makanan yang telah dicacah	1	kg	1
2	Air	5	L	5
3	Molase	0,375	kg	0,375
4	EM4	0,375	kg	0,375
<i>Output</i>				
1	Limbah sisa makanan yang telah difermentasi	2	kg	2

Biokonversi BSF**Input**

1	Listrik	6,05/3	Wjam/kg	6,05/3
2	Limbah sisa makanan yang telah difermentasi	2	kg	2
3	Telur	1	gr	1
4	Lumpur yang sudah diangkut	2	kg	1

Output

1	Pre-pupa dan residu	2		
---	---------------------	---	--	--

Pengeringan**Input**

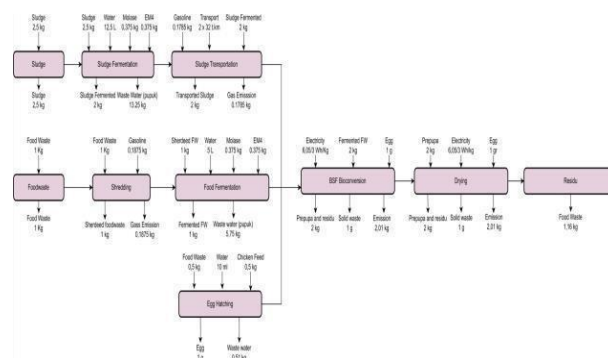
1	Pre-pupa	2	0	0
2	Listrik	6,05/3	Wjam/kg	6,05/3
3	Telur	1	gr	

Output

1	Pre-pupa dan residu	2		
---	---------------------	---	--	--

Fermentasi 2,5 kg lumpur tahu membutuhkan 12,5 L air, 0,375 kg molase dan 0,375 kg mikroorganisme efektif (EM4) yang menghasilkan 2 kg lumpur fermentasi. Pengangkutan melibatkan pemindahan lumpur sejauh 32 t-km dengan menggunakan truk kecil menghabiskan 0,1875 kg bensin. Pencacahan 1 kg sampah makanan membutuhkan 0,1875 kg bensin dan menghasilkan 1 kg cacahan sampah makanan. Fermentasi makanan, yang melibatkan 1 kg sampah makanan yang telah dicacah, 5 L air, 0,375 kg molase dan 0,375 kg EM4, menghasilkan 2 kg sampah makanan yang telah difermentasi. Proses biokonversi menggunakan 2 kg sampah makanan yang difermentasi,

2 kg lumpur yang diangkut dan 1 g telur BSF, serta membutuhkan 6,05 Wh listrik per kg input. Produk utama dari tahap ini adalah pre-pupa dan sisa dari proses pengomposan. Selanjutnya, pada proses pengeringan, dibutuhkan listrik tambahan untuk menghilangkan kadar air yang terkandung dalam tubuh BSF. Gambar 2 merupakan *material balance* dari sistem biokonversi BSF yang terdiri dari data *input* dan *output* yang dimasukkan sehingga hasil akhir dari produk yang dihasilkan seimbang dengan *input*/material yang dimasukkan.



Gambar 2. Material balance biokonversi menggunakan BSF

Dampak Lingkungan

Dampak lingkungan dari masing-masing proses telah disajikan dalam Tabel 2 dan Tabel 3, dengan fokus pada kategori dampak *midpoint* seperti potensi pemanasan global, pengasaman atau asidifikasi dan eutrofikasi. Unit proses yang dimasukkan dalam *input* meliputi unit proses pengeringan, biokonversi BSF, pengangkutan lumpur, fermentasi lumpur, fermentasi limbah sisa makanan, pencacahan dan penetasan telur.

Tabel 2. Kontribusi sistem terhadap beberapa kategori dampak *midpoint*

Unit Proses	Penipisan Abiotik (kg Sb eq)	Asidifikasi (kg SO ₂ eq)	Eutrofikasi (kg PO ₄ eq)	Potensi Pemanasan Global (kg CO ₂ eq)	Penipisan Lapisan Ozon (kg CFC-11 eq)
Pengeringan	3.1632E-10	3.6172E-02	6.1748E-03	7.5859E+00	1.3713E-07
Biokonversi BSF	3.0970E-10	3.6140E-02	6.1727E-03	7.5794E+00	1.3670E-07
Pengangkutan Lumpur	2.9540E-10	3.4368E-02	6.0609E-03	7.2542E+00	1.2321E-07
Fermentasi Lumpur	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Fermentasi Limbah Makanan	1.0470E-11	1.7532E-03	1.1056E-04	3.2141E-01	1.3242E-08
Pencacahan	1.0470E-11	1.7532E-03	1.1056E-04	3.2141E-01	1.3242E-08
Penetasan Telur	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00

Tabel 3. Kontribusi sistem terhadap beberapa kategori dampak *midpoint* setelah normalisasi

Unit Proses	Penipisan Abiotik (kg Sb eq)	Asidifikasi (kg SO ₂ eq)	Eutrofikasi (kg PO ₄ eq)	Potensi Pemanasan Global (kg CO ₂ eq)	Penipisan Lapisan Ozon (kg CFC-11 eq)
Pengeringan	6.6192E-12	3.1901E-05	2.0932E-06	6.5321E-03	4.2490E-10
Biokonversi BSF	1.4309E-11	1.7717E-03	1.1178E-04	3.2520E-01	1.3488E-08
Pengangkutan Lumpur	2.9540E-10	3.4368E-02	6.0609E-03	7.2542E+00	1.2321E-07
Fermentasi Lumpur	-1.0470E-11	-1.7532E-03	-1.1056E-04	-3.2141E-01	-1.3242E-08
Fermentasi Limbah Sisa Makanan	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Pencacahan	1.0470E-11	1.7532E-03	1.1056E-04	3.2141E-01	1.3242E-08
Penetasan Telur	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00	0.0000E+00
Total	3.1632E-10	3.6172E-02	6.1748E-03	7.5859E+00	1.3713E-07

Potensi Pemanasan Global

Potensi pemanasan global dari sistem biokonversi BSF dipengaruhi oleh proses-proses yang membutuhkan energi lebih banyak seperti pengeringan dan biokonversi. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2, proses pengeringan menghasilkan emisi karbon tertinggi dengan nilai 7,586 kg CO₂-eq. Hal tersebut disebabkan oleh listrik yang dibutuhkan untuk mengurangi kadar air pra-pupa dan residu. Proses pengeringan sering kali bergantung pada jaringan listrik di wilayah penelitian dengan berbasis bahan bakar fosil yang secara signifikan mendorong dampak potensi pemanasan global. Beralih ke sumber energi terbarukan atau mengadopsi proses pengeringan yang hemat energi, seperti pengeringan dengan tenaga surya, dapat mengurangi dampak lingkungan yang dihasilkan. Selain untuk mengurangi emisi dapat juga dilakukan proses kompos tanpa penggunaan mesin pengering.

Proses biokonversi itu sendiri memiliki kontribusi potensi pemanasan global yang hampir sama dengan 7,579 kg CO₂-eq, yang berasal dari emisi tidak langsung terkait dengan konsumsi listrik dan degradasi bahan organik. Pelepasan CO₂ dan gas rumah kaca lainnya, seperti metana (CH₄) dan dinitrogen oksida (N₂O), dari aktivitas mikroba di dalam substrat menambah dampak potensi pemanasan global, meskipun emisi ini bersifat intrinsik pada proses biokonversi, proses optimalisasi perubahan substrat-ke-larva dan melakukan pemantauan kualitas lingkungan (misalnya; aerasi dan suhu kandang) juga dapat mengurangi emisi.

Pengangkutan lumpur juga berkontribusi secara signifikan terhadap potensi pemanasan global sebesar 7,254 kg CO₂-eq, yang sebagian besar berasal dari kendaraan yang mengangkut lumpur (menggunakan bensin). Dampak ini menggarisbawahi pentingnya optimalisasi logistik. Misalnya, mengurangi jarak transportasi atau beralih ke bahan bakar alternatif seperti biodiesel dapat menurunkan emisi secara signifikan. Kontribusi emisi yang dapat dihitung dari proses fermentasi makanan dan lumpur (0,321 kg CO₂-eq)

mencerminkan input energi minimal yang diperlukan untuk proses ini.

Asidifikasi

Potensi asidifikasi, yang dinyatakan sebagai kg SO₂-eq, sebagian besar dihasilkan oleh amonia (NH₃) selama proses pengeringan dan biokonversi. Pengeringan menyumbang 0,0362 kg SO₂-eq, lebih tinggi daripada proses biokonversi sebesar 0,0361 kg SO₂-eq. Amonia adalah produk sampingan yang dihasilkan dari degradasi nitrogen yang ada pada bahan organik, kemudian ditambah dengan suhu tinggi selama pengeringan.

Transportasi menyumbang 0,0344 kg SO₂-eq untuk pengasaman karena emisi sulfur dioksida (SO₂) dan nitrogen oksida (NO_x) dari pembakaran bensin. Teknologi transportasi yang lebih bersih dan penggunaan bahan bakar rendah sulfur dapat membantu mengurangi beban lingkungan ini. Sedangkan kontribusi emisi dari fermentasi makanan dan pencacahan makanan sangat kecil. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses-proses ini tidak secara substansial berkontribusi besar terhadap asidifikasi.

Eutrofikasi

Eutrofikasi diukur dalam satuan kg PO₄-eq, emisi dengan kandungan amonia (NH₃) dan nitrat (NO₃⁻) yang dapat mencemari badan air. Pengeringan dan biokonversi merupakan kontributor dominan dengan masing-masing kandungan emisi sebesar 0,00617 kg PO₄-eq. Dampak-dampak ini sebagian besar adalah hilangnya unsur hara dari substrat selama pemrosesan. Transportasi juga berkontribusi terhadap eutrofikasi sebesar 0,00606 kg PO₄-eq, yang mencerminkan emisi nitrogen oksida (NO_x) dari pembakaran bahan bakar. Meskipun kontribusinya lebih kecil daripada pengeringan dan biokonversi, pengurangan kumulatif di seluruh proses dapat secara signifikan menurunkan potensi eutrofikasi.

Penipisan Abiotik

Kategori penipisan abiotik dengan mengidentifikasi penipisan sumber daya tak terbarukan, yang diukur dalam kg Sb-eq. Transportasi, biokonversi dan pengeringan merupakan kontributor utama karena ketergantungannya terhadap bahan bakar dan listrik yang berasal dari sumber daya tak terbarukan seperti batu bara dan gas alam. Pengeringan memberikan kontribusi dampak tertinggi sebesar $3,163 \times 10^{-10}$ kg Sb-eq, diikuti oleh biokonversi ($3,097 \times 10^{-10}$ kg Sb-eq) dan transportasi ($2,954 \times 10^{-10}$ kg Sb-eq). Transisi ke energi terbarukan dan bahan bakar alternatif dapat mengurangi dampak-dampak ini secara signifikan.

Penipisan Lapisan Ozon

Potensi penipisan lapisan ozon (kg CFC⁻¹¹ eq) sangat kecil dari semua proses. Pengeringan memiliki kontribusi tertinggi sebesar $1,371 \times 10^{-7}$ kg CFC⁻¹¹ eq, yang merupakan emisi dari penggunaan listrik jaringan. Meskipun dampak ini bukan merupakan masalah utama dalam sistem, namun dampak tersebut memiliki efek tidak langsung dari konsumsi listrik. Peralihan ke jaringan energi hijau akan mengurangi dampak tersebut.

Hasil Uji Sensitivitas dan Analisis Komparatif Analisis Sensitivitas

Analisis sensitivitas difokuskan pada dampak pengurangan emisi transportasi terhadap potensi pemanasan global secara keseluruhan dari sistem biokonversi BSF. Pengangkutan lumpur fermentasi dan limbah sisa makanan memberikan kontribusi yang signifikan terhadap potensi pemanasan global dengan emisi 7,254 kg CO₂-eq seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Dampak ini muncul dari penggunaan kendaraan berbahan bakar bensin dengan jarak pengangkutan 32 t-km. Emisi dari transportasi dapat diminimalisir dengan mengurangi kebutuhan transportasi (misalnya mengoptimalkan rute transportasi atau meningkatkan pengolahan lokal.

Analisis Komparatif

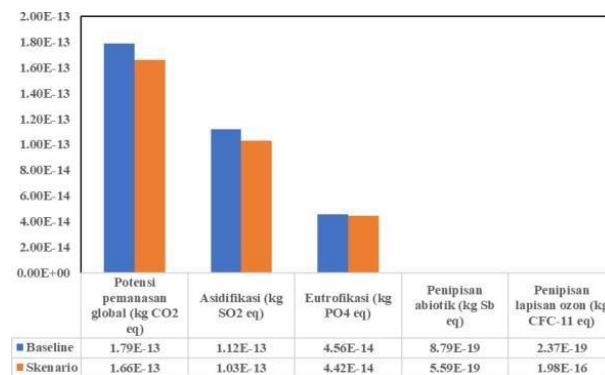
Distribusi dampak lingkungan yang diamati dalam penelitian ini selaras dengan temuan dari Salomone et al. (2017) dan Allegretti et al. (2018), yang menyoroti pengeringan dan biokonversi sebagai tahap proses yang paling berdampak buruk terhadap lingkungan dalam sistem biokonversi BSF. Peran signifikan konsumsi energi di seluruh proses ini menekankan perlunya teknik pemrosesan yang inovatif dan rendah energi.

Hasil uji sensitivitas ini sesuai dengan temuan dalam studi BSF lainnya (misalnya Salomone et al., 2017), yang telah menyimpulkan bahwa proses transportasi sebagai penyumbang emisi yang signifikan dalam sistem pengelolaan sampah yang terdesentralisasi. Analisis sensitivitas lebih lanjut menekankan bahwa

transportasi adalah faktor yang dapat dikendalikan melalui optimalisasi logistik atau mengadopsi teknologi yang lebih bersih. Berdasarkan hasil analisis tersebut, pengurangan emisi transportasi harus diprioritaskan dalam desain sistem BSF, terutama dalam skenario yang melibatkan jarak yang jauh atau pemindahan material yang bersifat kontinu.

Rekomendasi Pengurangan Emisi atau Dampak Lingkungan

Berdasarkan hasil kajian yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa transportasi adalah kontributor terbesar ketiga untuk potensi pemanasan global dalam sistem biokonversi BSF setelah pengeringan dan biokonversi secara keseluruhan. Pengurangan jarak transportasi atau penggunaan bahan bakar alternatif rendah karbon (misalnya biodiesel) dapat memperkuat pengurangan emisi atau dampak lingkungan dalam jangka panjang, yang mengarah pada peningkatan manfaat lingkungan. Sistem yang beroperasi di daerah pedesaan atau daerah terdesentralisasi mampu meminimalkan kebutuhan transportasi dan memproses bahan di tempat atau di fasilitas terdekat juga menjadi solusi praktis mengurangi emisi.



Gambar 3. Hasil analisis sensitivitas yang di normalisasi dari mengganti bahan bakar dengan biodiesel

Gambar 3 mengilustrasikan pengaruh pengurangan konsumsi bensin secara proporsional terhadap potensi pemanasan global. Setiap 10% pengurangan penggunaan bahan bakar transportasi, penurunan emisi mencapai 0,725 kg CO₂-eq terhadap potensi pemanasan global. Pengurangan ini menyoroti pengaruh yang signifikan dari efisiensi transportasi dalam meningkatkan sistem biokonversi BSF.

Penggunaan bahan bakar biosolar ini memberikan dampak positif terhadap lingkungan yaitu menurunnya emisi karbon yang dihasilkan dari proses pengangkutan lumpur (dapat dilihat pada Gambar 3). Manfaat dalam jangka panjang yang dapat dirasakan adalah dapat mengurangi gas rumah kaca hingga 86% dan mengurangi emisi hidrokarbon hingga 67%.

Menerapkan langkah-langkah seperti memaksimalkan muatan untuk mengurangi jumlah perjalanan, beralih ke kendaraan listrik atau bahan bakar alternatif dan membangun lebih banyak pusat pemrosesan lokal. Perubahan-perubahan ini tidak hanya akan mengurangi global tetapi juga berkontribusi pada tujuan kelestarian lingkungan yang berkelanjutan.

Rekomendasi pengurangan emisi yang dapat dilakukan dari keseluruhan proses sistem biokonversi adalah dapat menghilangkan proses pengeringan dan mengganti ke dalam proses kompos. Berdasarkan hasil *input* yang dilakukan setelah menghilangkan proses pengeringan diganti dengan kompos dihasilkan bahwa emisi mengalami penurunan pada dampak potensi pemanasan global.



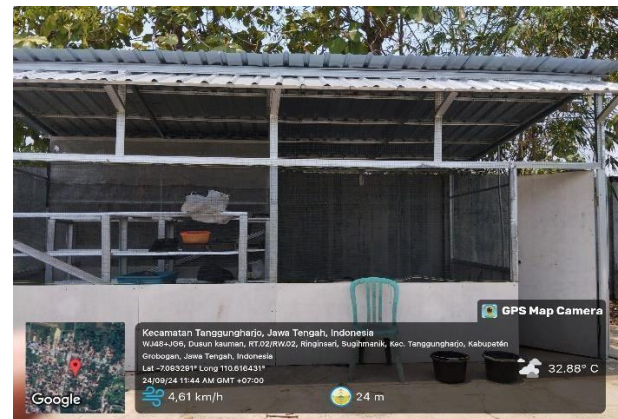
Gambar 4. Hasil analisis sensitifitas yang di normalisasi sistem biokonversi menggunakan pengering dan tanpa pengering (langsung masuk ke proses kompos)

Gambar 4 menunjukkan bahwa adanya penurunan dari dampak pemanasan global yang dihasilkan setelah mesin proses pengeringan dalam sistem biokonversi BSF dihilangkan. Penurunan emisi mencapai 14% dengan nilai emisi sebesar 6,9 kg CO₂. Melakukan proses kompos menjadi salah satu alternatif pengurangan emisi dalam sistem biokonversi BSF, namun tidak berdampak positif dari segi ekonomi, karena tidak dapat menghasilkan BSF kering yang memiliki nilai ekonomis yang lebih tinggi daripada BSF basah (Wardhana et al., 2016). Peran signifikan konsumsi energi di seluruh proses ini menekankan perlunya teknik pemrosesan yang inovatif dan rendah energi. Misalnya pengeringan bertenaga surya atau memanfaatkan limbah panas dari proses industri terdekat dapat secara substansial mengurangi pemanasan global, asidifikasi atau pengasaman dan dampak penipisan abiotik. Dampak eutrofikasi dalam penelitian ini menunjukkan potensi kehilangan nutrisi selama proses biokonversi dan pengeringan. Meningkatkan retensi nutrisi melalui formulasi substrat yang lebih baik dapat mengurangi potensi dampak eutrofikasi. Selain itu, mengelola emisi

gas dari biokonversi melalui sistem tertutup atau *scrubber* kimiawi dapat mengurangi beban lingkungan. Menerapkan teknologi *acid scrubber* atau *biofilter* selama pengeringan dapat menangkap dan menetralkan emisi NH₃, sehingga dapat mengurangi dampak pengasaman yang dihasilkan selama proses tersebut.

Implementasi K3L dalam Sistem Biokonversi BSF

Implementasi Kesehatan dan Keselamatan Lingkungan Kerja (K3L) sangat penting dalam praktik-praktik rekayasa, terutama dalam proyek/pekerjaan yang melibatkan sistem pengolahan limbah yang inovatif seperti biokonversi lumpur limbah cair tahu menggunakan BSF. K3L memastikan perlindungan pekerja, masyarakat dan lingkungan sambil mendorong operasional berkelanjutan dan efisien (Dyah et al., 2023). Seperti yang telah dijelaskan dalam studi ini, bahwa untuk mencapai sistem yang baik membutuhkan perhatian yang cermat terhadap mitigasi bahaya, pemantauan lingkungan dan kepatuhan terhadap peraturan yang telah ditetapkan.



Gambar 5. Ventilasi dan pencahayaan yang cukup di kandang biokonversi BSF

Dalam proses biokonversi BSF, identifikasi bahaya dan manajemen risiko menjadi peranan yang sangat penting. Risiko bahaya utama termasuk emisi gas seperti gas amonia dan metana selama biokonversi BSF memiliki risiko biologis yang terkait dengan paparan patogen dan bahaya fisik dari pengoperasian alat berat. Perlu dilakukan perlakuan-perlakuan khusus untuk mengatasi risiko-risiko tersebut dengan pengendalian teknik seperti sistem ventilasi yang efektif (Gambar 5) dan pencahayaan yang cukup di kandang BSF untuk mengurangi akumulasi gas. Selain itu juga dilakukan pemantauan dan penyesuaian kondisi lingkungan dengan mengatur kelembaban di kandang BSF pada saat BSF dewasa mulai berkembang.



Gambar 6. Penyemprotan air di tempat BSF dewasa berkembang untuk menjaga kelembaban tetap optimal

Pekerja diwajibkan mengenakan alat pelindung diri (APD), termasuk sarung tangan, masker dan pakaian pelindung, untuk melindungi diri dari paparan langsung terhadap bahan berbahaya.



Gambar 7. Pemakaian sarung tangan (APD) pada saat proses fermentasi substrat

Aspek penting lainnya dari implementasi K3L adalah keselamatan kerja. Program pelatihan rutin dilakukan untuk mendidik pekerja tentang teknik penanganan yang aman untuk larva dan substrat BSF, prosedur tanggap darurat dan penggunaan peralatan yang benar. Supervisor memainkan peran penting dalam menerapkan protokol keselamatan dan meningkatkan budaya tanggung jawab atas keselamatan dalam bekerja. Misalnya, pendekatan sistematis terhadap pelaporan dan respon kecelakaan memastikan intervensi yang tepat waktu dan meminimalisir terulangnya insiden.

Pemantauan lingkungan merupakan bagian yang terintegrasi dari K3L dalam proses biokonversi BSF. Jejak lingkungan dari proses biokonversi mencakup emisi dari persiapan substrat, fermentasi dan fase pengeringan yang membutuhkan banyak energi. Data *Life Cycle Assessment* (LCA) dari penelitian ini menyoroti emisi gas rumah kaca yang signifikan selama fase pengeringan, sebagian besar disebabkan oleh

ketergantungan pada listrik konvensional. Beralih ke sumber energi terbarukan seperti sistem pengeringan bertenaga surya dapat secara signifikan mengurangi emisi ini. Selain itu, minimalisasi penggunaan air dan energi di seluruh tahap seperti fermentasi lumpur dan pasca-pemrosesan memastikan operasi yang berkelanjutan.

Praktik pengelolaan limbah dalam sistem biokonversi BSF menggambarkan penerapan hirarki limbah yang efektif; mengurangi, menggunakan kembali dan mendaur ulang (Prasetyo, 2023). Proses biokonversi mengubah lumpur tahu yang kaya nutrisi menjadi produk sampingan yang berharga seperti larva berprotein tinggi untuk pakan ternak dan pupuk organik dari residu (Salomone et al., 2017). Hal ini mengurangi beban tempat pembuangan akhir dan mengubah limbah menjadi peluang ekonomi, sejalan dengan prinsip-prinsip ekonomi sirkular.

Kesiapsiagaan darurat merupakan landasan lain dari penerapan K3L. Rencana tanggap darurat yang disesuaikan dengan risiko tertentu, seperti tumpahan bahan kimia selama fermentasi atau kerusakan peralatan selama pengeringan, memastikan resolusi yang cepat dan efektif. Simulasi latihan darurat menguji kesiapan pekerja dan sistem, menumbuhkan kepercayaan diri dan tanggung jawab dalam dunia kerja.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengidentifikasi kinerja lingkungan dari biokonversi BSF dengan menggunakan lumpur limbah cair tahu sebagai substrat utama, yang diperkaya dengan limbah sisa makanan. Menggunakan *life cycle assessment* (LCA) dan analisis sensitivitas, penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dampak lingkungan yang terkait dengan sistem pengelolaan limbah organik, dengan fokus pada potensinya dalam mengurangi dampak yang ditimbulkan oleh limbah industri tahu dan limbah makanan.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem biokonversi BSF merupakan pendekatan yang efektif untuk valorisasi limbah, mengubah 2,5 kg lumpur tahu dan 1 kg sisa makanan menjadi biomassa yang kaya nutrisi sekaligus mengurangi dampak lingkungan. Proses pengeringan dan biokonversi diidentifikasi sebagai kontributor paling signifikan terhadap potensi pemanasan global, pengasaman dan dampak eutrofikasi karena kebutuhan energi dan emisinya. Analisis sensitivitas menunjukkan bahwa mengoptimalkan logistik transportasi, seperti mengurangi jarak transportasi atau beralih ke bahan bakar alternatif, dapat secara signifikan menurunkan potensi pemanasan global.

Kegiatan proyek ini menekankan solusi berkelanjutan dalam pengelolaan limbah dan menunjukkan biokonversi BSF sebagai strategi yang menjanjikan. Memanfaatkan lumpur limbah cair tahu dan limbah makanan sebagai substrat tidak hanya mendukung

prinsip-prinsip ekonomi sirkular tetapi juga dapat meningkatkan keberlanjutan sistem BSF untuk pengelolaan produk sampingan industri. Penelitian kedepannya harus fokus pada pengoptimalan teknologi pengeringan, meningkatkan retensi nutrisi dan mengeksplorasi model pemrosesan yang terdesentralisasi untuk lebih mengurangi dampak lingkungan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih terutama ditujukan kepada Aprianto Tyas Dwi Nugroho yang membantu peneliti mengoperasikan *software* openLCA.

DAFTAR PUSTAKA

- Allegretti, G., Talamini, E., Schmidt, V., Bogorni, P. C., & Ortega, E. (2018). Insect as feed: An emergy assessment of insect meal as a sustainable protein source for the Brazilian poultry industry. *Journal of Cleaner Production*, 171, 403-412.
- Allesch, A., & Brunner, P. H. (2017). Material flow analysis as a tool to improve waste management systems: the case of Austria. *Environmental science & technology*, 51(1), 540-551.
- Barragan-Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) and its suitability as animal feed—a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105-120.
- Beskin, K. V., Holcomb, C. D., Cammack, J. A., Crippen, T. L., Knap, A. H., Sweet, S. T., & Tomberlin, J. K. (2018). Larval digestion of different manure types by the black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) impacts associated volatile emissions. *Waste Management*, 74, 213-220.
- Guo, H., Jiang, C., Zhang, Z., Lu, W., & Wang, H. (2021). Material flow analysis and life cycle assessment of food waste bioconversion by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens* L.). *Science of The Total Environment*, 750, 141656.
- Jiang, C. L., Jin, W. Z., Tao, X. H., Zhang, Q., Zhu, J., Feng, S. Y., ... & Zhang, Z. J. (2019). Black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) strengthen the metabolic function of food waste biodegradation by gut microbiome. *Microbial biotechnology*, 12(3), 528-543.
- Kibler, K. M., Reinhart, D., Hawkins, C., Motlagh, A. M., & Wright, J. (2018). Food waste and the food-energy-water nexus: A review of food waste management alternatives. *Waste management*, 74, 52-62.
- Lalander, C., Diener, S., Magri, M. E., Zurbrugg, C., Lindström, A., & Vinnerås, B. (2013). Faecal sludge management with the larvae of the black soldier fly (*Hermetia illucens*)—From a hygiene aspect. *Science of the Total Environment*, 458, 312-318.
- Li, Q., Zheng, L., Qiu, N., Cai, H., Tomberlin, J. K., & Yu, Z. (2011). Bioconversion of dairy manure by black soldier fly (Diptera: Stratiomyidae) for biodiesel and sugar production. *Waste management*, 31(6), 1316-1320.
- Lim, J. J., Liew, C. S., Raksasat, R., Merican, Z. M., Kiatkittipong, K., Abdelfattah, E. A., ... & Lim, J. W. (2022). Cellulase pretreated palm decanter cake for feeding of black soldier fly larvae in triggering bioaccumulation of protein and lipid into biodiesel productions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102485.
- Meneguz, M., Schiavone, A., Gai, F., Dama, A., Lussiana, C., Renna, M., & Gasco, L. (2018). Effect of rearing substrate on growth performance, waste reduction efficiency and chemical composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 98(15), 5776-5784.
- Mertenat, A., Diener, S., & Zurbrugg, C. (2019). Black Soldier Fly biowaste treatment—Assessment of global warming potential. *Waste management*, 84, 173-181.
- Prasetyo, B. D. (2023). Manajemen Limbah Makanan Rumah Sakit Melalui Pemanfaatan Biokonversi Black Soldier Fly (BSF). *Repositori ITSK RS dr. Soepraoen Malang*, 1-162.
- Salomone, R., Saija, G., Mondello, G., Giannetto, A., Fasulo, S., & Savastano, D. (2017). Environmental impact of food waste bioconversion by insects: Application of Life Cycle Assessment to process using *Hermetia illucens*. *Journal of Cleaner Production*, 140, 890-905.
- Smetana, S., Palanisamy, M., Mathys, A., & Heinz, V. (2016). Sustainability of insect use for feed and food: Life Cycle Assessment perspective. *Journal of cleaner production*, 137, 741-751.
- Van Huis, A. (2013). Potential of insects as food and feed in assuring food security. *Annual review of entomology*, 58(1), 563-583.
- Win, S. S., Ebner, J. H., Brownell, S. A., Pagano, S. S., Cruz-Diloné, P., & Trabold, T. A. (2018). Anaerobic digestion of black soldier fly larvae (BSFL) biomass as part of an integrated biorefinery. *Renewable energy*, 127, 705-712.
- Wulandari, D. A., Hadiyanto, H., & Isnanto, R. R. (2023). Implementasi Etika Profesi dan K3L Pada Kegiatan Operasi dan Pemeliharaan Bendungan Jatibarang. *Jurnal Profesi Insinyur Indonesia*, 1(6), 207-215.
- Zheng, L., Hou, Y., Li, W., Yang, S., Li, Q., & Yu, Z. (2012). Biodiesel production from rice straw and restaurant waste employing black soldier fly assisted by microbes. *Energy*, 47(1), 225-229.