

Biokonversi Limbah Ikan Afkir Oleh Larva *Black Soldier Fly* Serta Dampaknya Terhadap Kualitas Nutrisi Pakan dan Reduksi Emisi Gas Rumah Kaca

M. Miftahul Huda, Mohamad Mirwan*

Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: mmirwan.tl@upnjatim.ac.id

Diterima: 25 April 2026

Disetujui: 30 April 2026

Abstract

Catfish farming depends on expensive commercial feed, while rejected fish waste remains underutilized. This study aims to analyze the bioconversion of rejected fish waste using BSF larvae to improve feed nutritional quality and reduce greenhouse gas emissions. This experimental research with a life cycle inventory approach was conducted in Surabaya in October 2025. Four bioconversion media variations (M1–M4) were used to rear BSF larvae for 15 days. Three feed formulations (Vpl 1–Vpl 3) with maggot flour proportions of 25%, 50%, and 75% were tested on catfish. Parameters measured included SGR, proximate content, SR, and carbon emission intensity (gate-to-gate). The results showed that M4 (0.56 kg rice bran + 2.24 kg fish waste) produced the highest larval protein (11.31%) and fat (9.87%). Vpl 3 (75% maggot) produced the highest feed protein (17.45%) and fat (14.43%), approaching the SNI standard. Catfish fed Vpl 3 showed 22.7% growth and 100% SR. However, increasing the maggot proportion increased carbon emissions from 1.29 kg CO₂e/kg (Vpl 1) to 1.60 kg CO₂e/kg (Vpl 3), with LPG contributing 97–98%. Bioconversion of rejected fish waste by BSF larvae effectively improves feed nutritional quality, but there is a trade-off with increased carbon emissions.

Keywords: *black soldier fly, bioconversion, greenhouse gas emissions, catfish, rejected fish waste*

Abstrak

Budidaya ikan lele bergantung pada pakan komersial mahal, sementara limbah ikan afkir belum dimanfaatkan optimal. Penelitian ini bertujuan menganalisis biokonversi limbah ikan afkir menggunakan larva BSF terhadap peningkatan kualitas nutrisi pakan dan reduksi emisi Gas Rumah Kaca (GRK). Penelitian eksperimental dengan pendekatan *life cycle inventory* dilaksanakan di Surabaya pada Oktober 2025. Empat variasi media biokonversi (M1–M4) digunakan untuk membiakkan larva BSF selama 15 hari. Tiga variasi pakan (Vpl 1–Vpl 3) dengan proporsi tepung maggot 25%, 50%, dan 75% diuji pada ikan lele. Parameter yang diukur meliputi SGR, proksimat, SR, dan emisi karbon (*gate-to-gate*). Hasil menunjukkan M4 (0,56 kg dedak + 2,24 kg limbah ikan) menghasilkan protein larva tertinggi (11,31%) dan lemak (9,87%). Vpl 3 (75% maggot) menghasilkan protein pakan tertinggi (17,45%) dan lemak (14,43%) mendekati SNI. Ikan lele yang diberi Vpl 3 menunjukkan pertumbuhan 22,7% dan SR 100%. Namun, peningkatan proporsi maggot meningkatkan emisi karbon dari 1,29 kg CO₂e/kg (Vpl 1) menjadi 1,60 kg CO₂e/kg (Vpl 3), dengan kontribusi LPG 97–98%. Biokonversi limbah ikan afkir oleh larva BSF efektif meningkatkan kualitas nutrisi pakan, namun terdapat *trade-off* dengan peningkatan emisi karbon.

Kata Kunci: *black soldier fly, biokonversi, emisi gas rumah kaca, ikan lele, limbah ikan afkir*

1. Pendahuluan

Budidaya ikan lele (*Clarias gariepinus*) memegang peranan penting dalam memenuhi kebutuhan protein hewani masyarakat Indonesia seiring dengan meningkatnya permintaan pasar. Namun, keberlanjutannya menghadapi tantangan utama berupa ketergantungan pada pakan komersial yang harganya terus meningkat dan menggunakan bahan baku yang bersaing dengan kebutuhan manusia, seperti tepung ikan [1]. Kondisi ini mendorong perlunya alternatif pakan yang lebih ekonomis dan berkelanjutan. Di sisi lain, industri perikanan menghasilkan limbah dalam jumlah besar, terutama ikan afkir dan jeroan, yang belum dimanfaatkan secara optimal dan berpotensi mencemari lingkungan [2]. Padahal, limbah tersebut kaya akan protein dan lemak sehingga dapat diolah menjadi sumber daya bernilai guna.

Larva *Hermetia illucens* (Black Soldier Fly) dikenal memiliki kemampuan luar biasa dalam mengonversi berbagai limbah organik menjadi biomassa kaya protein dan lemak [3], sehingga banyak diteliti sebagai pakan alternatif dalam akuakultur [4]. Pemanfaatan limbah perikanan, khususnya ikan afkir,

sebagai substrat pakan larva BSF menawarkan potensi ganda: mengurangi beban pencemaran lingkungan sekaligus meningkatkan kualitas nutrisi larva karena kandungan protein dan asam amino esensial yang tinggi dari ikan afkir [5]. Penelitian awal telah mengeksplorasi penggunaan limbah perikanan untuk larva BSF [6], namun studi komprehensif yang secara spesifik mengevaluasi potensi ikan afkir dalam meningkatkan kualitas nutrisi larva BSF serta aplikasinya sebagai pakan alternatif ikan lele masih terbatas, khususnya di Indonesia.

Selain aspek nutrisi, pengelolaan limbah ikan afkir juga berkaitan erat dengan isu lingkungan. Proses pembusukan limbah ikan yang tidak terkelola dapat menghasilkan emisi gas rumah kaca, seperti metana (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2), di mana metana memiliki potensi pemanasan global jauh lebih tinggi dibandingkan CO_2 [7]. Biokonversi menggunakan larva BSF tidak hanya berpotensi meningkatkan nilai nutrisi pakan, tetapi juga menekan emisi gas rumah kaca, sehingga mendukung budidaya perikanan yang lebih berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis hasil biokonversi serta pengaruh komposisi limbah ikan afkir dalam media pakan larva BSF terhadap kandungan nutrisi larva, mengevaluasi kelayakan dan kualitas pakan yang dihasilkan dari pemanfaatan limbah tersebut, menguji pengaruh pemberian larva BSF terhadap pertumbuhan dan kelangsungan hidup ikan lele, serta mengukur potensi pengurangan emisi dari proses biokonversi limbah ikan afkir dalam rangka mendukung keberlanjutan lingkungan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan pakan ikan lele yang lebih berkelanjutan, ekonomis, dan ramah lingkungan, sekaligus menjadi solusi inovatif dalam pengelolaan limbah perikanan.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif eksperimental-inventaris (*life cycle inventory approach*) yang dilaksanakan di Surabaya, meliputi Area Budi Daya Maggot BSF Simo Mulyo Baru sebagai lokasi pembiakan larva dan Pasar Ikan Pabean sebagai lokasi pengambilan sampel limbah ikan. Penelitian dilaksanakan selama periode bulan Oktober 2025.

Alat dan Bahan

Alat yang digunakan dalam penelitian ini terdiri atas peralatan untuk pembiakan maggot (wadah biopond, gelas ukur, timbangan digital, pH meter, termometer, sarung tangan, sprayer), pembiakan lele (bak tabung 80 L, jaring ikan, timbangan digital, penggaris), serta alat pembentuk pelet. Bahan yang digunakan meliputi larva BSF umur 5 hari (3,2 g atau ± 720 ekor), EM4, dedak, limbah ikan afkir, tepung jagung, tepung ikan, 5 ekor ikan lele dengan bobot awal ± 150 g per ekor, pelet, dan air.

Prosedur Penelitian

A. Pembiakan Larva BSF

Pembiakan larva BSF menggunakan wadah plastik berukuran $30 \times 21 \times 9$ cm. Media biokonversi terdiri dari empat variasi komposisi dedak dan limbah ikan afkir: M1 (2,8 kg dedak), M2 (0,7 kg dedak + 2,1 kg limbah ikan), M3 (0,56 kg dedak + 2,24 kg limbah ikan), dan M4 (0,93 kg dedak + 1,87 kg limbah ikan). Limbah ikan dipotong kecil untuk mempercepat dekomposisi. Larutan EM4 dengan perbandingan 1:10 (EM4:air) disemprotkan ke media dan diaduk hingga lembab. Sebanyak 3,2 g larva BSF umur 5 hari (instar 2–3) ditekankan ke setiap wadah. Pakan diberikan setiap 3 hari sekali, dan media diaduk setiap 2 hari untuk menjaga aerasi. Parameter suhu, pH, berat segar, panjang tubuh larva diukur pada hari ke-0, 5, 10, dan 15. Pada akhir siklus, larva dipanen, dicuci, dikeringkan menggunakan oven pada suhu $60\text{--}70^\circ\text{C}$, kemudian digiling menjadi tepung BSF.

B. Pembuatan Pelet Ikan untuk Pakan Lele

Pembuatan pelet pakan ikan lele diawali dengan pengeringan maggot menggunakan oven pada suhu $60\text{--}70^\circ\text{C}$, kemudian digiling menjadi tepung BSF. Bahan baku yang terdiri dari tepung BSF, tepung jagung, dan tepung ikan ditimbang sesuai formulasi variabel (Vpl 1, Vpl 2, Vpl 3), lalu dicampur menggunakan mixer hingga homogen. Air hangat ditambahkan sedikit demi sedikit sambil diaduk hingga adonan lembab dan dapat dikepal. Adonan dimasukkan ke dalam mesin ekstruder/pencetak pelet untuk membentuk butiran. Pelet yang terbentuk dikeringkan dalam oven pada suhu $150\text{--}180^\circ\text{C}$ hingga kadar air rendah dan stabil. Selanjutnya, pelet diuji sifat fisiknya (daya apung,

stabilitas dalam air, tekstur, warna) serta kandungan nutrisinya melalui uji proksimat (protein, lemak, serat, abu, karbohidrat).

C. Pengujian Pertumbuhan Ikan Lele

Pemeliharaan ikan lele dilakukan selama 10 hari dalam wadah bak plastik bervolume 80 L, masing-masing berisi 5 ekor ikan lele dengan bobot awal rata-rata 150 g/ekor. Pakan (Vpl 3) diberikan sebanyak 4 kali sehari dengan dosis 5 g/ekor/kali (total 100 g/hari/bak) hingga ikan kenyang (Tangguda, 2022). Parameter yang diukur meliputi berat badan, panjang tubuh, tingkat kelangsungan hidup (Survival Rate/SR), dan rasio konversi pakan (Feed Conversion Ratio/FCR) pada awal dan akhir pemeliharaan. Setiap perlakuan menggunakan tiga kali ulangan.

D. Pengujian Emisi Karbon (*Gate-to-gate*)

Analisis jejak karbon produksi pakan dilakukan menggunakan pendekatan *gate-to-gate*, menghitung emisi dari konsumsi LPG (pengeringan) dan listrik (proses pembuatan pelet). Data konsumsi energi dikonversi menjadi CO₂e menggunakan faktor emisi berdasarkan standar IPCC. Total emisi per batch dibagi dengan berat pakan yang dihasilkan untuk memperoleh intensitas emisi per kg pelet, kemudian dibandingkan dengan literatur dan standar keberlanjutan industri pakan.

Variabel Penelitian

Variabel penelitian yang digunakan ialah sebagai berikut:

A. Variabel Bebas

1. Variabel bebas ditentukan berdasarkan modifikasi perbandingan campuran pakan untuk larva (EM4 : Dedak : Limbah Ikan)

- M 1 = 2,8 kg Dedak
- M 2 = 0,93 kg Dedak : 1,87 kg Limbah Ikan
- M 3 = 0,70 kg Dedak : 2,1 kg Limbah Ikan
- M 4 = 0,56 kg Dedak : 2,24 kg Limbah Ikan
- Keterangan : EM4 sebanyak 10ml di setiap pencampuran

2. Variabel bebas ditentukan berdasarkan modifikasi campuran pakan ikan (Larva BSF : Tepung Jagung : Tepung Ikan)

- Vpl 1= 0,25kg Larva BSF : 0,25kg Tepung Jagung : 0,50kg Tepung Ikan
- Vpl 2= 0,50kg Larva BSF : 0,25kg Tepung Jagung : 0,25kg Tepung Ikan
- Vpl 3= 0,75kg Larva BSF : 0,25kg Tepung Jagung : 0,15kg Tepung Ikan

B. Variabel Terikat

1. Lama Pemiakan Larva (15 Hari)
2. Kondisi wadah kembang biak larva (suhu & pH)

Perhitungan Jejak Karbon (*Gate-to-Gate*)

Perhitungan jejak karbon menggunakan pendekatan *gate-to-gate* dengan unit fungsional 1 kg pelet jadi, meliputi proses pengeringan, penggilingan, pencampuran, pencetakan, dan pengeringan akhir. Emisi dihitung dari konsumsi LPG (faktor emisi 2,98 kg CO₂e/kg) dan listrik (faktor emisi 0,7848 kg CO₂e/kWh) berdasarkan GHG Protocol dan ISO 14067. Analisis sensitivitas dilakukan untuk menguji variasi parameter terhadap hasil emisi.

Analisis Data

Data yang dianalisis meliputi efektivitas reduksi limbah, pertumbuhan larva (berat dan biomassa), kandungan protein larva dan pakan, serta hasil pakan. Laju pertumbuhan spesifik (SGR) larva dihitung menggunakan rumus $SGR = ((W_t - W_o)/t) \times 100\%$, dengan W_t = berat akhir, W_o = berat awal, t = waktu pemeliharaan (hari). Pertumbuhan biomassa ditimbang setiap 3 hari sekali. Kandungan protein dan lemak pada larva serta pakan diuji menggunakan metode Mikro Kjeldahl di Laboratorium Penelitian dan Konsultasi Industri Surabaya, Jawa Timur. Data disajikan dalam bentuk tabel, grafik, dan gambar.

3. Hasil dan Pembahasan

Penelitian dilaksanakan selama bulan Oktober 2025 pada beberapa lokasi terintegrasi sesuai tahapan kegiatan. Kondisi lingkungan selama budidaya larva BSF menunjukkan suhu ruang 34°C dan suhu internal media 32–34°C, sedangkan pH media berada pada kisaran 4,6–6,2. Suhu dan pH tersebut masih dalam rentang optimal untuk mendukung laju metabolisme, aktivitas enzimatik, serta keseimbangan mikroflora

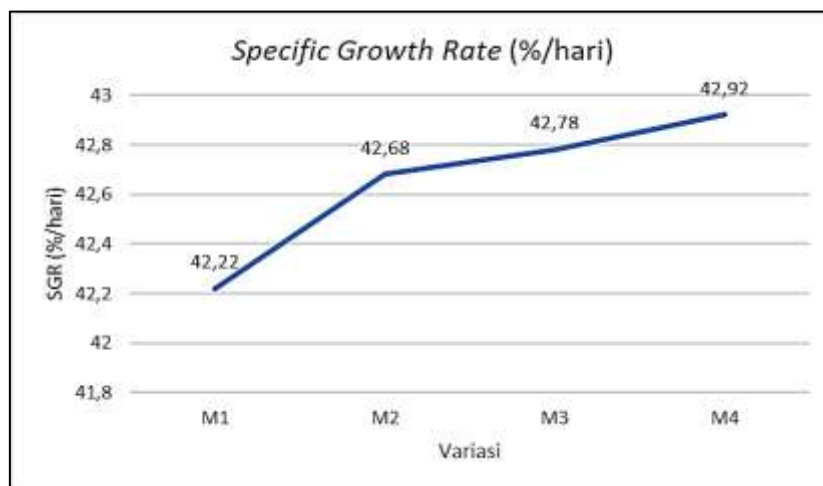
(EM4) dalam proses biokonversi limbah ikan afkir [8]. Fluktuasi yang terjadi tidak melampaui batas toleransi biologis larva, sehingga kondisi lingkungan dinyatakan stabil selama proses budidaya.

Hasil Pembiakan Larva Black Soldier Fly (BSF)

Pertumbuhan larva BSF diukur berdasarkan berat segar (*wet weight*) dan panjang tubuh pada hari ke-0, ke-5, ke-10 dan ke-15. Parameter yang diamati meliputi laju pertumbuhan spesifik (*Specific Growth Rate / SGR*) untuk menilai efisiensi metabolisme larva terhadap variasi komposisi limbah ikan afkir [9], serta tingkat kelangsungan hidup (*survival rate*) yang dihitung dari perbandingan jumlah larva hidup di awal dan akhir pemeliharaan.

Tabel 1. Rata-rata Berat dan Panjang Larva BSF Setiap Perlakuan

Hari ke-	Parameter	M1	M2	M3	M4
0	Berat (g/larva)	0,0032	0,0032	0,0032	0,0032
	Panjang (mm)	1,50	1,50	1,50	1,50
5	Berat (g/larva)	0,0264	0,0270	0,0272	0,0274
	Panjang (mm)	3,03	3,06	3,06	3,07
10	Berat (g/larva)	0,2181	0,2284	0,2308	0,2339
	Panjang (mm)	6,13	6,22	6,24	6,27
15	Berat (g/larva)	1,800	1,930	1,960	2,000
	Panjang (mm)	12,38	12,67	12,74	12,82



Gambar 1. Grafik *Specific Growth Rate* (SGR)

SGR tertinggi diperoleh pada perlakuan M4 (0,56 kg dedak + 2,24 kg limbah ikan). Semakin tinggi komposisi limbah ikan dalam media (M3 dan M4), semakin cepat pertumbuhan larva, terutama pada hari ke-10 hingga ke-15, yang konsisten dengan pola pertumbuhan eksponensial larva BSF. Hal ini disebabkan kandungan protein dan lemak yang mudah diserap dari limbah ikan menyediakan energi cukup untuk pembentukan jaringan tubuh [3]. Sebaliknya, perlakuan dengan dedak lebih tinggi (M1) menunjukkan pertumbuhan paling lambat akibat keterbatasan protein. Dengan demikian, peningkatan proporsi limbah ikan berbanding lurus dengan peningkatan berat dan panjang larva, menandakan kondisi biokonversi yang optimal tanpa stres lingkungan.

Tabel 2. Hasil Analisis Proksimat Larva BSF Kering setiap Perlakuan

Parameter (%)	M1	M2	M3	M4
Protein Kasar	10.58	10.63	11.05	11.31
Lemak Kasar	9.60	9.62	9.78	9.87

Hasil analisis proksimat menunjukkan bahwa peningkatan proporsi limbah ikan dalam media biokonversi berpengaruh positif terhadap kandungan protein dan lemak larva BSF. Kadar protein tertinggi (11,31%) dan lemak tertinggi (9,87%) diperoleh pada perlakuan M4 (proporsi limbah ikan terbesar), sedangkan terendah (protein 10,58%; lemak 9,60%) pada M1 (dedak murni). Meskipun peningkatan

numeriknya tidak besar, perubahan ini memiliki makna biologis penting karena protein dan lemak berperan dalam struktur tubuh, metabolisme pertumbuhan, serta mobilisasi energi larva [10]. Peningkatan nutrisi ini sejalan dengan pola pertumbuhan larva, di mana M3 dan M4 menunjukkan SGR yang lebih tinggi. Dengan demikian, penambahan limbah ikan afkir dalam media biokonversi merupakan strategi efektif untuk meningkatkan kualitas nutrisi larva BSF secara keseluruhan.

Hasil Pembuatan dan Pengujian Pakan Ikan Lele

Formulasi pakan ikan lele dalam penelitian ini disusun menggunakan larva *Black Soldier Fly* (BSF) sebagai sumber protein utama (35–45% protein, 16–35% lemak) yang dikombinasikan dengan tepung jagung (sebagai sumber karbohidrat dan binder alami) serta tepung ikan (untuk meningkatkan palatabilitas) [11]. Tiga variasi formulasi (Vpl 1, Vpl 2, Vpl 3) dirancang untuk melihat pengaruh peningkatan proporsi larva BSF terhadap kualitas pakan [8]. Proses pembuatan meliputi pengeringan larva BSF segar pada suhu ±60–70°C hingga kadar air <12%, pencampuran semua bahan kering dalam mixer selama 10–15 menit, penambahan air hangat hingga tekstur plastis, pencetakan menggunakan mesin ekstruder, serta pengeringan akhir pelet pada suhu 150–180°C hingga kadar air ≤12%. Formulasi ini menghasilkan pelet dengan kualitas fisik yang baik (seragam, stabil) serta memenuhi kriteria pakan ikan lele, di mana peningkatan proporsi larva BSF berpengaruh terhadap warna, tekstur, konsistensi, serta kualitas nutrisi pelet [12]. Hasil fisik pakan ikan lele tercantum pada tabel di bawah ini.

Tabel 3. Hasil Fisik Pakan Lele

No.	Aspek/Bahan	Variasi/Komposisi	Karakteristik Fisik Pakan	Keterangan Tambahan
1.	Warna Pelet	BSF rendah	Cokelat muda	Dipengaruhi rendahnya pigmen dan lemak BSF
		BSF sedang	Cokelat keemasan	Warna seimbang antar bahan
		BSF tinggi	Cokelat gelap	Dominasi pigmen dan lemak larva BSF
		Tepung jagung	Lebih cerah	Warna tepung jagung lebih terang
2.	Tekstur Pelet	BSF tinggi	Lebih kenyal, minim retakan	Lemak BSF meningkatkan plastisitas adonan
		Sebelum pengeringan	Kurang berbentuk, Mudah rapuh	Kandungan air dari bahan pakan
		Setelah pengeringan	Keras, ringan, tidak terlalu rapuh	Meningkatkan Daya apung

Tabel 4. Hasil Uji Kandungan Nutrisi Pakan Lele Berdasarkan Variasi Dedak-Limbah Ikan

Parameter	SNI 9043.4:2022	Vpl 1	Vpl 2	Vpl 3
Protein Kasar (%)	≥ 28%	11,62	12,06	17,45
Lemak Kasar (%)	4–15%	8,94	9,06	14,43
Karbohidrat		36,25	39,5	30,39

Berdasarkan **Tabel 4**, variasi komposisi dedak dan limbah ikan berpengaruh nyata terhadap kandungan nutrisi pakan. Perlakuan Vpl 3 menghasilkan protein kasar tertinggi (17,93%) dibandingkan Vpl 1 (11,62%) dan Vpl 2 (12,06%), meskipun masih di bawah SNI 9043.4:2022 (≥28%) [13]. Kandungan lemak kasar tertinggi juga pada Vpl 3 (14,43%), masih dalam rentang SNI (4–15%). Sebaliknya, karbohidrat menurun seiring peningkatan proporsi limbah ikan, dari 36,25% (Vpl 1) dan 39,5% (Vpl 2) menjadi 30,39% (Vpl 3), akibat berkurangnya dedak sebagai sumber karbohidrat [13]. Penurunan ini menunjukkan pergeseran komposisi menuju pakan dengan protein dan lemak lebih tinggi, yang lebih sesuai dengan kebutuhan ikan lele sebagai omnivora cenderung karnivora [3]. Dengan demikian, Vpl 3 dinilai sebagai perlakuan terbaik karena menghasilkan komposisi nutrisi paling seimbang dan mendekati standar pakan ikan lele.

Hasil Uji Pertumbuhan dan Kelangsungan Hidup Ikan Lele

Pertumbuhan ikan lele diukur berdasarkan berat dan panjang rata-rata pada awal dan akhir pemeliharaan. Ikan diberi pakan terbaik hasil seleksi, yaitu formulasi Vpl 3, untuk mengevaluasi efektivitas pakan berbasis limbah ikan afkir yang telah dibiokonversi oleh larva BSF [14]. Pemeliharaan dilakukan dalam satu wadah berisi 5 ekor ikan lele dengan bobot awal rata-rata ±150 g per ekor. Tidak ada perbandingan antar perlakuan pakan, sehingga pengamatan difokuskan pada respons pertumbuhan ikan terhadap pakan Vpl 3.

Tabel 5. Laju Pertumbuhan Berat dan Panjang Ikan Lele pada setiap Variasi Pakan (V3)

Variasi Pakan	Komposisi Pakan	Berat Awal (g/ekor)	Berat Akhir (g/ekor)	Pertambahan (g)	% Pertumbuhan
Vpl 3 (terbaik)	0,75 kg BSF + 0,25 kg Jagung + 0,15 kg Tepung Ikan	150g/ekor Total 750gr/5 ekor	Total 920g/ 5ekor	Total 170 g/ 5 ekor	22,7%

Tingkat kelangsungan hidup (*Survival Rate*) ikan lele dihitung berdasarkan perbandingan jumlah ikan yang hidup pada akhir pemeliharaan dengan jumlah awal, sebagai indikator kemampuan pakan dalam mendukung kesehatan, mengurangi stres, serta memenuhi kebutuhan nutrisi ikan.

Tabel 6. Tingkat Kelangsungan Hidup (*Survival Rate*) Ikan Lele pada Variasi Pakan Terbaik

Variasi Pakan	Komposisi Pakan	Jumlah Awal (ekor)	Jumlah Akhir (ekor)	SR (%)
Vpl 3 (terbaik)	0,75 kg Larva BSF + 0,25 kg Tepung Jagung + 0,15 kg Tepung Ikan	5	5	100

Berdasarkan **Tabel 6**, tingkat kelangsungan hidup (SR) ikan lele yang diberi pakan Vpl 3 mencapai 100%, yang berarti seluruh ikan uji bertahan hingga akhir pemeliharaan. Hasil ini mengindikasikan bahwa formulasi pakan berbasis larva BSF (0,75 kg larva BSF, 0,25 kg tepung jagung, 0,15 kg tepung ikan) mampu menyediakan nutrisi yang memadai dan mendukung kondisi fisiologis ikan secara optimal tanpa menimbulkan efek negatif seperti gangguan pencernaan atau stres metabolik [14]. Kandungan protein dan lemak yang tinggi dari larva BSF berperan penting dalam memenuhi kebutuhan nutrisi serta meningkatkan daya tahan tubuh ikan [15]. Dengan demikian, pakan Vpl 3 direkomendasikan sebagai formulasi terbaik yang mampu menjaga kelangsungan hidup ikan lele secara maksimal.

Hasil Analisis Emisi Karbon (Jejak Karbon Gate-to-Gate)

Inventarisasi konsumsi energi dan bahan bakar dianalisis menggunakan pendekatan *gate-to-gate* untuk seluruh proses produksi pelet berbasis larva BSF, meliputi pengeringan, penggilingan, pencampuran, pencetakan, dan pengeringan akhir pelet. Data diperoleh dari pengukuran lapangan [3]. Proses pengeringan merupakan tahap paling intensif energi, menggunakan oven berbahan bakar LPG pada suhu $\pm 60^{\circ}\text{C}$ untuk pengeringan maggot segar dan $\pm 50^{\circ}\text{C}$ untuk pengeringan akhir pelet.

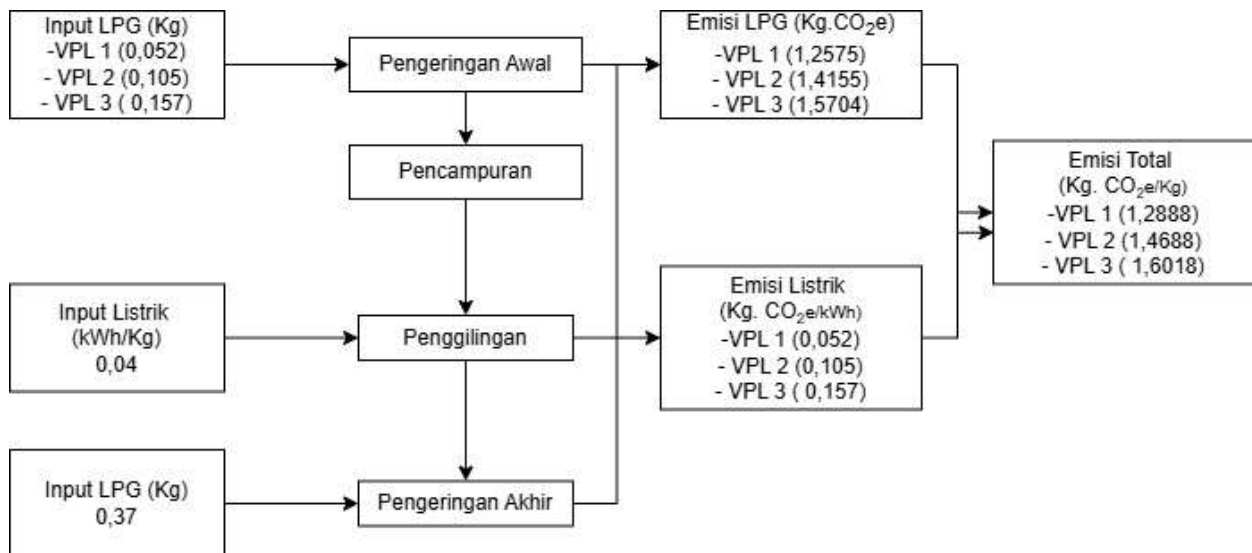
Tabel 7. Konsumsi LPG pada Proses Pengeringan

Tahap Proses	Massa Bahan	Durasi Pengeringan	Konsumsi LPG (kg/batch)	LPG per kg Produk (kg/kg)
Pengeringan Maggot	1 kg maggot basah	25 menit	0,21 kg	0,21 kg LPG/kg maggot kering
Pengeringan Pelet	1 kg pelet basah (lembab)	45menit	0,37 kg	0,37 kg LPG/kg pelet jadi

Perhitungan intensitas emisi karbon untuk produksi 1 kg pelet pakan berbasis larva BSF menggunakan asumsi komposisi tengah 0,50 kg tepung maggot per kg pelet. Konsumsi LPG meliputi pengeringan maggot (0,21 kg LPG/kg maggot) dan pengeringan pelet (0,37 kg LPG/kg pelet), sehingga total LPG yang dibutuhkan adalah 0,47 kg LPG/kg pelet (dari $0,50 \times 0,21 + 0,37$). Konsumsi listrik hanya berasal dari mixer berdaya 250 Watt yang beroperasi 10 menit per batch (0,04 kWh/kg pelet). Dengan faktor emisi LPG sebesar 2,98 kg CO₂e/kg LPG dan faktor emisi listrik 0,7848 kg CO₂e/kWh, total emisi dihitung sebagai: emisi LPG = total LPG \times 2,98, emisi listrik = 0,04 \times 0,7848 = 0,0314 kg CO₂e, sehingga total emisi = emisi LPG + emisi listrik. Intensitas Emisi per 1 kg pelet disetiap variasi terlihat pada tabel 8.

Tabel 8. Intensitas Emisi per 1 kg Pelet (per variasi)

Variasi	Maggot (kg/kg pelet)	LPG mag (kg)	LPGtotal (kg)	Emisi LPG (kg CO ₂ e)	Emisi Listrik (kg CO ₂ e/kWh)	Emisi Total (kg CO ₂ e/kg pelet)	Kontribusi LPG (%)	Kontribusi Listrik (%)
Vpl 1 (0,25: 0,25: 0,50)	0,25	0,052	0,422	1,2575	0,03139	1,2888	97,6%	2,4%
Vpl 2 (0,50: 0,25: 0,25)	0,50	0,105	0,475	1,4155	0,03139	1,4468	97,8%	2,2%
Vpl 3 (0,75: 0,25: 0,15)	0,75	0,157	0,527	1,5704	0,03139	1,6018	98%	2%



Gambar 2. Neraca Massa Emisi Jejak Karbon

Hasil analisis menunjukkan bahwa proporsi tepung maggot dalam pakan berpengaruh signifikan terhadap intensitas emisi karbon. Semakin tinggi komposisi maggot, semakin besar emisi yang dihasilkan. Vpl 1 (25% maggot) menghasilkan emisi terendah (1,2888 kg CO₂e/kg pelet), diikuti Vpl 2 (50% maggot) sebesar 1,4468 kg CO₂e/kg, dan Vpl 3 (75% maggot) tertinggi sebesar 1,6018 kg CO₂e/kg [3]. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kebutuhan energi termal (LPG) untuk pengeringan maggot seiring dengan bertambahnya proporsi maggot. Sumber emisi terbesar berasal dari LPG (97–98%), sedangkan listrik untuk mixer hanya berkontribusi sekitar 2%. Oleh karena itu, upaya mitigasi yang paling efektif difokuskan pada pengurangan penggunaan LPG, peningkatan efisiensi termal oven, atau penggunaan sumber panas alternatif yang lebih rendah emisi [10].

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian, disimpulkan bahwa komposisi limbah ikan afkir dalam media pakan larva BSF berpengaruh terhadap peningkatan kandungan nutrisi larva, dengan protein 11,31% dan lemak 9,87%, sehingga biomassa larva berpotensi sebagai bahan baku pakan alternatif. Pakan berbasis tepung maggot hasil biokonversi menghasilkan protein 17,45% dan lemak 14,43% sebagai perlakuan terbaik yang paling mendekati SNI 9043.4:2022 ($\geq 28\%$). Pemberian pakan tersebut memberikan pengaruh positif terhadap pertumbuhan ikan lele, ditunjukkan dengan laju pertumbuhan spesifik (SGR) sekitar 2–3% per hari dan tingkat kelangsungan hidup (Survival Rate) mencapai 100%. Dari aspek lingkungan, biokonversi limbah ikan afkir oleh larva BSF berpotensi mengurangi akumulasi limbah organik, namun peningkatan proporsi tepung maggot dalam pakan berimplikasi pada kenaikan konsumsi energi (LPG) yang menyebabkan peningkatan emisi karbon, dengan jejak karbon terendah 1,28 kg CO₂e/kg pakan (Vpl 1) dan tertinggi 1,60 kg CO₂e/kg pakan (Vpl 3), menandakan adanya *trade-off* antara kualitas nutrisi pakan dan dampak lingkungan.

5. Referensi

- [1] M. Tacon, A. G. J., & Metian, "Feed matters: Satisfying the feed demand of aquaculture," *Rev. Fish. Sci. Aquac.*, vol. 23, no. 1, pp. 1–10, 2015, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1080/23308249.2014.987209>.
- [2] M. A. H. Islam, M. M., Hossain, M. A., Sarker, M. N. I., & Prodhan, "Environmental pollution from aquaculture and its impact on human health: A review.," *Environ. Ecol. Res.*, vol. 8, no. 3, pp. 79–86, 2020.
- [3] S. D. Sprangers, T., Ottoboni, M., Klootwijk, C., Ovyne, A., Deboosere, S., Meulenaer, B. De, Michiels, J., Eeckhout, M., Clercq, P. De, & Smet, "Nutritional composition of Black Soldier Fly," *J. Sci. Food Agric.*, vol. 97, pp. 2594–2600, 2017.
- [4] R. G. Makkar, H. P. S., Tran, G., Doreau, M., Navidshad, A., & Prieto, "Insects as feed for livestock and poultry: sustainable and nutritious Animal Feed Science and Technology," vol. 197, pp. 1–17, 2014.

- [5] J. Bogard, J. R., Thilsted, S. H., Marks, G. C., Wahab, M. A., Hossain, M. A. R., Jakobsen, J., & Stangoulis, “Nutrient composition of important fish species in Bangladesh and potential contribution to recommended nutrient intakes,” *J. Food Compos. Anal.*, vol. 42, pp. 120–133, 2015.
- [6] K. Diener, S., Zurbrugg, C., & Tockner, “Conversion of organic material by Black Soldier Fly larvae: Establishing optimal feeding rates,” *Waste Manag. Res.*, vol. 27, no. 6, pp. 603–610, 2019.
- [7] T. Sriwahyuni, S., Oktarina, H., & Chamzurni, “Pengaruh Bioaktivator dalam Pupuk Organik Cair Kulit Pisang untuk Mengendalikan Penyakit Layu Fusarium pada Tanaman Tomat (*Solanum lycopersicum*),” *J. Ilm. Mhs. Pertan.*, vol. 8, no. 1, pp. 438–452, 2023.
- [8] B. Oteri, M., Di Rosa, A. R., Lo Presti, V., Giarratana, F., Toscano, G., & Chiofalo, “Black Soldier Fly larvae meal as alternative to fish meal for aquaculture feed,” *Sustain.*, vol. 13, no. 10, pp. 1–17, 2021, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/su13105447>.
- [9] J. K. Li, Q., Li, L., Zheng, L., Cai, H., Garza, E., Yu, Z., Zhou, S., Xiao, X., & Tomberlin, “Bioconversion of dairy manure by Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) larvae,” *Bioresour. Technol.*, vol. 102, no. 2, pp. 2163–2169, 2021.
- [10] F. R. Permana, A. D., Susanto, A., & Giffari, “Kinerja Pertumbuhan Larva Lalat Tentara Hitam *Hermetia illucens* Linnaeus (Diptera: Stratiomyidae) pada Substrat Kulit Ari Kedelai dan Kulit Pisang,” *Agrikultura*, vol. 33, no. 1, p. 13, 2022.
- [11] C. A. Achmad, “Pengaruh Penambahan Bioaktivator Terhadap Peningkatan Unsur Hara Pupuk Kandang Dan Aplikasinya Pada Pertumbuhan Tanaman Salak Pascaerupsi Merapi,” *Life Sci.*, vol. 10, no. 1, pp. 76–82, 2021.
- [12] A. H. Wardhana, “Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as an Alternative Protein Source for Animal Feed,” *Indones. Bull. Anim. Vet. Sci.*, vol. 26, no. 2, p. 069, 2019.
- [13] K. Dabbour, M., Abdel-Razek, M. A. S., El-Sayed, M. M., & Abo-El-Sooud, “Effect of different organic wastes on the growth performance and biochemical composition of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) larvae,” *J. Plant Prod.*, vol. 10, no. 11, pp. 1079–1087, 2019.
- [14] A. Darsiani, D., Andriani, R., Juharni, J., & Jufri, “Teknologi dan manajemen pemberian pakan,” no. january, 2025.
- [15] I. Ahmed, I., & Ahmad, “Effect of dietary protein levels on growth performance, hematological profile and biochemical composition of fingerlings rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss* reared in Indian himalayan region,” *Aquac. Reports*, vol. 16, p. 100268, 2020.