

Efektivitas Biokonversi Limbah TanKos Kelapa Sawit Menggunakan Larva *Hermetia illucens*: Analisis Indeks Pengurangan Limbah dan Kualitas Pupuk Organik

Effectiveness of Bioconversion of Palm Oil Empty Bunch Waste Using *Hermetia illucens* Larvae: Analysis of Waste Reduction Index and Organic Fertilizer Quality

LIDRI ANI FIRDA^{1)*}, IDHA SANTIKA²⁾, RORO KESUMANINGWATI²⁾, RABIATUL JANNAH¹⁾

¹⁾Program Studi Magister Pertanian Tropika Basah, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman. Jl. Pasir Balengkong, Kampus Gunung Kelua, Samarinda 75119, Kalimantan Timur, Indonesia. Tel: +62-821-48436646, Fax: +62-821-48436646,

*email: lidrianifl@gmail.com

²⁾Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman, Samarinda, Indonesia. Jl. Pasir Balengkong, Kampus Gunung Kelua, Samarinda 75119, Kalimantan Timur, Indonesia. Tel: +62-541-749161

Manuscript received: 04 August Revision accepted: 22 October 2025

ABSTRACT

Oil palm empty bunch waste is the most produced waste in the industrial process. Bioconversion using insect larvae, especially BSF larvae, is one alternative in processing organic waste efficiently. This study aims to identify the effectiveness of BSF larvae in the bioconversion of TKKS waste based on the Waste Reduction Index (WRI), determine the nutrient content of bioconverted solid organic fertilizer, and its suitability with the quality requirements of solid organic fertilizer in SNI 7763: 2018. This research took place at the Soil Science Laboratory, OECF Building, Faculty of Agriculture, Mulawarman University, Samarinda. This study used a factorial complete randomized design with 2 factors and 4 replications. The data obtained were analyzed using variance analysis (ANOVA), if there was a significant difference, the Least Significant Difference further test was conducted at the 5% level. The results showed that the treatment unit with fermented feed origin had better effectiveness when viewed from the EMI value. The highest WRI value was 3.61%, while the lowest WRI value was 1.80%. The results of the analysis of nutrient content of bioconversion results show that the highest average value of acidity (9.83), total Nitrogen (3.46%), total potassium (8.06%), C-organic (24.98%), and C/N ratio (10.74) of each treatment has met the quality standards of solid organic fertilizer in Indonesian National Standard 7763: 2018. The water content in the results of the T1U3 and T2U3 treatments was higher than the quality standard of solid organic fertilizer, which is 8-25%. The total phosphor content in the research results has not reached the minimum limit of 2%.

Keywords: Bioconversion, BSF larvae, Fermentation, Oil Palm Empty Bunch Waste, Solid organic fertilizer.

ABSTRAK

Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) merupakan limbah yang paling banyak dihasilkan dalam proses industri. Biokonversi menggunakan larva serangga, khususnya larva *Black Soldier Fly* (BSF) menjadi salah satu alternatif dalam pengolahan limbah organik dengan efisien. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi efektivitas larva BSF dalam biokonversi limbah TKKS berdasarkan Indeks Pengurangan Limbah (IPL), mengetahui kandungan hara pupuk organik padat hasil biokonversi, dan kesesuaiannya dengan syarat baku mutu pupuk organik padat dalam SNI 7763:2018. Penelitian ini bertempat di Laboratorium Ilmu Tanah Gedung OECF, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman, Samarinda. Penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap faktorial dengan 2 faktor dan 4 ulangan. Data yang diperoleh dianalisis menggunakan sidik ragam (ANOVA), jika terdapat perbedaan yang nyata maka dilakukan uji lanjut Beda Nyata Terkecil pada taraf 5%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa unit perlakuan dengan asal pakan fermentasi memiliki efektivitas lebih baik jika dilihat dari nilai IPL. Nilai IPL tertinggi 3,61%, sedangkan nilai IPL terendah 1,80%. Hasil analisis kandungan hara hasil biokonversi menunjukkan bahwa nilai rata-rata tertinggi pada kadar keasaman (pH) (9,83), N total (3,46%), K total (8,06%), C-organik (24,98%), dan C/N rasio (10,74) setiap perlakuan telah memenuhi standar baku mutu pupuk organik padat dalam Standar Nasional Indonesia 7763:2018. Kandungan kadar air pada hasil penelitian perlakuan T1U3 dan T2U3 lebih tinggi standar baku mutu pupuk organik padat yaitu 8 – 25%. Kandungan P total pada hasil penelitian belum mencapai batas minimal 2%.

Kata Kunci: Biokonversi, Fermentasi, Larva BSF, Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit, Pupuk organik padat

PENDAHULUAN

Kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.) merupakan komoditas utama penghasil minyak nabati dunia, dengan Indonesia sebagai produsen minyak sawit terbesar di dunia yang menyumbang sekitar 58–59% produksi minyak sawit global dan menghasilkan 42–46 juta ton minyak sawit per tahun selama periode 2019–2022 (USDA, 2023). Luas perkebunan kelapa sawit nasional pada tahun 2022 mencapai 16.833.985 ha, yang sejalan dengan tingginya produksi minyak sawit mentah sebesar 45,12 juta ton pada tahun 2021. Pulau Kalimantan menjadi wilayah dengan konsentrasi perkebunan kelapa sawit terbesar kedua setelah Sumatera, dengan luas mencapai 5,15 juta ha (Badan Pusat Statistik, 2021). Industri kelapa sawit merupakan salah satu sektor strategis di Indonesia karena berperan besar dalam perekonomian nasional melalui produksi minyak sawit mentah (CPO) dan produk turunannya, selain menghasilkan produk utama, industri ini juga menghasilkan limbah dalam jumlah besar, salah satunya adalah tandan kosong kelapa sawit (TKKS). TKKS merupakan residu padat yang tersisa setelah proses pengolahan tandan buah segar (TBS) di pabrik kelapa sawit. Limbah ini memiliki potensi cukup besar karena masih mengandung lignoselulosa dan bahan organik yang dapat dimanfaatkan lebih lanjut, misalnya sebagai bahan kompos, bioenergi, maupun substrat dalam proses biokonversi oleh mikroorganisme atau larva.

Pengelolaan TKKS di perkebunan umumnya masih dilakukan secara konvensional dengan cara ditumpuk di sekitar tanaman tanpa perlakuan khusus. Kondisi ini menyebabkan proses dekomposisi berlangsung lambat karena TKKS memiliki kandungan lignoselulosa yang tinggi, terutama selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang sulit terurai secara alami (Martana, 2024). Kandungan lignin yang relatif tinggi juga menjadi faktor utama rendahnya laju penguraian bahan organik tersebut sehingga diperlukan perlakuan tambahan untuk mempercepat proses biodegradasi (Dimawarnita *et al.*, 2025). Praktik penumpukan tanpa pengolahan ini tidak hanya memperlambat penguraian, tetapi juga mengurangi potensi pemanfaatan TKKS sebagai sumber bahan organik bernilai tambah. Biokonversi merupakan metode pengolahan limbah organik menjadi produk bernilai guna seperti pupuk atau biomassa melalui aktivitas organisme hidup, termasuk bakteri, jamur, serangga, maupun enzim. Proses ini bekerja dengan memanfaatkan kemampuan biologis organisme dalam menguraikan senyawa organik kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana dan stabil sehingga lebih mudah dimanfaatkan kembali dalam sistem pertanian.

Teknologi biokonversi dengan memanfaatkan larva *Black Soldier Fly* (BSF) (*Hermetia illucens*) mendapatkan perhatian luas, terutama di negara berkembang, sebagai solusi pengelolaan limbah organik yang ramah lingkungan sekaligus berpotensi memberikan nilai ekonomi tambahan. Larva BSF mampu mengonsumsi berbagai jenis limbah organik dalam waktu relatif singkat dan mengonversinya menjadi biomassa kaya protein serta frass yang dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik. Pemanfaatan larva BSF (*Hermetia illucens*) dalam biokonversi limbah organik umumnya masih difokuskan pada limbah yang mudah terdegradasi seperti sisa makanan dan limbah rumah tangga (Monita, 2017; Hakim, 2017). Penelitian lain juga telah melaporkan pemanfaatan limbah berbasis kelapa sawit seperti *Palm Kernel Meal* (PKM) dan *Oil Palm Empty Fruit Bunch* (OPEFB) sebagai substrat larva BSF, yang menunjukkan kemampuan larva dalam mengonversi biomassa lignoselulosa meskipun dengan efisiensi yang bervariasi (Lubis *et al.*, 2023). Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan larva BSF dalam mengonversi TKKS yang telah diberi perlakuan fermentasi awal (*pre-treatment*) menjadi biomassa larva dan pupuk organik melalui proses biokonversi.

Penelitian mengenai penerapan fermentasi awal (*pre-treatment*) yang dikombinasikan dengan biokonversi menggunakan larva BSF masih belum banyak dilaporkan. Proses fermentasi awal diduga mampu menguraikan senyawa lignoselulosa kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga lebih mudah dimanfaatkan oleh larva BSF dalam proses degradasi TKKS. Penelitian pada TKKS masih relatif terbatas karena TKKS memiliki karakteristik kaya lignoselulosa yang menyebabkan bahan tersebut lebih sulit terurai secara biologis serta dapat menurunkan efisiensi konsumsi oleh larva BSF. Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini memiliki kebaruan dalam mengevaluasi kemampuan larva BSF dalam mengonversi TKKS sebagai substrat lignoselulosa kompleks yang belum banyak dikaji. Selain itu, penelitian ini juga menyoroti potensi pemanfaatan TKKS sebagai sumber biomassa larva serta pupuk organik bernilai ekonomi melalui proses biokonversi.

BAHAN DAN METODE

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari hingga Agustus 2024, bertempat di Laboratorium Tanah Gedung OECF, Fakultas Pertanian, Universitas Mulawarman, Samarinda.

Bahan dan Alat

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari limbah tandan kosong kelapa sawit sebagai bahan baku pupuk organik sebanyak 60 kg, 600gram larva BSF (berusia 10 hari setelah menetas). Larva BSF yang digunakan pada umur 10 hari dipilih karena pada fase ini larva berada pada tahap instar aktif dengan tingkat konsumsi pakan dan aktivitas metabolisme yang tinggi sehingga lebih efektif dalam proses biokonversi limbah organik (Dortmans *et al.*, 2017) dan 180 ml EM4. Sedangkan bahan kimia yang digunakan dalam proses analisis kimia pupuk organik padat yaitu Aquades, Asam sulfat (H_2SO_4), Kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$), HCl 0,2 N, Indikator Conway, Asam Borat (H_3BO_3), Selenium, Natrium Hidroksida (NaOH) 40%, larutan asam campur, pereaksi berwarna P, dan larutan Lanthan 2,5%.

Alat yang digunakan pada penelitian ini adalah *Spectrophotometer (Spectrumlab 22PC)*, mesin kocok, *Atomic Absorption Spectrophotometer (Aurora Instrument 1200)*, timbangan analitik, Erlenmeyer, tabung reaksi, oven, desikator, cawan, pH meter, pipet, botol kocok, labu ukur, tabung destilasi, buret, wadah plastik sebagai media pemeliharaan larva, parang, dan wadah fermentasi TKKS.

Rancangan Penelitian

Penelitian ini menggunakan rancangan acak lengkap (RAL) faktorial dengan 2 faktor dan 4 ulangan. Faktor pertama yang dirancang dalam penelitian ini adalah asal pakan BSF (T) yang terdiri dari dua taraf, yaitu pakan asal fermentasi dan pakan tanpa fermentasi. Faktor kedua yang dirancang dalam penelitian ini adalah jumlah pakan yang terdiri dari tiga taraf, yaitu 100 g, 200 g, dan 300 g. Setiap kombinasi perlakuan dilakukan dengan 4 ulangan sehingga akan diperoleh 24 unit perlakuan.

Prosedur Penelitian

1. Kondisi Lingkungan pemeliharaan BSF

Pemeliharaan larva Black Soldier Fly (BSF) dilakukan pada kondisi lingkungan yang terkontrol untuk mendukung aktivitas makan dan proses biokonversi yang optimal. Suhu pemeliharaan dijaga pada kisaran $\pm 27-32^\circ C$, yang merupakan rentang optimal bagi pertumbuhan dan aktivitas larva BSF (Shumo *et al.*, 2019). Kelembaban udara dipertahankan pada kisaran $\pm 60-80\%$ guna menjaga kestabilan kondisi media pakan serta mencegah kekeringan yang dapat menghambat proses dekomposisi. Kondisi pencahayaan diatur dalam keadaan gelap hingga redup, mengingat larva BSF cenderung menghindari cahaya langsung sehingga lingkungan yang minim cahaya dapat meningkatkan aktivitas makan larva (Cammack & Tomberlin, 2024). Sirkulasi udara pada wadah pemeliharaan diatur dengan ventilasi terbatas namun tetap memadai untuk menghindari kondisi anaerob total yang dapat mengganggu proses dekomposisi dan menurunkan performa larva (Boakye Yiadom *et al.*, 2022).

2. Penyiapan Pakan Larva BSF

Langkah awal dalam proses penyiapan pakan bagi larva BSF adalah pencacahan terhadap TKKS. Proses pencacahan dilakukan dengan tujuan untuk memudahkan larva BSF dalam mendekomposisi limbah. Pencacahan dilakukan secara manual hingga limbah TKKS berukuran ± 5 cm (Desta *et al.*, 2023). Dalam penelitian ini pakan larva terdiri dari pakan yang melalui pre-treatment berupa fermentasi dan pakan tanpa proses fermentasi. Pakan larva yang melalui proses pre-treatment akan di fermentasi dengan menggunakan larutan EM4 sebanyak 180 ml. Kemudian di fermentasi selama dua minggu sebelum dijadikan pakan larva.

Tabel 1. Hasil analisis awal pada TKKS

Kadar air (%)	pH	C- Organik	N Total (%)	C/N Rasio	P2O5 Total (%)	K ₂ O Total (%)
62,84	8,47	27,98	0,53	52,59	0,11	0,44

Sumber: Hasil Analisis Laboratorium Tanah Fakultas Pertanian Unmul, 2024.

3. Penyiapan Larva BSF

Larva BSF yang digunakan dalam penelitian ini dibudidayakan secara mandiri, yang dimulai dari tahap penetasan telur hingga pembesaran larva dengan media pakan berupa kombinasi dedak dan limbah kulit nanas

yang dihaluskan. Pemberian pakan tersebut diberikan hingga larva BSF berusia 10 hari (Dortmans *et al.*, 2017).

4. Pemeliharaan Larva

Pemeliharaan larva dilakukan menggunakan wadah reaktor dengan total 12 unit yang disusun sesuai kombinasi perlakuan pada rancangan penelitian. Proses pemeliharaan larva Black Soldier Fly (BSF) berlangsung selama 21 hari dengan pemberian pakan sesuai taraf perlakuan, yaitu 100 g, 200 g, dan 300 g yang diberikan satu kali setiap minggu. Setelah periode pemeliharaan selesai, dilakukan pemisahan antara larva BSF dan residu media untuk memperoleh fraksi pupuk organik padat hasil dekomposisi TKKS. Residu yang tidak termakan kemudian ditimbang untuk mengetahui sisa pakan.

Indeks pengurangan limbah dalam penelitian ini dihitung menggunakan pendekatan Waste Reduction Index (WRI) yang mengacu pada Surendra, *et al.* (2020), yang menggambarkan efisiensi pengurangan limbah organik oleh larva BSF selama periode waktu tertentu. Perhitungan dilakukan berdasarkan selisih antara jumlah pakan awal dan sisa pakan akhir, yang kemudian dinormalisasi terhadap jumlah pakan awal dan waktu pemeliharaan. Secara matematis, nilai WRI dihitung menggunakan persamaan $WRI = (W - R) / (W \times t)$, dengan W sebagai jumlah pakan awal, R sebagai sisa pakan, dan t sebagai lama waktu pemeliharaan (hari). Nilai ini merepresentasikan laju pengurangan limbah organik oleh aktivitas larva BSF selama proses biokonversi.

Penggunaan pendekatan WRI ini juga memungkinkan interpretasi yang lebih tepat terhadap efektivitas degradasi TKKS, karena tidak hanya menunjukkan besarnya reduksi limbah, tetapi juga mempertimbangkan faktor waktu sebagai komponen laju proses dekomposisi. Dengan demikian, parameter ini lebih sesuai digunakan dalam studi biokonversi berbasis larva BSF dibandingkan indeks sederhana yang tidak mempertimbangkan aspek temporal.

Analisis Kimia

Analisis kimia yang dilakukan dalam penelitian ini terdiri dari parameter derajat keasaman (pH), nitrogen total (N total), kalium total (K total), fosfor total (P total), karbon organik (C-organik), serta rasio C/N dengan mengacu pada *Petunjuk Teknis Analisis Kimia Tanah 2023*. Analisis pH dilakukan menggunakan metode potensiometri dengan pH meter. Nitrogen total dianalisis menggunakan metode Kjeldahl, sedangkan fosfor total dan kalium total dianalisis menggunakan metode destruksi basah yang kemudian diukur dengan spektrofotometri dan flame photometer. C-organik dianalisis menggunakan metode Walkley and Black, sedangkan rasio C/N dihitung berdasarkan perbandingan hasil analisis karbon organik dan nitrogen total.

Metode Analisis Data

Data yang diperoleh dianalisis menggunakan sidik ragam (ANOVA), jika terdapat perbedaan yang nyata maka dilakukan uji lanjut BNT pada taraf 5%.

HASIL DAN DISKUSI

Hasil

Indeks Pengurangan Limbah (IPL)

Hasil perhitungan IPL dalam proses biokonversi limbah TKKS ditampilkan pada Tabel 2. dengan proses pemeliharaan larva BSF selama 21 hari. Dari data tersebut dapat diketahui bahwa nilai rata-rata IPL tertinggi terdapat pada unit perlakuan T1U1 yaitu 3,37%. Nilai rata-rata IPL terendah terdapat pada unit perlakuan yaitu 1,84%.

Tabel 2. Hasil analisis IPL

Perlakuan	Ulangan (R)				Total	Rata-rata
	1	2	3	4		
T1U1	3,32	3,40	3,42	3,34	13,48	3,37a
T1U2	3,41	3,40	3,32	3,33	13,45	3,36a
T1U3	3,11	3,37	3,24	3,39	13,11	3,28a
T2U1	2,18	1,95	1,89	1,87	7,88	1,97b
T2U2	2,22	2,12	1,75	1,70	7,78	1,95b
T2U3	2,01	1,63	1,83	1,89	7,36	1,84c
KK = 5,70	BNT = 0,11					

Keterangan: Angka-angka pada kolom dan baris yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata menurut uji BNT pada taraf 5%. Hasil persentase limbah TKKS diperoleh dengan menggunakan rumus, $IPL = D/(t) \times 100\%$.

Kadar Keasaman (pH)

Nilai pH pupuk organik padat setelah 21 hari biokonversi berkisar antara 8,81–9,89 (Tabel 3). Uji BNT 5% menunjukkan tidak ada interaksi nyata pada kelompok perlakuan T1 (T1U1, T1U2, T1U3), namun kelompok tersebut berbeda nyata dengan kelompok T2 (T2U1, T2U2, T2U3). Pada kelompok T2, perlakuan T2U1 tidak berbeda nyata dengan T2U2, tetapi berbeda nyata dengan T2U3. Nilai pH tertinggi ditemukan pada T1U3 (9,87), sedangkan nilai terendah pada T2U1 (8,93) yang secara statistik identik dengan T2U2 (9,83), namun berbeda nyata dengan T2U3 (9,87).

Tabel 3. Hasil analisis pH

Perlakuan	Ulangan				Total	Rata-rata
	1	2	3	4		
T1U1	8,89	9,04	9,02	8,76	35,71	8,93a
T1U2	9,20	8,89	8,81	8,99	35,89	8,97a
T1U3	9,30	9,67	9,75	9,79	38,51	9,63c
T2U1	9,36	9,20	9,29	9,21	37,06	9,27b
T2U2	9,67	9,92	9,83	9,89	39,31	9,83c
T2U3	9,88	9,89	9,84	9,88	39,49	9,87c
KK = 4,12 %		BNT = 0,29				

Keterangan: Angka-angka pada kolom dan baris yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata menurut uji BNT pada taraf 5%.

Kadar Air

Hasil analisis menunjukkan interaksi sangat nyata antara asal pakan (T) dan jumlah pakan (U) terhadap kadar air. Berdasarkan uji BNT 5% (Tabel 4), terdapat perbedaan nyata pada kombinasi perlakuan T1U1, T1U2, dan T1U3. Pada kelompok pakan tanpa fermentasi (T2), perlakuan T2U1 berbeda nyata dengan T2U3, namun tidak berbeda nyata dengan T2U2. Kadar air tertinggi ditemukan pada T1U3 (34,40%), sedangkan kadar air terendah terdapat pada T2U1 (18,10%).

Tabel 4. Hasil analisis kadar air

Perlakuan	Ulangan				Total	Rata-rata
	1	2	3	4		
T1U1	18,95	19,78	20,94	18,40	78,07	19,52c
T1U2	24,37	24,24	27,71	20,46	98,78	24,70b
T1U3	39,50	29,07	37,07	31,95	137,59	34,40a
T2U1	17,74	18,32	17,85	18,47	72,38	18,10c
T2U2	22,43	22,63	21,10	21,92	88,08	22,02bc
T2U3	35,32	32,05	30,54	27,31	125,22	31,31a
KK = 10,98%		BNT = 4,08				

Keterangan: Angka-angka pada kolom dan baris yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata menurut uji BNT pada taraf 5%.

Nitrogen Total

Analisis ragam menunjukkan bahwa asal pakan (T) berpengaruh sangat nyata dan jumlah pakan (U) berpengaruh nyata terhadap kandungan nitrogen total, namun interaksi keduanya (TU) tidak menunjukkan pengaruh nyata. Berdasarkan uji BNT 5% (Tabel 5), perlakuan T1U1 berbeda nyata terhadap seluruh perlakuan lainnya. Perlakuan T1U2 tidak berbeda nyata dengan T2U2 dan T2U3, sementara T1U3 identik dengan T2U1. Kandungan nitrogen total tertinggi ditemukan pada perlakuan T1U1 (3,46%), sedangkan nilai terendah pada T2U2 (2,20%).

Tabel 5. Hasil analisis nitrogen total

Perlakuan	Ulangan				Total	Rata-rata
	1	2	3	4		
T1U1	2,78	4,34	3,22	3,50	13,84	3,46a
T1U2	2,46	2,55	2,21	2,60	9,82	2,46d
T1U3	1,96	2,44	3,50	3,00	10,90	2,73b
T2U1	2,41	2,30	3,11	2,38	10,20	2,55bc
T2U2	2,10	1,93	2,32	2,44	8,79	2,20d
T2U3	2,69	1,93	1,93	2,49	9,04	2,26d
KK = 17,53%		BNT = 0,34				

Keterangan: Angka-angka pada kolom dan baris yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata menurut uji BNT pada taraf 5%.

Kalium Total

Hasil analisis ragam (ANOVA) menunjukkan bahwa asal pakan (T), jumlah pakan (U), dan interaksi keduanya (TU) berpengaruh sangat nyata ($P < 0,01$) terhadap kandungan kalium total. Hasil uji BNT 5% (Tabel 6) mengonfirmasi bahwa seluruh kombinasi perlakuan (T1U1, T1U2, T1U3, T2U1, T2U2, dan T2U3) saling berbeda nyata satu sama lain. Kandungan kalium total tertinggi diperoleh pada perlakuan T1U1 (8,06%), sementara nilai terendah terdapat pada T2U3 (3,96%).

Tabel 6. Hasil analisis K total

Perlakuan	Ulangan				Total	Rata-rata
	1	2	3	4		
T1U1	4,98	5,00	5,32	4,84	20,14	8,06a
T1U2	4,40	3,79	4,12	4,48	16,79	6,72b
T1U3	3,15	3,62	3,48	3,47	13,72	5,49c
T2U1	3,03	3,21	3,17	2,97	12,38	4,95d
T2U2	2,86	2,77	2,70	2,74	11,07	4,43e
T2U3	2,38	2,30	2,78	2,43	9,89	3,96f

KK = 5,72% BNT = 0,30

Keterangan: Angka-angka pada kolom dan baris yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata menurut uji BNT pada taraf 5%.

Fosfor Total

Hasil analisis ragam (ANOVA) terhadap kandungan fosfor total menunjukkan bahwa faktor jumlah pakan (U) berpengaruh sangat nyata, sedangkan asal pakan (T) dan interaksinya (TU) memberikan pengaruh tidak nyata. Berdasarkan uji BNT 5% (Tabel 7), perlakuan T1U1 dan T2U1 berbeda nyata terhadap seluruh perlakuan lainnya. Perlakuan T1U2 secara statistik identik dengan T2U2, demikian pula dengan perlakuan T1U3 terhadap T2U3. Kandungan fosfor total tertinggi diperoleh pada perlakuan T1U2 (1,45%), sementara nilai terendah ditemukan pada T2U3 (0,53%).

Tabel 7. Hasil analisis P total

Perlakuan	Ulangan				Total	Rata-rata
	1	2	3	4		
T1U1	1,41	1,46	1,49	1,45	5,81	1,45a
T1U2	1,01	0,73	0,92	0,96	3,62	0,91c
T1U3	0,57	0,63	0,55	0,69	2,44	0,61e
T2U1	1,13	1,16	1,30	1,37	4,96	1,24b
T2U2	0,72	1,03	0,76	1,06	3,57	0,89cd
T2U3	0,57	0,55	0,56	0,58	2,26	0,57e

KK = 10,99% BNT = 0,15

Keterangan: Angka-angka pada kolom dan baris yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata menurut uji BNT pada taraf 5%.

C-Organik

Analisis ragam menunjukkan asal pakan (T) berpengaruh nyata dan jumlah pakan (U) berpengaruh sangat nyata terhadap kandungan C-organik, namun interaksi keduanya (TU) tidak menunjukkan pengaruh nyata. Berdasarkan uji BNT 5% (Tabel 8), perlakuan T2U1 (24,98%) menghasilkan kandungan C-organik tertinggi dan secara statistik identik dengan T1U1 dan T2U2. Sebaliknya, T1U3 menunjukkan nilai terendah dan berbeda nyata dengan seluruh perlakuan lainnya. Perlakuan T1U2 memiliki kesamaan respon dengan T2U2 dan T2U3, namun berbeda nyata terhadap T1U1, T1U3, dan T2U1

Tabel 8. Hasil analisis C-organik

Perlakuan	Ulangan				Total	Rata-rata
	1	2	3	4		
T1U1	24,87	24,31	25,13	24,56	98,87	24,72 ab
T1U2	22,92	20,47	21,22	23,93	88,54	22,14 c
T1U3	20,34	22,61	18,58	19,33	80,86	20,22 d
T2U1	24,37	26,13	24,43	25,00	99,93	24,98 a
T2U2	24,37	23,12	22,29	22,61	92,39	23,10 bc
T2U3	22,92	21,79	22,48	22,80	89,99	22,50 c

KK = 4,85% BNT = 1,65

Keterangan: Angka-angka pada kolom dan baris yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata menurut uji BNT pada taraf 5%.

C/N Rasio

Analisis ragam menunjukkan bahwa faktor asal pakan (T) berpengaruh sangat nyata terhadap rasio C/N pupuk organik padat hasil biokonversi, sedangkan faktor jumlah pakan (U) serta interaksi antara asal pakan dan jumlah pakan (T×U) tidak menunjukkan pengaruh nyata. Berdasarkan uji BNT taraf 5% (Tabel 9), perlakuan T2U2 menghasilkan rasio C/N tertinggi sebesar 10,74 dan berbeda nyata dengan seluruh perlakuan lainnya, kecuali T2U3. Sebaliknya, perlakuan T1U3 menunjukkan rasio C/N terendah sebesar 7,86 dan berbeda nyata dengan seluruh perlakuan, namun tidak berbeda nyata dengan T1U1. Perlakuan T1U2 memiliki respon yang sama dengan T2U1 dan T2U3, tetapi berbeda nyata terhadap T1U1, T1U3, dan T2U2.

Tabel 9. Hasil perhitungan C/N rasio

Perlakuan	Ulangan				Total	Rata-rata
	1	2	3	4		
T1U1	8,96	5,60	7,80	7,02	29,38	7,35d
T1U2	9,30	8,03	9,59	9,19	36,11	9,03bc
T1U3	10,38	9,28	5,31	6,45	31,42	7,86d
T2U1	10,12	11,38	7,86	10,50	39,86	9,97bc
T2U2	11,60	12,48	9,59	9,28	42,95	10,74a
T2U3	8,53	11,28	11,64	9,15	40,60	10,15ab
KK = 17,29%	BNT = 1,18					

Keterangan: Angka-angka pada kolom dan baris yang diikuti huruf kecil yang sama tidak berbeda nyata menurut uji BNT pada taraf 5%.

Diskusi

Indeks Pengurangan Limbah TKKS Oleh Larva BSF

Berdasarkan hasil penelitian, diketahui bahwa unit perlakuan dengan faktor asal pakan fermentasi memiliki nilai Indeks Pengurangan Limbah (IPL) yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan tanpa fermentasi. Hal ini diduga berkaitan dengan tekstur pakan hasil fermentasi yang lebih lunak sehingga lebih mudah dicerna oleh larva *Black Soldier Fly* (BSF). Temuan ini sejalan dengan penelitian Rukmini (2021) yang menyatakan bahwa nilai IPL dipengaruhi oleh jenis pakan yang diberikan, di mana pakan dengan tekstur lebih lunak cenderung lebih mudah dikonsumsi dan didekomposisi oleh larva BSF. Larva BSF diketahui mampu mendekomposisi sampah organik hingga 70%, dan tingkat penguraian tersebut akan semakin tinggi apabila bahan pakan memiliki tekstur yang lebih halus. Sebaliknya, pakan yang berasal dari bahan organik dengan kandungan lignoselulosa tinggi, seperti TKKS, dapat memberikan tekanan tersendiri terhadap sistem pencernaan larva BSF, sehingga memengaruhi kemampuan larva dalam mendekomposisi bahan organik (Nefi, 2020). Kondisi tersebut menjelaskan bahwa nilai Indeks Pengurangan Limbah (IPL) pada perlakuan tanpa fermentasi lebih rendah dibandingkan dengan perlakuan yang menggunakan pakan terfermentasi.

Larva BSF (*Hermetia illucens*) memiliki kemampuan tinggi dalam menguraikan berbagai jenis bahan organik karena didukung oleh sistem enzim pencernaan seperti amilase, lipase, dan protease yang berperan dalam proses degradasi senyawa kompleks. Keberadaan enzim-enzim tersebut memungkinkan larva BSF memanfaatkan berbagai substrat organik sehingga dikategorikan sebagai serangga polifag. Kemampuan tersebut juga didukung oleh adaptasi fisiologis larva yang mampu mengonversi limbah organik menjadi biomassa secara efisien (Barragan *et al.*, 2017; Gold *et al.*, 2018). Saluran pencernaan larva BSF juga ditemukan beberapa jenis bakteri, antara lain *Micrococcus* sp., *Streptococcus* sp., *Bacillus* sp., dan *Aerobacter aerogens*, yang berperan dalam proses dekomposisi bahan organik (Widyastuti, 2021).

Kombinasi antara aktivitas enzim dan mikroorganisme dalam sistem pencernaan larva BSF memungkinkan larva mendegradasi berbagai substrat organik, termasuk tandan TKKS. Rendahnya nilai Indeks Pengurangan Limbah (IPL) pada beberapa perlakuan tidak hanya dipengaruhi oleh tekstur pakan, tetapi juga oleh faktor lingkungan seperti kadar kelembaban media, kepadatan larva, serta kualitas substrat. Kelembaban media merupakan faktor penting yang memengaruhi pertumbuhan dan performa larva BSF, di mana kondisi yang tidak optimal dapat menurunkan efisiensi konsumsi dan laju konversi biomassa (Bekker *et al.*, 2021; Ribeiro *et al.*, 2022). Kondisi lingkungan seperti aerasi, suhu, dan kualitas pakan juga berpengaruh signifikan terhadap pertumbuhan serta efisiensi biokonversi larva BSF (Abduh *et al.*, 2022). Jumlah larva BSF yang digunakan diduga belum sebanding dengan jumlah pakan yang diberikan, sehingga kemampuan larva dalam mereduksi limbah menjadi terbatas.

Faktor stres juga diduga berpengaruh terhadap performa larva BSF dalam penelitian ini, yang dapat memengaruhi efektivitas konsumsi pakan, laju pertumbuhan, serta efisiensi konversi substrat organik menjadi biomassa larva (Ribeiro *et al.*, 2022). Larva yang digunakan dalam penelitian ini diduga mengalami stres akibat

proses pengiriman jarak jauh yang dapat memengaruhi aktivitas makan dan pertumbuhannya. Kondisi stres pada larva BSF diketahui dapat menurunkan performa pertumbuhan serta efisiensi konversi substrat akibat terganggunya aktivitas fisiologis dan konsumsi pakan (Barragan *et al.*, 2017). Hal ini ditunjukkan oleh pertumbuhan ukuran larva yang tidak meningkat secara signifikan selama penelitian, yang diduga berkontribusi terhadap rendahnya nilai Indeks Pengurangan Limbah (IPL). Persentase reduksi limbah yang diperoleh menunjukkan bahwa larva BSF memiliki efektivitas yang lebih baik dalam mengolah limbah TKKS, terutama pada perlakuan pakan hasil fermentasi. Nilai IPL yang dihasilkan pada penelitian ini lebih tinggi dibandingkan dengan nilai IPL yang dilaporkan pada penelitian sebelumnya, yaitu sebesar 0,58% pada pakan jerami padi. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan larva BSF dalam biokonversi limbah TKKS tidak hanya mampu mempercepat proses dekomposisi, tetapi juga berpotensi meningkatkan efektivitas pengurangan limbah serta menghasilkan pupuk organik dengan kualitas yang cukup baik (Manurung, 2016). Berdasarkan nilai IPL yang diperoleh, dapat disimpulkan bahwa larva BSF mampu mereduksi limbah TKKS secara efektif dengan memperhatikan karakteristik pakan, khususnya tekstur dan tingkat fermentasi, serta keseimbangan antara dosis pakan dan jumlah larva. Nilai IPL yang dihasilkan juga menunjukkan bahwa pemanfaatan larva BSF sebagai dekomposer merupakan salah satu alternatif yang potensial dalam mengatasi permasalahan limbah TKKS dan mengurangi dampak pencemaran lingkungan (Hidayah, 2020).

Kadar Keasaman (pH)

Berdasarkan hasil penelitian, tidak seluruh unit perlakuan menunjukkan interaksi yang sangat berbeda nyata terhadap kadar keasaman (pH). Nilai rata-rata pH tertinggi terdapat pada perlakuan T1U3, yaitu perlakuan dengan asal pakan fermentasi dan jumlah pakan 300 g, sebesar 9,87. Sementara itu, nilai rata-rata pH terendah diperoleh pada perlakuan T2U1, yaitu perlakuan dengan asal pakan tanpa fermentasi dan jumlah pakan 100 g, sebesar 8,93. Hasil penelitian menunjukkan adanya peningkatan nilai pH pada seluruh unit perlakuan dibandingkan dengan pH TKKS pada analisis awal (Tabel 1). Aktivitas mikroorganisme selama proses dekomposisi bahan organik memiliki peran yang sangat signifikan dalam memengaruhi nilai pH substrat. Nilai pH akan meningkat karena adanya pembentukan amonia serta perkembangan populasi mikroba yang memanfaatkan asam organik sebagai substrat selama proses dekomposisi berlangsung (Hadiwidodo *et al.*, 2018). Amonia (NH₃) yang bersifat basa inilah yang menjadi penyebab utama terjadinya peningkatan pH pada media yang mengalami dekomposisi. Selain itu, derajat keasaman (pH) selama proses pengomposan tidak dipengaruhi oleh kadar air, melainkan dipengaruhi oleh kandungan nitrogen bahan organik yang merupakan hasil sintesis protein oleh mikroorganisme (Rimbanu *et al.*, 2025).

Nilai pH antarunit perlakuan relatif tidak berbeda jauh karena seluruh perlakuan menggunakan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai substrat utama bagi larva BSF. Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menunjukkan bahwa penggunaan substrat dengan karakteristik bahan organik yang serupa cenderung menghasilkan nilai pH akhir yang tidak berbeda nyata setelah proses biokonversi (Yuwita, 2022). Nilai pH yang terlalu rendah dapat menghambat aktivitas makan dan kemampuan larva BSF dalam mereduksi bahan organik sehingga berpengaruh terhadap efisiensi proses biokonversi (Manurung, 2016). Berdasarkan persyaratan mutu pupuk organik padat menurut SNI 7763:2018, seluruh perlakuan menghasilkan nilai pH di atas kisaran standar yang ditetapkan, yaitu 4–9, sehingga pupuk organik hasil biokonversi pada penelitian ini belum memenuhi standar mutu yang dipersyaratkan.

Kadar Air

Berdasarkan hasil penelitian (Tabel 2), kandungan kadar air pupuk organik padat menunjukkan adanya interaksi berbeda nyata pada perlakuan T1U1, T1U2, dan T1U3. Pada faktor asal pakan tanpa fermentasi, terdapat perbedaan nyata antara perlakuan T2U1 dan T2U3, namun tidak berbeda nyata dengan perlakuan T2U2. Nilai rata-rata kadar air tertinggi diperoleh pada perlakuan T1U3 sebesar 34,40%, sedangkan nilai terendah terdapat pada perlakuan T2U1 sebesar 18,10%. Tingginya kadar air pada perlakuan T1U3 diduga berkaitan dengan proses fermentasi limbah TKKS yang menyebabkan dekomposisi senyawa lignoselulosa sehingga struktur bahan menjadi lebih remah dan berpori, yang mendukung peningkatan kemampuan media dalam menyerap serta menahan air (Siddiquee *et al.*, 2017). Proses pengomposan dan fermentasi bahan organik dapat meningkatkan kapasitas menahan air (*water holding capacity*) melalui pembentukan pori-pori dan peningkatan luas permukaan bahan, sehingga kelembapan media cenderung lebih tinggi dibandingkan sebelum proses dekomposisi berlangsung (Trisakti *et al.*, 2019). Berdasarkan persyaratan mutu pupuk organik padat menurut SNI 7763:2018, rata-rata kadar air pada perlakuan T1U1, T1U2, T2U1, dan T2U2 telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan, yaitu 8–25%. Namun demikian, kadar air pada perlakuan T1U3 dan T2U3 belum memenuhi standar tersebut. Kondisi ini diduga dipengaruhi oleh faktor jumlah pakan, sehingga aktivitas larva BSF dan mikroorganisme belum berlangsung secara

optimal.

Kadar air merupakan faktor penting yang memengaruhi aktivitas larva BSF dan mikroorganisme selama proses dekomposisi. Kisaran kadar air optimum untuk metabolisme mikroorganisme berkisar antara 40–60%. Kadar air di bawah 40% dapat menghambat metabolisme larva BSF dan mikroba, sehingga memperlambat proses dekomposisi (Yuwita, 2020). Sebaliknya, kadar air yang melebihi 60% dapat menyebabkan pencucian unsur hara, penurunan ketersediaan oksigen, serta terbentuknya kondisi anaerob yang menurunkan aktivitas dekomposer dan menimbulkan bau tidak sedap (Rahmadi, 2014). Media pakan dengan kadar air yang terlalu tinggi juga dapat menyulitkan larva BSF dalam mereduksi pakan (Hakim, 2017), karena larva BSF tidak dapat tumbuh optimal pada media yang terlalu basah (Falica, 2014). Kondisi tersebut pada akhirnya akan memengaruhi kandungan hara pupuk organik padat yang dihasilkan (Fauzi, 2022).

Nitrogen Total

Berdasarkan hasil penelitian, kandungan nitrogen (N) total pada TKKS hasil biokonversi mengalami peningkatan pada setiap unit perlakuan dibandingkan dengan kandungan N total TKKS sebelum perlakuan (Tabel 1). Rata-rata kandungan N total tertinggi diperoleh pada perlakuan T1U1 sebesar 3,46%, sedangkan rata-rata kandungan N total terendah terdapat pada perlakuan T2U2 sebesar 2,20%. Hasil ini menunjukkan bahwa faktor asal pakan fermentasi, jumlah pakan, serta penggunaan larva BSF berperan dalam peningkatan kandungan nitrogen (N). Peningkatan N tersebut dipengaruhi oleh kualitas substrat pakan yang telah difermentasi, karena proses fermentasi dapat meningkatkan ketersediaan nitrogen mineral serta menurunkan rasio C/N melalui aktivitas mikroba yang mendegradasi senyawa organik kompleks. Kondisi ini juga dapat mengurangi kehilangan nitrogen dalam bentuk gas seperti NH_3 , sehingga lebih banyak nitrogen yang tersimpan dalam sistem. Selain itu, larva BSF berkontribusi dalam akumulasi nitrogen melalui konversi biomassa, di mana sebagian besar nitrogen pakan diasimilasi menjadi protein tubuh larva serta tersisa dalam frass sebagai hasil metabolisme. Studi menunjukkan bahwa sekitar 40–60% nitrogen pakan dapat dialihkan menjadi biomassa larva dan produk sampingnya selama proses biokonversi (Seyedalmoosavi *et al.*, 2022).

Optimalisasi proses dekomposisi sangat bergantung pada kelengkapan reaksi dalam siklus nitrogen. Aktivitas mikroorganisme yang didukung oleh ketersediaan oksigen yang cukup dapat meningkatkan kandungan nitrogen, baik dalam bentuk total maupun tersedia. Sebaliknya, kondisi yang tidak mendukung, seperti keterbatasan oksigen, dapat memicu proses denitrifikasi oleh bakteri *Thiobacillus denitrificans*, yang menyebabkan kehilangan nitrogen melalui pelepasan gas ke atmosfer dan berakibat pada penurunan kandungan unsur hara (Kusuma, 2012). Nitrogen merupakan unsur hara esensial yang berperan penting dalam pembentukan protein dan klorofil pada tanaman (Dewi, 2015). Berdasarkan persyaratan mutu pupuk organik padat menurut SNI 7763:2018, kandungan N total pada seluruh unit perlakuan telah memenuhi standar minimum yang ditetapkan, yaitu $\geq 2\%$, sehingga pupuk organik hasil biokonversi dinyatakan layak digunakan.

Kalium Total

Data hasil penelitian pada Tabel 2 menunjukkan adanya peningkatan kandungan kalium (K) total yang signifikan pada seluruh unit perlakuan dibandingkan dengan kandungan K total pada limbah TKKS sebelum perlakuan (Tabel 1). Kandungan K total tertinggi secara berturut-turut diperoleh pada perlakuan T1U1 sebesar 8,06%, sedangkan kandungan K total terendah terdapat pada perlakuan T2U3 sebesar 3,96%.

Rendahnya kandungan K total pada beberapa unit perlakuan diduga disebabkan oleh ketidaksesuaian antara dosis pakan dan jumlah larva BSF yang digunakan, sehingga proses reduksi limbah oleh larva BSF tidak berlangsung secara optimal. Ketidakseimbangan rasio antara jumlah substrat dan kepadatan larva dapat menurunkan efisiensi konsumsi pakan, memperlambat laju degradasi bahan organik, serta memengaruhi dinamika mineralisasi unsur hara dalam sistem biokonversi. Kondisi ideal dalam proses biokonversi menggunakan larva BSF ditentukan oleh kombinasi antara kepadatan larva dan laju pemberian pakan, di mana kedua variabel tersebut terbukti secara signifikan memengaruhi efisiensi proses biokonversi, dengan kepadatan larva sebagai faktor yang paling dominan (Parra Paz *et al.*, 2015). Performa dan komposisi tubuh larva BSF sangat dipengaruhi oleh kualitas dan kuantitas pakan, serta faktor biotik seperti kepadatan larva, kondisi keterbatasan pakan akibat ketidaksesuaian rasio menyebabkan penurunan kandungan protein kasar larva secara signifikan, yang mengindikasikan bahwa proses biokonversi tidak berjalan secara optimal (Barragan Fonseca *et al.*, 2018). Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa perlakuan dengan pakan asal fermentasi pada seluruh taraf jumlah pakan menghasilkan kandungan K total yang lebih tinggi dibandingkan dengan perlakuan tanpa fermentasi.

Selain faktor asal pakan, jumlah pakan juga berpengaruh terhadap peningkatan kandungan K total. Semakin rendah jumlah pakan yang diberikan pada unit perlakuan, maka cenderung semakin tinggi kandungan K total pada pupuk organik padat yang dihasilkan. Kalium berperan penting dalam mengatur keseimbangan unsur hara nitrogen dan fosfor dalam tanah dan tanaman (Diener, 2009). Berdasarkan persyaratan mutu pupuk organik padat menurut

SNI 7763:2018, kandungan K total pada seluruh unit perlakuan telah memenuhi baku mutu yang ditetapkan, yaitu minimal 2%, sehingga pupuk organik hasil biokonversi layak untuk digunakan.

Fosfor Total

Data hasil penelitian pada Tabel 2 menunjukkan adanya peningkatan kandungan fosfor (P) total pada TKKS hasil biokonversi dibandingkan dengan kandungan P total pada limbah TKKS sebelum perlakuan. Nilai rata-rata kandungan P total tertinggi diperoleh pada perlakuan T1U2 sebesar 1,45%, sedangkan nilai terendah terdapat pada perlakuan T2U3 sebesar 0,53%. Hasil ini menunjukkan bahwa perlakuan dengan asal pakan fermentasi mampu meningkatkan kandungan P total pada pupuk organik padat hasil biokonversi.

Peningkatan kandungan P total pada hasil biokonversi dibandingkan dengan analisis awal TKKS diduga berkaitan dengan kondisi pH yang relatif sesuai bagi pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme selama proses dekomposisi. Pada kisaran pH mendekati netral, aktivitas mikroba seperti bakteri dan jamur meningkat karena kondisi ini mendukung kerja enzim hidrolitik yang berperan dalam proses mineralisasi fosfor organik menjadi bentuk anorganik yang lebih tersedia. Enzim fosfatase terbagi atas fosfatase asam dan fosfatase basa, di mana fosfatase asam lebih dominan pada kondisi tanah masam, sedangkan fosfatase basa mendominasi pada kondisi netral hingga basa, keduanya berperan penting dalam proses mineralisasi P organik melalui hidrolisis ikatan fosfoester pada senyawa organik sehingga fosfor terlepas menjadi bentuk yang dapat dimanfaatkan (Zhao *et al.*, 2024). Proses ini menyebabkan fosfor yang sebelumnya terikat dalam senyawa kompleks bahan organik TKKS dilepaskan ke dalam sistem. Aktivitas larva BSF juga mempercepat fragmentasi substrat sehingga luas permukaan meningkat dan mempercepat akses mikroorganisme terhadap bahan organik. Preferensi larva BSF dalam mengonsumsi berbagai jenis bahan organik, yang disertai dengan aksi mikroorganisme dalam saluran pencernaannya, terbukti mampu mempercepat proses penguraian bahan organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana sehingga transformasi limbah menjadi sumber daya yang bermanfaat dapat berlangsung lebih efisien (Rehman *et al.*, 2023). Kandungan fosfor juga berkaitan erat dengan kandungan nitrogen pada substrat biokonversi, di mana peningkatan kandungan nitrogen cenderung diikuti oleh penurunan kandungan fosfor. Hal ini terjadi karena fosfor merupakan unsur makro esensial yang secara langsung terlibat dalam sintesis asam nukleat, pembelahan sel, dan pertumbuhan jaringan baru, serta berperan penting dalam berbagai proses seluler seperti metabolisme karbohidrat, produksi energi (ATP), dan transduksi sinyal pada sel mikroorganisme (Mabood *et al.*, 2023). Fosfor merupakan unsur hara esensial yang berperan penting dalam proses pembentukan sel, sintesis protein dan enzim, serta berbagai proses metabolisme yang menghasilkan energi pada tanaman (Dewi, 2015).

Kandungan C-Organik

Kandungan C-organik berdasarkan hasil penelitian (Tabel 2) yang dianalisis menggunakan uji lanjut BNT taraf 5% menunjukkan bahwa perlakuan T1U1 tidak berbeda nyata dengan perlakuan T2U1 dan T2U2, namun berbeda nyata dengan perlakuan T1U2, T1U3, dan T2U3. Perlakuan T1U2 berbeda nyata dengan perlakuan T1U1, T1U3, dan T2U1, tetapi tidak berbeda nyata dengan perlakuan T2U2 dan T2U3. Perlakuan T1U3 berbeda nyata dengan seluruh perlakuan lainnya, sedangkan perlakuan T2U1 tidak berbeda nyata dengan perlakuan T1U1. Perlakuan T2U2 juga tidak berbeda nyata dengan perlakuan T1U2 dan T2U3. Nilai rata-rata kandungan C-organik tertinggi diperoleh pada perlakuan T2U1 sebesar 24,98%, sedangkan nilai terendah terdapat pada perlakuan T1U3 sebesar 20,22%. Rendahnya kandungan C-organik pada perlakuan dengan asal pakan fermentasi diduga disebabkan oleh kondisi pakan yang telah mengalami dekomposisi awal dan mengandung populasi mikroba yang tinggi, sehingga memudahkan larva BSF dalam merombak bahan organik pada limbah TKKS (Widyastuti & Sardin., 2021)

Kandungan C-organik pada TKKS hasil biokonversi cenderung lebih rendah dibandingkan dengan kandungan C-organik limbah TKKS sebelum perlakuan, yaitu sebesar 27,98%. Meskipun mengalami penurunan, kandungan C-organik pada pupuk organik padat hasil biokonversi telah memenuhi persyaratan mutu pupuk organik padat menurut SNI 7763:2018, yaitu minimal 15%. C-organik memiliki peran penting dalam menjaga keseimbangan kandungan nitrogen pada pupuk organik. Pada tahap awal proses dekomposisi, karbon yang terkandung dalam bahan organik berfungsi sebagai sumber energi utama bagi mikroorganisme (Chasanah, 2013).

C/N Rasio

Data hasil penelitian yang ditunjukkan pada Tabel 2. Menunjukkan adanya interaksi berbeda nyata antara perlakuan T1U1 berbeda nyata dengan setiap perlakuan, kecuali perlakuan T1U3. Perlakuan T1U2 berbeda nyata dengan T1U1, T1U3, dan T2U2 tetapi tidak berbeda nyata dengan perlakuan T2U1 dan T2U3. Perlakuan T1U3 berbeda nyata dengan setiap perlakuan, tetapi tidak berbeda nyata dengan T1U1. Perlakuan T2U1 berbeda nyata dengan setiap perlakuan kecuali perlakuan T1U2 dan T2U3. Perlakuan T2U2 berbeda nyata dengan setiap

perlakuan, kecuali perlakuan T2U3. Perlakuan T2U2 berbeda nyata dengan setiap perlakuan, kecuali perlakuan T2U3. Nilai rata-rata dengan kandungan C/N rasio tertinggi terdapat pada perlakuan T2U2 yaitu 10,74 sedangkan nilai rata-rata C/N rasio terendah terdapat pada perlakuan T1U3 yaitu 7,86. Nilai C/N rasio paling tinggi terdapat pada perlakuan T2U2 diduga disebabkan oleh jumlah larva yang digunakan dalam penelitian terlalu sedikit sehingga kurang maksimal dalam mereduksi limbah dengan jumlah tersebut. Jumlah larva yang rendah menyebabkan laju konsumsi bahan organik, khususnya fraksi karbon, menjadi lebih lambat karena kapasitas feeding (*feeding capacity*) sistem tidak sebanding dengan jumlah substrat yang tersedia. Akibatnya, degradasi karbon oleh aktivitas makan larva dan mikroorganisme berlangsung tidak optimal, sehingga penurunan C-organik tidak signifikan. Proses ekskresi nitrogen melalui frass serta aktivitas mikroba yang memineralisasi nitrogen juga menjadi kurang intensif, sehingga keseimbangan penurunan C dan peningkatan N tidak tercapai secara optimal. Kondisi ini menyebabkan rasio C/N tetap tinggi karena karbon tidak terurai sebanding dengan nitrogen yang tersedia dalam sistem (Lalander et al., 2019).

Nilai C/N rasio pada data hasil penelitian (tabel 9.) menunjukkan bahwa terjadi penurunan C/N rasio yang sangat signifikan dari status sangat tinggi (52,59) menjadi sangat rendah (7 - 10). Hal ini menunjukkan bahwa semua baik faktor asal pakan, jumlah pakan, maupun dekomposer berupa larva BSF mampu menurunkan rasio C/N. Perlakuan dengan faktor pakan asal fermentasi (semua taraf faktor dosis pakan) diidentifikasi lebih baik dalam menurunkan nilai C/N rasio dibandingkan perlakuan dengan faktor asal pakan tanpa difermentasi (semua taraf faktor dosis pakan). Apabila nilai C/N rasio > 25, maka proses dekomposisi dapat dikatakan masih belum sempurna. Proses dekomposisi perlu dilanjutkan kembali hingga nilai C/N rasio < 25 (Chasanah, 2013). Menurut Widarti (2015) nilai C/N rasio akan mengalami penurunan yang disebabkan oleh penurunan jumlah karbon yang digunakan sebagai sumber energi mikroba dalam mendekomposisi bahan organik. Pada proses dekomposisi, berlangsung perubahan pada bahan organik menjadi karbon dioksida (CO₂) + air (H₂O) + nutrient + humus + energi. Selama proses dekomposisi CO₂ menguap dan menyebabkan penurunan kadar karbon dan peningkatan nitrogen, sehingga nilai C/N rasio pupuk organik padat menurun (Isibika, 2022). Hal ini menunjukkan bahwa pada penelitian ini proses dekomposisi telah berjalan dengan sempurna, sehingga ketika diaplikasikan tidak akan terjadi pengikatan nitrat oleh jasad renik dari tanah sehingga akan tersedia untuk pertumbuhan tanaman (Roro, 2015). Data hasil penelitian menunjukkan bahwa C/N rasio pada setiap unit perlakuan telah sesuai dengan standar baku mutu pupuk organik padat dalam SNI 7763:2018 yaitu maksimal 25%.

KESIMPULAN

Biokonversi limbah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menggunakan larva *Black Soldier Fly* (BSF) menghasilkan pupuk organik padat dengan mutu yang dipengaruhi oleh asal dan jumlah pakan. Perlakuan pakan fermentasi menunjukkan efektivitas pengurangan limbah tertinggi dengan nilai Indeks Pengurangan Limbah (IPL) mencapai 3,61%, sedangkan perlakuan tanpa fermentasi terendah sebesar 1,80%. Kandungan hara tertinggi yang diperoleh meliputi pH 9,87, N total 3,46%, K total 8,06%, P total 1,45%, C-organik 24,98%, dan rasio C/N 10,74. Secara umum, parameter pH, N total, K total, C-organik, dan C/N rasio telah memenuhi standar SNI 7763:2018, namun kadar air pada beberapa perlakuan masih melebihi batas maksimum dan kandungan P total belum memenuhi standar minimal 2%.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Dekan Fakultas Pertanian Universitas Mulawarman, para dosen, serta Laboratorium Tanah atas bimbingan, arahan, fasilitas, dan dukungan yang diberikan selama pelaksanaan penelitian dan penyusunan artikel ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Abduh, M. Y., Perdana, M. P., Bara, M. A., Anggraeni, L. W., & Putra, R. E. (2022). Effects of aeration rate and feed on growth, productivity and nutrient composition of black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae. *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 25(2), 101902. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2022.101902>
- Barragan Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. A. (2017). Nutritional value of the black soldier fly (*Hermetia illucens*) and its suitability as animal feed – a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 3(2), 105–120. <https://doi.org/10.3920/JIFF2016.0055>
- Barragan Fonseca, K. B., Dicke, M., & van Loon, J. J. A. (2018). Influence of larval density and dietary nutrient concentration on performance, body protein, and fat contents of black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*).

- Entomologia Experimentalis et Applicata*, 166(9), 761–770. <https://doi.org/10.1111/eea.12716>
- Bekker, N. S., Heidelbach, S., Vestergaard, S. Z., Nielsen, M. E., Riisgaard-Jensen, M., Zeuner, E. J., Bahrndorff, S., & Eriksen, N. T. (2021). Impact of substrate moisture content on growth and metabolic performance of black soldier fly larvae. *Waste Management*, 127, 73–79. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.04.028>
- Boakye Yiadom, K. A., Ilari, A., & Duca, D. (2022). Greenhouse gas emissions and life cycle assessment on the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.). *Sustainability*, 14(16), 10456. <https://doi.org/10.3390/su141610456>
- BPS. 2021. Statistik Kelapa Sawit Indonesia 2021. Badan Pusat Statistik. Indonesia.
- Cammack, J. A., & Tomberlin, J. K. (2024). Environmental conditions influencing growth and development of the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.)) (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Insects as Food and Feed*, 10(10), 1697–1715. <https://doi.org/10.1163/23524588-20230026>
- Chasanah, U.L, Rahmawati, G.R Iskaria. 2013. *Optimasi Dekomposisi Tandan Kosong Kelapa Sawit (Elaeis guineensis Jacq) Menggunakan Aktivator EM4*. Polhasains, Jurnal Sains dan Terapan Politeknik Hasnur 01 (1): 16-29.
- Destia, M., Yimer, F., Opande, G., & Bekele, T. (2023). Waste reduction, biomass conversion and growth performance of black soldier fly larvae using organic waste. *Asian Journal of Scientific Research*, 16(1), 1–8. <https://doi.org/10.3923/ajsr.2023.1.8>
- Dewi R. 2015. *Manfaat Unsur N, P, K Bagi Tanaman*. Badan Litbag Pertanian. BPTP Kalimantan Timur.
- Diener S, Zurbrug C, Tockner K. 2009. *Conversion of Organic Material By Black Soldier Fly Larvae Establishing Optimal Feeding Rates*. *Waste Management and Research*, 27: 603-610.
- Dimawarnita, F., Latisya, S., Perwitasari, U., & Faramitha, Y. (2025). Bidelignifikasi tandan kosong kelapa sawit dan aplikasinya sebagai pupuk organik. *Warta Pusat Penelitian Kelapa Sawit*, 30(2), 122–131. <https://doi.org/10.22302/iopri.war.warta.v30i2.214>
- Dortmans, B., Diener, S., Verstappen, B., & Zurbrugg, C. (2017). *Black soldier fly biowaste processing: A step-by-step guide*. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology (Eawag). <https://www.eawag.ch/en/departement/sandec/publications/publications-waste>
- Falica A, et.al. 2014. Produksi Dan Kandungan Protein Maggot (*Hermetia illucens*) Dengan Menggunakan Media Tumbuh Berbeda. *Jurnal Zootek* Vol. 34, Edisi Khusus.
- Fauzi Muhammad. 2022. Pengaruh Pupuk Kasgot (Bekas Maggot) Magotsuka Terhadap Tinggi, Jumlah Daun, Luas Permukaan Daun Dan Bobot Basah Tanaman Sawi Hijau (*Brassica rapa var. Parachinensis*). Universitas Muhammadiyah Bandung.
- Gold, M., Tomberlin, J. K., Diener, S., Zurbrugg, C., & Mathys, A. (2018). Decomposition of biowaste macronutrients, microbes, and chemicals in black soldier fly larval treatment: A review. *Waste Management*, 82, 302–318. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.10.022>
- Hadiwidodo, M., Sutrisno, E., Handayani, D. S., & Febriani, M. P. (2018). Studi pembuatan kompos padat dari sampah daun kering TPST UNDIP dengan variasi bahan mikroorganisme lokal (MOL) daun. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, 15(2), 78–85. <https://doi.org/10.14710/presipitasi.v15i2.78-85>
- Hakim A.R. 2017. *Produksi Bahan Pakan Ikan Dari Larva Hermetia illucens Berbasis Limbah Industri Pengolahan Ikan Dan Kajian Keekonomiannya*. Tesis. Universitas Gajah Mada.
- Hakim, A. R., Prasetya, A., & Petrus, H. T. B. M. (2017). Studi laju umpan pada proses biokonversi limbah pengolahan tuna menggunakan larva *Hermetia illucens*. *Jurnal Pascapanen dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*, 12(2), 143–151. <https://doi.org/10.15578/jpbkp.v12i2.469>
- Isibika A, P Simha, B Vinneras, C, Zurbrugg, O. Kibazohi, C. Lalander. 2022. *Food Industry Waste- An Opportunity for Black Soldier Fly Larva Proein Production in Tanzania*. Science Of The Total Environment 858 (2023) 159985. *Journal of Industrial process and Chemical engineering*. Halaman 46-55.
- Kusuma, M.E. 2012. Pengaruh Beberapa Jenis Pupuk Kandang Terhadap Kualitas Bokashi. *Jurnal Ilmu Hewani Tropika* Vol 1 No. 2 Desember 2012. ISSN: 2301-7783. Hal 41-46.
- Lalander, C., Diener, S., Magri, M. E., Zurbrugg, C., Lindström, A., Vinnerås, B., & Bernal, M. P. (2019). Effects of substrate and process conditions on black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae bioconversion. *Waste Management*, 87, 741–750. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.01.026>
- Lubis, M. E. S., Bajra, B. D., Rizki, I. F., Mulyono, M. E., Yudianto, B. G., & Panjaitan, F. R. (2023). Pengaruh komposisi tandan kosong kelapa sawit dan bungkil inti kelapa sawit sebagai pakan larva lalat tentara hitam (*Hermetia illucens*) terhadap perubahan kandungan asam lemaknya. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*, 31(1), 13–24. <https://doi.org/10.22302/iopri.jpks.v31i1.199>
- Mabood, F., Zhou, W., Zhang, B., Ringler, C. D., Ma, Q., & Malakar, A. (2023). Phosphate solubilizing bacteria: Advances in their physiology, molecular mechanisms and microbial community effects. *Microorganisms*, 12(1), 37. <https://doi.org/10.3390/microorganisms12010037>
- Manurung Robert, Ateng Supriatna, Rizkita R Esyanthi, Ramadhani E Putra. 2016. *Bioconversion of Rice Straw*

- Waste by Black Soldier Fly Larvae (Hermetia illucens L.): Optimal Feed Rate for Biomass Production. Journal of Entomology and Zoology Studies*, 4(4): 1036-1041. E- ISSN: 2320-7078.
- Martana, G. D. G. (2024). *Pretreatment tandan kosong kelapa sawit (TKKS) menggunakan organosolvent* (Skripsi, Universitas Katolik Parahyangan). <https://repository.unpar.ac.id/handle/123456789/20184>
- Monita, L., Hadi, S., Amin, A. A., & Fahmi, M. R. (2017). Pengolahan sampah organik perkotaan menggunakan larva *Black Soldier Fly (Hermetia illucens)*. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*, 7(3), 227–234. <https://doi.org/10.29244/jpsl.7.3.227-234>
- Nefi Andriana Fajri. 2020. *Biokonversi Limbah Organik Menjadi Magot Sebagai Sumber Protein Pengganti Tepung Ikan*. Jurnal Fakultas Peternakan. Universitas Nahdlatul Wathan Mataram.
- Parra Paz, A. S., Carrejo, N. S., & Gómez Rodríguez, C. H. (2015). Effects of larval density and feeding rates on the bioconversion of vegetable waste using black soldier fly larvae *Hermetia illucens* (L.), (Diptera: Stratiomyidae). *Waste and Biomass Valorization*, 6(6), 1059–1065. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9418-8>
- Pathiassana, M.T., Izzy, S.N, Haryadi, Nealma, S. 2020. Studi Laju Umpan Pada Proses Biokonversi Dengan Variasi Jenis Sampah yang Dikelola PT. Biomagg Sinergi Internasional Menggunakan Larva *Black Soldier Fly (Hermetia illucens)*. Jurnal Tambora.
- Ribeiro, N., Costa, R., & Ameixa, O. M. C. C. (2022). *The influence of non-optimal rearing conditions and substrates on the performance of the black soldier fly (Hermetia illucens)*. *Insects*, 13(7), 639. <https://doi.org/10.3390/insects13070639>
- Rimbanu, A. F., Hamdani, A. S., & Yusuf, M. (2025). Kualitas kompos kulit kopi dengan penambahan kotoran dan urine kambing. *Journal of Agricultural and Biosystem Engineering*, 4(4). <https://doi.org/10.23960/jabe.v4i4.12268>
- Rofi, Dani Yusufiana. 2020. *Teknologi Reduksi Sampah Organik Buah dan Sayur Dengan Modifikasi Pakan Larva Black Soldier Fly*. Skripsi. Program Studi Teknik Lingkungan Fakultas Sains dan Teknologi. Universitas Islam Negeri Sunan Ampel. Surabaya.
- Rukmini Piyantima. 2021. *Pemanfaatan Ampas Tahu dan Sampah Pasar Sebagai Pakan Larva BSF*. Joiche.
- Seyedalmoosavi, M. M., Mielenz, M., Veldkamp, T., Daş, G., & Metges, C. C. (2022). *Growth efficiency, intestinal biology, and nutrient utilization and requirements of black soldier fly (Hermetia illucens) larvae compared to monogastric livestock species: a review*. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 13:31. <https://doi.org/10.1186/s40104-022-00682-7>
- Shumo, M., Khamis, F. M., Tanga, C. M., Fiaboe, K. K. M., Subramanian, S., Ekese, S., van Huis, A., & Borgemeister, C. (2019). Influence of temperature on selected life history traits of black soldier fly (*Hermetia illucens*) reared on two common urban organic waste streams in Kenya. *Animals*, 9(3), 79. <https://doi.org/10.3390/ani9030079>
- Siddiquee, S., Shafawati, S. N., & Naher, L. (2017). Effective composting of empty fruit bunches using potential *Trichoderma* strains. *Biotechnology Reports*, 13, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.11.001>
- SNI 7763:2018. *Spesifikasi Pupuk Organik Padat*.
- Surendra, K. C., Olivier, R., Tomberlin, J. K., Jha, R., & Khanal, S. K. (2020). Bioconversion of organic wastes into biodiesel and animal feed via black soldier fly: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109587.
- Trisakti, B., Irvan, & Sijabat, P. (2019). Pembuatan kompos dari campuran 60% berat tandan kosong kelapa sawit dan 40% berat *Azolla microphylla* dengan bantuan pupuk cair organik aktif. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 8(1). <https://doi.org/10.32734/jtk.v8i1.1600>
- United States Department of Agriculture, Foreign Agricultural Service. (2023). *Palm oil explorer: World palm oil production 2022*. https://ipad.fas.usda.gov/cropexplorer/cropview/commodityView.aspx?cropid=4243000&rankby=Production&sel_year=2022
- Widarti B.N, Wardhini W.K, Sarwono, E. 2015. Pengaruh Rasio C/N Bahan Baku pada Pembuatan Kompos dari Kubis dan Kulit Pisang. *Jurnal Integrasi Proses*. Vol. 5, No. 2, Hal. 75-80.
- Widyastuti Sri, Sardin. 2021. Pengolahan Sampah Organik Pasar Dengan Menggunakan Media Larva *Black Soldier Flies* (BSF). *Jurnal Teknik WAKTU*, Volume 19 Nomor 01. ISSN; 1412:1867.
- Wontae Kim, Bae Sungwoo, Park Kwanho, Lee Sangbeom, Choi Youngcheol, Han Sangmi, Koh Youngho. 2010. *Biochemical Characterization of Digestive Enzymes in The Black Soldier Fly, Hermetia illucens (Diptera: Stratiomyidae)*. *Journa of Asia-Pacific Entomology* 14 (2011) 11-14.
- Yuwita Rachma, Fitria Lali, Jumiati. 2022. Teknologi Biokonversi Sampah Organik Rumah Makan Dengan Larva *Black Soldier Fly (BSF)*. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, Vol.10, No. 2, 2022: 247 - 253.