Sains Malaysiana 55(10)(2026): 1746-1759
http://doi.org/10.17576/jsm-2026-5510-13

Ciri Fizikokimia Sisa Kulit Nanas dan Implikasinya terhadap Biopenukaran oleh Larva Lalat Askar Hitam (*Hermetia illucens*): Satu Ulasan Sistematik

(Physicochemical Characteristics of Pineapple Peel Waste and Their Implications for Bioconversion by Black Soldier Fly Larvae (*Hermetia illucens*): A Systematic Review)

IRFANA KABIR AHMAD*, NURULNAZHIFAH KAMARUZAMAN, MOHD REZA AZMI & MUHAMAD AZRY KHOIRY

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Built Environment, Universiti Kebangsaan Malaysia, 43600 UKM Bangi, Selangor, Malaysia

Diserahkan: 20 Disember 2025/Diterima: 29 September 2026

*Pengarang untuk surat-menyurat; email: irfana@ukm.edu.my

ABSTRAK

Sisa kulit nanas merupakan hasil sampingan utama industri pemprosesan nanas yang kaya dengan karbohidrat, serat, asid organik dan sebatian bioaktif, tetapi sering dilupuskan tanpa pemanfaatan optimum. Ulasan sistematik ini menilai potensi kulit nanas sebagai substrat khusus untuk biopenukaran oleh larva lalat askar hitam (BSFL; *Hermetia illucens*) dengan menumpukan kepada ciri fiziko-kimia, prestasi biopenukaran, kualiti biojisim larva, fras dan isu keselamatan produk. Bukti terkini menunjukkan bahawa kulit nanas mempunyai pH berasid sekitar 4.72 dan jumlah pepejal terlarut 14.8 °Brix, manakala komposisi keringnya mengandungi kira-kira 85.07 g/100 g karbohidrat, 17.4 g/100 g serat kasar dan 5.14 g/100 g protein. Dalam kajian perbandingan substrat buah, larva yang diberi kulit nanas mencapai saiz larva 10.6 ± 0.2 mm dan pra-pupa 15.2 ± 0.4 mm, iaitu lebih tinggi berbanding kulit pisang, durian dan sisa sayuran; namun kandungan air kulit nanas yang tinggi (85.09 ± 0.07%) menyebabkan fras mudah menjadi cair dan kurang stabil. Keputusan ini menunjukkan bahawa kulit nanas berpotensi sebagai substrat tenaga dan agen penarik oviposisi, tetapi aplikasi suapan tunggal memerlukan kawalan kelembapan, pH, pengudaraan dan pencampuran dengan bahan berstruktur kering. Ulasan ini menegaskan bahawa kajian khusus kulit nanas penting kerana interaksi antara gula, pektin, lignoselulosa, bromelain dan keasidan substrat masih kurang dibincangkan dalam ulasan lalat askar hitam umum. Penilaian keselamatan biojisim larva dan fras, termasuk logam berat, patogen dan fitotoksisiti perlu diperkukuh sebelum penskalaan industri.

Kata kunci: Biopenukaran; fras; *Hermetia illucens*; larva lalat askar hitam; sisa kulit nanas

ABSTRACT

Pineapple peel waste is a major by-product of pineapple processing that is rich in carbohydrates, fibre, organic acids, and bioactive compounds, yet it is commonly underutilised. This systematic review evaluates pineapple peel as a specific substrate for bioconversion by black soldier fly larvae (BSFL; *Hermetia illucens*), focusing on physicochemical properties, bioconversion performance, larval biomass quality, frass quality, and product safety. Current evidence indicates that fresh pineapple peel has an acidic pH of approximately 4.72 and total soluble solids of 14.8 °Brix, while its dry matter contains about 85.07 g/100 g carbohydrate, 17.4 g/100 g crude fibre and 5.14 g/100 g protein. In a comparative fruit-substrate study, larvae fed pineapple peel achieved larval and prepupal sizes of 10.6 ± 0.2 mm and 15.2 ± 0.4 mm, respectively, outperforming banana peel, durian peel and vegetable scraps. However, high peel moisture (85.09 ± 0.07%) can liquefy the residue and reduce frass stability. These findings suggest that pineapple peel is a promising energy-rich feedstock and oviposition attractant, but monofeed application requires moisture, pH, aeration and structural co-substrate control. A pineapple-peel-focused review is therefore essential because the interactions between sugars, pectin, lignocellulose, bromelain and substrate acidity are not sufficiently addressed in general BSF reviews. Further safety assessment of larval biomass and frass, including heavy metals, pathogens and phytotoxicity is required before industrial-scale implementation.

Keywords: Bioconversion; black soldier fly larvae; frass; *Hermetia illucens*; pineapple peel waste

PENGENALAN

Industri nanas global terus berkembang sebagai salah satu subsektor penting dalam ekonomi agro-makanan, namun proses pengeluaran dan pemprosesan buah ini menghasilkan jumlah sisa organik yang sangat besar. Dianggarkan antara 40% hingga 60% daripada keseluruhan berat nanas menjadi residu seperti kulit, empulur, teras (batang) dan daun nanas (FAO 2024; Mendez-Encinas et al. 2020). Ini menjadikan nanas sebagai komoditi yang mempunyai potensi pemulihan biojisim yang tinggi. Secara umum, sisa yang terhasil daripada industri nanas boleh dikelaskan kepada dua kategori utama (Rajah 1), iaitu sisa ladang (POFW) dan sisa pemprosesan nanas (PPW).

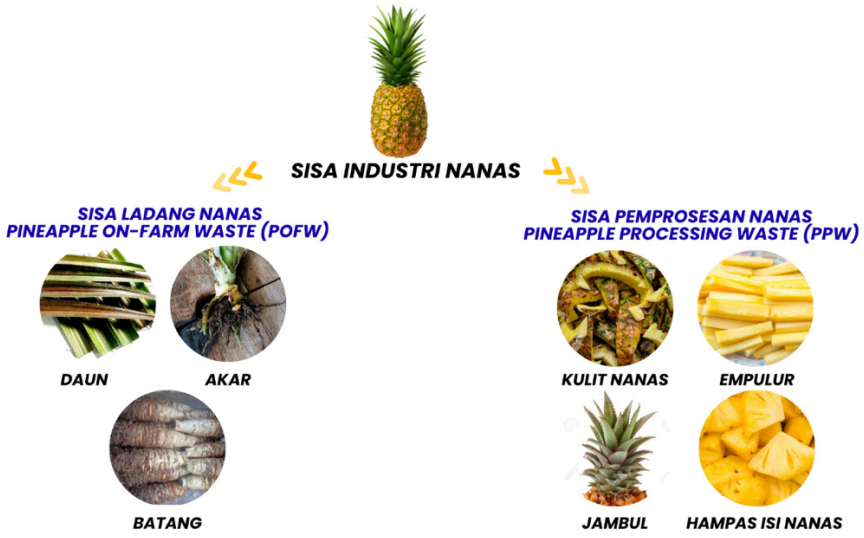
POFW merangkumi sisa ladang seperti daun, akar, batang dan residu lain yang dihasilkan semasa penuaian dan penyimpanan pascatuai, manakala PPW merujuk kepada hasil sampingan industri pemprosesan nanas seperti kulit, teras, empulur, mahkota, hampas dan batang yang terhasil semasa proses pemulpaan, pemerahan jus dan pengetinan nanas (Meena et al. 2022; Nguyen et al. 2025). Dalam konteks ini, kulit nanas ialah sisa yang paling relevan untuk rawatan biologi kerana ia mudah reput, berair, berasid dan kaya dengan gula mudah fermentasi. Ciri ini memberi dua implikasi berbeza, iaitu kulit nanas cepat mencetuskan masalah bau, larut lesap dan beban organik jika dilupuskan, namun pada masa yang sama ia menyediakan sumber karbon yang mudah dimanfaatkan oleh mikroorganisma dan larva serangga pemakan sisa (Meena et al. 2022; Mendez-Encinas et al. 2020; Rabiu et al. 2018).

Ulasan mengenai larva lalat askar hitam (BSFL) telah banyak diterbitkan dan lazimnya menumpukan kepada biologi serangga, sumber protein alternatif, rawatan sisa makanan dan aplikasi fras. Walau bagaimanapun, ulasan umum tersebut belum mencukupi untuk menjawab persoalan substrat khusus kerana prestasi BSFL sangat bergantung kepada sifat suapan. Kulit nanas mempunyai gabungan unik yang berbeza daripada sisa makanan campuran, najis ternakan atau sisa sayuran. Kulit nanas mempunyai pH berasid, jumlah pepejal terlarut (TSS), pektin, lignoselulosa, bromelain, polifenol dan kelembapan yang tinggi. Oleh itu, penilaian khusus terhadap kulit nanas diperlukan untuk memahami sama ada substrat ini berfungsi sebagai sumber tenaga larva, agen penarik oviposisi, bahan penghasil frass atau sebaliknya memerlukan pra-rawatan dan pencampuran bagi mengurangkan risiko operasi (Boafo et al. 2022; Pradabphetrat, Sathawong & Pimsen 2024; Rahayu et al. 2023).

Kajian ini bertujuan mensintesis bukti saintifik mengenai potensi sisa kulit nanas sebagai substrat BSFL dengan penekanan kepada tiga persoalan utama. Pertama, apakah ciri fiziko-kimia kulit nanas yang menentukan kebolehgunaannya sebagai substrat biopenukaran? Kedua, bagaimana ciri tersebut mempengaruhi pertumbuhan larva, nutrisi biojisim dan kestabilan fras? Ketiga, apakah had operasi, risiko keselamatan dan jurang penyelidikan yang perlu diselesaikan sebelum kaedah biopenukaran menggunakan BSFL diaplikasikan pada skala industri? Dengan memperkukuh fokus terhadap kulit nanas, ulasan ini bergerak melangkaui perbincangan umum BSFL dan menyediakan asas saintifik untuk pembangunan sistem biopenukaran agroindustri nanas yang lebih terkawal, selamat dan berteraskan ekonomi kitaran.

METODOLOGI KAJIAN

Kajian ini dijalankan sebagai ulasan sistematik mengikut garis panduan *Preferred Reporting Items for Systematic*



RAJAH 1. Sisa daripada industri nanas (Meena et al. 2022)

Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) (Page et al. 2021) bagi menilai potensi sisa kulit nanas sebagai substrat untuk biopenukaran menggunakan BSFL. Pencarian kepustakaan dilakukan secara sistematik melalui pangkalan data *Scopus, Web of Science, ScienceDirect* dan *Google Scholar* bagi artikel yang diterbitkan antara 2010 hingga 2025. Kata kunci utama merangkumi gabungan istilah seperti '*pineapple peel waste'*, '*pineapple processing waste'*, '*black soldier fly larvae'*, '*Hermetia illucens'*, '*bioconversion'*, '*frass'*, '*oviposition attractant'*, '*substrate acidity'*, '*bromelain'*, '*lignocellulose'* dan '*organic waste valorisation'*. Semua rekod yang dikenal pasti diurus menggunakan perisian pengurusan rujukan Mendeley sebelum proses saringan dijalankan.

Saringan kepustakaan dilakukan melalui tiga peringkat utama PRISMA, iaitu pengenalpastian, saringan dan kelayakan. Artikel disaring berdasarkan tajuk dan abstrak, diikuti penilaian teks penuh menggunakan kriteria inklusi yang merangkumi (i) perbincangan komposisi atau pemvalorisasian sisa kulit nanas; (ii) penggunaan BSFL untuk rawatan sisa organik, khususnya sisa buah atau kulit nanas; (iii) pelaporan data pertumbuhan larva, nilai nutrisi, fras, oviposisi atau parameter operasi; dan (iv) perbincangan implikasi keselamatan, alam sekitar atau ekonomi. Data daripada kajian terpilih diekstrak dan dianalisis secara sintesis kualitatif dan perbandingan untuk mengenal pasti pola, kelebihan, kekangan dan jurang penyelidikan, seterusnya menyokong perbincangan potensi biopenukaran BSFL dalam kerangka ekonomi kitaran.

CIRI FIZIKO-KIMIA SISA KULIT NANAS DAN IMPLIKASINYA TERHADAP BSFL

Kulit nanas mempunyai profil substrat yang berbeza daripada sisa makanan campuran (Jadual 1). Dari sudut kimia, nilai pH segar sekitar 4.72 dan jumlah TSS 14.8 °Brix menunjukkan bahawa kulit nanas menyediakan persekitaran berasid dengan gula larut yang tinggi. Ciri ini boleh merangsang fermentasi awal dan menghasilkan sebatian volatil yang menarik lalat betina untuk bertelur. Namun, keasidan yang terlalu tinggi atau fermentasi tidak terkawal boleh mengubah komuniti mikrobiota substrat, menurunkan oksigen terlarut dalam matriks basah dan mengganggu pergerakan larva. Oleh itu, pH dan kadar fermentasi tidak boleh dianggap sebagai ciri positif semata-mata, tetapi perlu dikawal mengikut tujuan sama ada untuk tarikan oviposisi, pertumbuhan larva atau penghasilan fras yang stabil (Rahayu et al. 2023).

Dari sudut nutrisi, kulit nanas kering dilaporkan mengandungi karbohidrat yang tinggi, iaitu 85.07 g/100 g, tetapi protein dan lemak yang rendah, masing-masing 5.14 g/100 g dan 1.14 g/100 g. Ini menunjukkan bahawa kulit nanas lebih sesuai berperanan sebagai substrat tenaga dan sumber karbon, bukannya substrat protein tinggi. Oleh itu, larva yang diberi kulit nanas secara tunggal boleh membesar dengan baik dari segi panjang badan, tetapi kandungan protein biojisim mungkin lebih rendah berbanding larva yang diberi sisa makanan atau substrat berprotein tinggi. Dalam konteks formulasi suapan larva, kulit nanas lebih wajar dipertimbangkan sebagai komponen campuran bersama dedak, hampas kelapa, sisa makanan, hampas soya atau bahan kering berstruktur untuk mengimbangi C/N, menyerap air berlebihan dan meningkatkan nilai protein larva (Boafo et al. 2022; Pradabphetrat, Sathawong & Pimsen 2024).

Kulit nanas mengandungi serat kasar, pektin, selulosa, hemiselulosa dan lignin yang boleh menyumbang kepada pembentukan fras, tetapi komponen lignoselulosa tersebut sukar dicerna secara langsung oleh BSFL (Jacqueline & Velvizhi 2024; Meena et al. 2022). Tanpa pra-rawatan, sebahagian nutrien boleh kekal terikat dalam matriks serat, sekali gus mengehadkan ketersediaan nutrien dan berpotensi menjejaskan pengambilan makanan, pertumbuhan serta kelangsungan hidup larva. Oleh itu, pemotongan kulit nanas kepada saiz yang lebih kecil, fermentasi terkawal, delignifikasi atau bioaugmentasi berpotensi melonggarkan struktur lignoselulosa dan meningkatkan kebolehcernaan substrat.

Fermentasi keadaan pepejal menggunakan *Aspergillus niger* dilaporkan meningkatkan protein kasar kulit nanas sebanyak 263.12%, jumlah asid amino sebanyak 102.85%, asid amino perlu sebanyak 68.69% dan asid amino tidak perlu sebanyak 124.88%, dengan peningkatan ketara pada asid glutamik, arginina dan asid aspartik (Santos et al. 2026). Walau bagaimanapun, keputusan tersebut merujuk kepada komposisi kulit nanas terfermentasi dan belum membuktikan peningkatan langsung profil asid amino biojisim BSFL. Kehadiran bromelain, polifenol, vitamin C dan asid organik turut memberikan ciri biokimia yang unik; bromelain berupaya menghidrolisis protein kepada peptida yang lebih kecil, manakala polifenol dan asid organik boleh mempengaruhi komuniti mikroorganisma melalui aktiviti antimikrob dan antioksidan (Ketnawa, Chaiwut & Rawdkuen 2011; Meena et al. 2022).

Sifat berasid kulit nanas juga boleh mempengaruhi pemilihan dan kelangsungan mikroorganisma fermentatif, tetapi kesannya bergantung pada pH serta kepekatan asid organik dan sebatian fenol (Nualkaekul & Charalampopoulos 2011). Namun demikian, bukti langsung yang menghubungkan kandungan lignoselulosa, keasidan, bromelain dan polifenol kulit nanas dengan kelangsungan hidup, mikrobiota usus serta profil asid amino BSFL masih terhad. Kajian terkawal yang membandingkan kulit nanas mentah dan terfermentasi pada julat pH serta nisbah campuran yang berbeza diperlukan untuk menentukan had toleransi larva dan kesannya terhadap kualiti biojisim serta keselamatan fras.

BSFL SEBAGAI AGEN BIOPENUKARAN

BSFL (Rajah 2(a)) daripada order Diptera dan famili Stratiomyidae, semakin diiktiraf sebagai agen biopenukaran yang berkesan dan kos efektif dalam pengurusan sisa organik. Berbeza daripada lalat sinantropik yang merujuk kepada lalat hidup berhampiran manusia dan berpotensi menjadi pembawa patogen, lalat dewasa (Rajah 2(b)) tidak menggigit, mempunyai mulut yang tidak berfungsi

dan tidak memakan bahan reput, sekali gus mengurangkan risiko pemindahan patogen dan menjadikan spesies ini selamat untuk diaplikasikan dalam sistem rawatan sisa berhampiran kawasan kediaman dan pertanian (da Silva & Hesselberg 2020). Jangka hayat lalat dewasa yang singkat, sekitar lima hari, tertumpu sepenuhnya kepada aktiviti pembiakan.

Kitar hidup lalat askar hitam (Rajah 3) merangkumi peringkat telur, larva, pra-pupa, pupa dan dewasa, dengan tempoh purata 40 hari hingga 43 hari di kawasan tropika (Tomberlin, Sheppard & Joyce 2002). Peringkat larva merupakan fasa paling kritikal dalam biopenukaran kerana kadar pengambilan makanan, pertumbuhan dan penguraian sisa berada pada tahap maksimum sebelum larva berhenti makan dan memasuki peringkat pra-pupa (Oyoo et al. 2025). BSFL mampu hidup dalam pelbagai substrat organik termasuk sisa makanan, najis ternakan dan sisa pertanian, serta boleh mencapai panjang sehingga 27 mm dan berat sekitar 220 mg pada peringkat akhir pertumbuhan (Kieβling et al. 2023).

Kecekapan biopenukaran BSFL dipengaruhi oleh faktor persekitaran seperti suhu, kelembapan dan



RAJAH 2. (a) Larva lalat askar hitam (*Hermetia illucens*) dan (b) lalat dewasa

JADUAL 1. Ciri khusus sisa kulit nanas dan implikasinya terhadap biopenukaran BSFL

Parameter kulit nanas	Data numerik utama	Implikasi kepada biopenukaran BSFL	Rujukan
Kuantiti sisa pemprosesan nanas	±40-60% berat buah boleh menjadi residu pemprosesan/ ladang	Menunjukkan ketersediaan substrat agroindustri yang besar untuk sistem BSFL berasaskan sumber tempatan	Meena et al. (2022); Mendez-Encinas et al. (2020)
pH dan jumlah pepejal terlarut kulit (TSS) nanas segar	pH 4.72; TSS 14.8 °Brix bagi kulit nanas MD2	Gula larut dan keasidan menyokong fermentasi serta tarikan oviposisi, tetapi perlu kawalan pH dan bau	Nadzirah et al. (2013)
Kelembapan	85.09 ± 0.07% dalam substrat kulit nanas yang diuji dengan larva lalat askar hitam	Kelembapan tinggi menyokong aktiviti awal larva tetapi boleh menyebabkan fras cair, anaerobik dan kurang stabil	Pradabphetrat, Sathawong & Pimsen (2024)
Komposisi nutrisi kering	Karbohidrat 85.07 g/100 g; serat kasar 17.4 g/100 g; protein 5.14 g/100 g; lemak 1.14 g/100 g; abu 2.42 g/100 g	Sesuai sebagai sumber tenaga/karbon; perlu dicampur dengan substrat berprotein atau bahan berstruktur kering	Raman et al. (2022)
Serat dan komponen lignoselulosa	Serat kasar sekitar 17.09-17.4%	Pektin dan lignoselulosa menyumbang kepada bahan organik fras, tetapi boleh mengehadkan ketersediaan nutrien dan kebolehcernaan jika tidak melalui prarawatan seperti pemotongan, fermentasi atau bioaugmentasi	Boafo et al. (2022); Jacqueline & Velvizhi (2024)
Sebatioan bioaktif	Bromelain, fenol, flavonoid, vitamin C dan asid organik dilaporkan dalam sisa nanas	Bromelain berpotensi membantu hidrolisis protein, manakala polifenol dan asid organik boleh mempengaruhi aktiviti serta komposisi mikrobiota. Namun, kesannya terhadap kelangsungan hidup, profil asid amino larva dan keselamatan fras masih memerlukan pengesahan uji kaji	Meena et al. (2022); dos Anjos et al. (2016)

pengudaraan, dengan julat optimum suhu 27-35 °C dan kelembapan substrat 65% hingga 75% bagi menyokong pergerakan larva dan pengambilan makanan yang cekap (Cheng, Chiu & Lo 2017). Selain itu, komposisi substrat memainkan peranan penting dalam menentukan fisiologi larva dan prestasi biopenukaran, yang mana substrat kaya gula, protein dan kelembapan menyokong pertumbuhan larva yang lebih pesat serta menghasilkan biojisim dengan kandungan protein (40-45%) dan lipid (25-35%) yang tinggi (Kieβling et al. 2023; Spranghers et al. 2017).

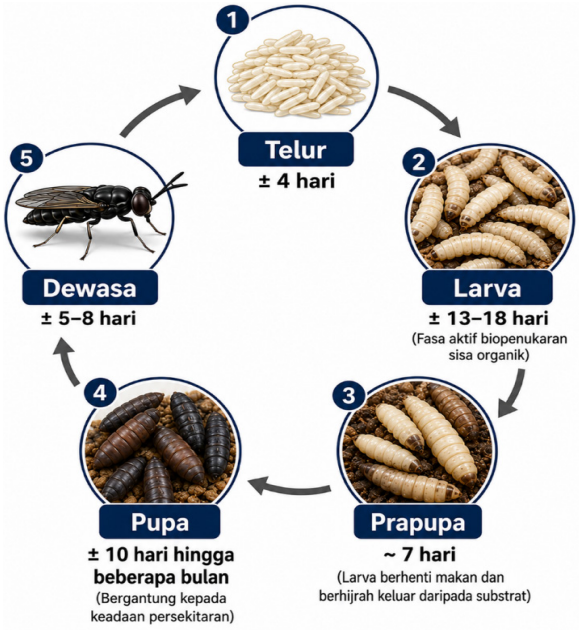
Selain keupayaan pengurangan sisa yang tinggi, lazimnya antara 50-80%, BSFL menawarkan kelebihan dari segi keselamatan biologi, nilai nutrisi dan penghasilan fras yang berpotensi sebagai baja organik, menjadikannya selaras dengan prinsip ekonomi kitaran dan bioekonomi mampan (da Silva & Hesselberg 2020). Di samping itu, BSFL turut menunjukkan potensi antimikrob melalui penghasilan peptida bioaktif, serta keupayaan bio-pemulihan logam berat tertentu, walaupun penilaian risiko lanjut masih diperlukan sebelum aplikasi berskala besar (Vogel et al. 2018; Zhang et al. 2021). Secara keseluruhannya, BSFL merupakan agen biopenukaran yang strategik untuk pemanfaatan sisa agroindustri, termasuk sisa kulit nanas, dalam sistem pengurusan sisa organik yang mampan.

PRESTASI BIOPENUKARAN SISA KULIT NANAS OLEH BSFL

Prestasi biopenukaran sisa kulit nanas oleh BSFL perlu dinilai secara menyeluruh kerana kecekapan proses tidak hanya ditentukan oleh panjang larva atau saiz pra-pupa. Penilaian yang lebih seimbang perlu merangkumi berat biojisim, kadar kelangsungan hidup, tempoh perkembangan, kadar penggunaan substrat, indeks pengurangan sisa, kecekapan biopenukaran, komposisi nutrisi larva dan kestabilan fras. Pendekatan ini penting kerana substrat buah biasanya mempunyai kandungan air dan karbohidrat yang tinggi tetapi protein yang rendah, menyebabkan prestasinya bergantung kepada formulasi, fermentasi dan kawalan kelembapan.

Kajian terkini oleh Rahayu et al. (2025) menunjukkan bahawa fermentasi sisa buah menggunakan mikroorganisma berkesan dapat meningkatkan keutamaan oviposisi dan prestasi BSFL. Keputusan ini penting dalam konteks kulit nanas kerana substrat ini kaya dengan gula larut, mudah mengalami fermentasi dan menghasilkan sebatian mudah meruap yang boleh menarik lalat betina untuk bertelur. Walau bagaimanapun, fermentasi perlu dikawal supaya tidak menghasilkan substrat terlalu berasid, terlalu basah atau anaerobik yang boleh mengurangkan pengambilan makanan dan menjejaskan pertumbuhan larva.

Kajian Lopes, Silva dan Andrade (2025) pula menunjukkan bahawa pencampuran sisa akuakultur dengan hasil sampingan sayuran boleh menghasilkan kecekapan biopenukaran melebihi 20% bahan kering, pengurangan bahan melebihi 55% bahan kering dan protein larva melebihi 35% bahan kering. Walaupun kajian ini tidak menggunakan kulit nanas, keputusan tersebut menyokong prinsip bahawa substrat tumbuhan yang rendah protein lebih berkesan apabila dicampurkan dengan bahan kaya nitrogen atau protein. Prinsip ini relevan kepada kulit nanas kerana substrat ini lebih sesuai sebagai sumber tenaga dan kelembapan berbanding sumber protein utama.



RAJAH 3. Kitar hidup lalat askar hitam

Dalam kajian Pradabphetrat, Sathawong dan Pimsen (2024), BSFL yang diberi kulit nanas mencatatkan panjang larva 10.6 ± 0.2 mm dan panjang pra-pupa 15.2 ± 0.4 mm, lebih tinggi berbanding kulit pisang, kulit durian dan sisa sayuran dalam keadaan uji kaji yang sama. Namun, keputusan ini perlu ditafsir sebagai kelebihan pertumbuhan morfologi, bukan bukti bahawa kulit nanas sentiasa menghasilkan biojisim tertinggi. Kajian yang sama melaporkan protein larva segar daripada kulit nanas hanya 9.25 g/100 g, lemak 7.20 g/100 g dan kelembapan larva 79.65%. Fras daripada kulit nanas juga terlalu cair untuk dianalisis sebagai baja, menunjukkan bahawa kelembapan tinggi merupakan kekangan utama penggunaan kulit nanas sebagai substrat tunggal.

Keputusan tersebut disokong oleh Lamin et al. (2024), yang menunjukkan bahawa campuran kek isirong sawit (PKC) dan kulit nanas terfermentasi EM4 mempengaruhi kadar penggunaan, kecekapan penukaran dan pertumbuhan larva. Walaupun media terbaik dalam kajian tersebut ialah 100% dedak terfermentasi, hasil ini menunjukkan bahawa kulit nanas perlu diseimbangkan dengan bahan lain yang lebih stabil dari segi protein, serat dan struktur fizikal. Hermansyah, Putra dan Riyanti (2023) turut melaporkan bahawa formulasi 75% kulit nanas, 25% dedak padi dan 0.25% molases mempunyai potensi ekonomi dengan nilai nisbah hasil kepada kos (*R/C ratio*) melebihi 1, walaupun perbezaan komposisi tidak memberikan kesan signifikan terhadap beberapa parameter seperti suhu, tempoh penetasan dan berat sisa.

Perbandingan dengan sisa buah lain juga menunjukkan bahawa kulit nanas tidak semestinya menjadi substrat terbaik apabila digunakan secara tunggal. Syahputra, Hasan dan Manullang (2023) melaporkan bahawa rawatan 100% sisa nanas menghasilkan biojisim larva 1.347 g, manakala campuran 30% betik, 40% nanas dan 30% tembikai menghasilkan biojisim lebih tinggi, iaitu 2.077 g. Panjang larva bagi rawatan 100% nanas ialah 0.53 cm, lebih rendah berbanding 0.60 cm bagi rawatan campuran. Ini menunjukkan bahawa gabungan beberapa sisa buah boleh menyediakan keseimbangan nutrien dan kelembapan yang lebih baik berbanding kulit nanas sahaja.

Bukti daripada substrat buah lain mengukuhkan keperluan pencampuran bahan kaya protein. Isibika et al. (2021) mendapati bahawa penambahan 25% sisa ikan kepada kulit pisang dan kulit oren meningkatkan kecekapan biopenukaran daripada 4.5 ± 1.3% kepada 12.3 ± 2.1%. Walaupun kajian ini tidak menggunakan kulit nanas, prinsipnya sesuai digunakan kerana kulit nanas juga tergolong sebagai substrat buah yang tinggi karbohidrat tetapi rendah protein. Fuso et al. (2021) pula menunjukkan bahawa komposisi substrat mempengaruhi kandungan protein dan asid amino pra-pupa BSFL, termasuk lisina, valina dan leusina. Oleh itu, pertumbuhan morfologi yang baik tidak semestinya menjamin kualiti nutrisi larva yang optimum.

Berdasarkan Jadual 2, kulit nanas mempunyai potensi sebagai substrat tenaga, bahan fermentasi dan agen penarik oviposisi. Walau bagaimanapun, bukti daripada beberapa kajian menunjukkan bahawa kulit nanas tidak boleh disimpulkan sebagai substrat terbaik secara mutlak, khususnya apabila digunakan sebagai suapan tunggal. Kulit nanas mempunyai kelebihan dari segi gula larut, kelembapan dan tekstur lembut, tetapi kandungan protein yang rendah serta kandungan air yang tinggi boleh mengehadkan kestabilan fras dan kualiti nutrisi larva. Oleh itu, pendekatan yang lebih sesuai ialah menggunakan kulit nanas dalam substrat campuran bersama bahan kering atau kaya protein seperti dedak, sisa makanan, hampas soya atau sisa ikan.

NILAI EKONOMI PRODUK BIOPENUKARAN

Biopenukaran sisa kulit nanas menggunakan BSFL menghasilkan dua produk utama yang mempunyai nilai ekonomi, iaitu biojisim larva dan fras. Nilai komersial kedua-dua produk ini bergantung pada komposisi substrat, prestasi pertumbuhan larva, tahap pemprosesan produk, keselamatan bahan mentah dan permintaan pasaran. Dalam konteks kulit nanas, kandungan gula dan kelembapan yang tinggi menyokong aktiviti larva, tetapi kandungan protein yang relatif rendah menunjukkan bahawa substrat ini lebih sesuai digunakan bersama bahan yang kaya protein bagi meningkatkan kualiti nutrisi biojisim larva (Meena et al. 2022; Pradabphetrat, Sathawong & Pimsen 2024).

Dari perspektif makanan ternakan, biojisim BSFL semakin mendapat perhatian sebagai sumber protein dan lipid alternatif bagi mengurangkan kebergantungan kepada tepung ikan dan dedak soya. Larva mengandungi protein, lemak, mineral serta asid amino perlu seperti lisina, metionina dan treonina yang penting untuk ternakan monogastrik dan akuakultur (Ebeneezar, Gunasekaran & Balasubramanian 2021; Lu et al. 2022). Kandungan lipidnya pula lazimnya mengandungi asid laurik yang mempunyai potensi antimikrob serta boleh menyokong kesihatan saluran pencernaan haiwan (Lu et al. 2022; Suryati, Astuti & Setyawati 2023). Walau bagaimanapun, komposisi nutrisi larva dipengaruhi secara langsung oleh jenis dan nisbah substrat yang digunakan.

Kajian pemakanan menunjukkan bahawa penggantian sebahagian protein konvensional dengan tepung BSFL boleh dilaksanakan dalam diet unggas dan ikan tanpa menjejaskan pertumbuhan atau nisbah penukaran makanan apabila formulasi diet diseimbangkan dengan betul (Batool, Tabinda & Tahir 2024; Lu et al. 2022). Dalam akuakultur, tepung larva berpotensi menggantikan sebahagian tepung ikan, manakala bagi ruminan, larva yang telah diproses atau dinyahlemak boleh digunakan sebagai sumber protein tambahan tanpa memberikan kesan negatif yang ketara terhadap fermentasi rumen pada kadar penggunaan yang sesuai (Zou et al. 2024). Oleh itu, penggunaan kulit nanas dalam substrat campuran

berpotensi mengurangkan kos bahan mentah sambil menghasilkan biojisim larva untuk pasaran makanan ternakan.

Selain biojisim larva, fras yang dihasilkan daripada proses biopenukaran mempunyai potensi ekonomi sebagai baja organik, bahan pembaik tanah dan baja berfungsi. Seperti ditunjukkan dalam Rajah 4, fras BSFL mengandungi nutrien makro seperti nitrogen, fosforus dan kalium, bahan organik, kitin serta komuniti mikroorganisma yang berpotensi menyokong kesihatan tanah dan pertumbuhan tanaman (Abd Manan et al. 2024; Beesigamukama et al. 2021). Komposisi dan kualiti fras bagaimanapun dipengaruhi oleh substrat, tempoh rawatan, kelembapan, proses pengasingan dan tahap pematangan selepas penuaian.

Kajian terdahulu menunjukkan bahawa penggunaan fras pada kadar yang sesuai boleh meningkatkan ketersediaan nutrien, aktiviti mikroorganisma tanah, pertumbuhan tanaman dan kecekapan penggunaan nitrogen (Abd Manan et al. 2024; Beesigamukama et al. 2021). Pengkomposan atau pematangan lanjut fras bersama bahan tambahan seperti sisa ikan, bahan kaya karbon atau abu pertanian juga berpotensi meningkatkan kestabilan, kematangan dan kandungan nutriennya (Woo, Kim & Park 2024). Selain nilai pembajaan, kandungan kitin dan mikroorganisma antagonistik dalam fras berpotensi menyokong penindasan patogen tanah dan merangsang tindak balas pertahanan tanaman (Arabzadeh et al. 2023; Chavez & Uchanski 2021).

Dari sudut pengurusan sisa, biopenukaran BSFL boleh menghasilkan manfaat ekonomi melalui pengurangan kos pengangkutan dan pelupusan, rawatan sisa di punca serta penjanaan produk bernilai tambah. Kajian perintis di industri pemprosesan buah di Sri Lanka menunjukkan kebolehlaksanaan rawatan sisa kulit buah menggunakan BSFL pada skala tapak pengeluaran, termasuk penilaian kos dan manfaat operasi (Perera et al. 2022). Di Indonesia, BSFL dilaporkan dapat mengurangkan sehingga 84.5% sisa organik di bawah keadaan operasi tertentu, menunjukkan potensi pengurangan beban sisa dan kos rawatan akhir (Amin, Lando & Djamaluddin 2024).

Walau bagaimanapun, keuntungan sebenar sistem berasaskan kulit nanas bergantung pada kos pengumpulan, pengecilan saiz sisa, pengawalan kelembapan, bahan campuran, tenaga, tenaga kerja, pengeringan larva, pematangan fras dan pematuhan kepada piawaian keselamatan. Kandungan air kulit nanas yang tinggi boleh meningkatkan kos pengendalian dan menghasilkan fras yang terlalu basah jika substrat tidak diseimbangkan dengan bahan kering. Oleh itu, analisis ekonomi perlu merangkumi keseluruhan rantaian nilai, termasuk kos operasi, hasil biojisim, harga produk, kebolehcapaian pasaran dan potensi penjimatan kos pelupusan.

Peluang pengkomersialan BSFL tidak terhad kepada makanan ternakan dan baja. Lemak larva berpotensi diproses untuk penghasilan biodiesel, surfaktan, bahan kosmetik dan produk oleokimia, manakala protein, kitin, kitosan dan peptida bioaktif mempunyai potensi dalam produk makanan, pembungkusan, pertanian dan bioperubatan (Wilson, Ray & Lohakare 2025). Kepelbagaian produk ini membolehkan sistem BSFL berkembang sebagai kilang pemurnian biologi bersepadu yang menghasilkan beberapa aliran pendapatan daripada satu aliran sisa.

Ringkasan sektor pasaran, aplikasi komersial dan negara yang menunjukkan aktiviti penyelidikan atau potensi pasaran bagi produk BSFL diberikan dalam Jadual 3. Negara yang disenaraikan tidak menunjukkan kedudukan atau saiz pasaran secara mutlak, tetapi mencerminkan lokasi kajian, pembangunan industri, ketersediaan bahan mentah dan potensi penerimaan produk larva lalat askar hitam.

IMPLIKASI ALAM SEKITAR, KESIHATAN DAN KESELAMATAN PRODUK

Penggunaan larva lalat askar hitam dalam rawatan sisa organik, termasuk sisa kulit nanas, memberikan implikasi



RAJAH 4. Fras larva lalat askar hitam

JADUAL 2. Prestasi larva lalat askar hitam menggunakan kulit nanas dan substrat organik berkaitan

Kajian	Negara/ Konteks	Substrat/ Rawatan	Keputusan utama	Interpretasi terhadap kulit nanas
Rahayu et al. (2025)	Indonesia	Sisa buah terfermentasi menggunakan mikroorganisma efektif	Fermentasi meningkatkan keutamaan oviposisi dan prestasi BSFL	Fermentasi berpotensi meningkatkan kebolehgunaan kulit nanas melalui perubahan pH, aktiviti mikrobiota dan penghasilan sebatian mudah meruap
Pradabphetrat, Sathawong & Pimsen (2024)	Thailand	Kulit nanas, kulit pisang, kulit durian dan sisa sayuran	Kulit nanas menghasilkan panjang larva 10.6 ± 0.2 mm, panjang pra-pupa 15.2 ± 0.4 mm, protein larva segar 9.25 g/100 g, lemak 7.20 g/100 g dan kelembapan larva 79.65%	Kulit nanas menunjukkan pertumbuhan morfologi yang baik, tetapi fras terlalu cair dan memerlukan bahan penyerap atau substrat campuran
Lamin et al. (2024)	Indonesia	Bungkil inti sawit dan kulit nanas terfermentasi EM4	Formulasi dan fermentasi mempengaruhi kadar konsumsi, efisiensi konversi dan pertumbuhan maggot	Kulit nanas perlu diseimbangkan dengan bahan lain yang lebih stabil dari segi protein, serat dan struktur fizikal
Syahputra, Hasan & Manullang (2023)	Indonesia	100% betik, 100% nanas, 100% tembikai dan campuran 30% betik + 40% nanas + 30% tembikai	100% nanas menghasilkan biojisim 1,347 g, manakala campuran buah menghasilkan biojisim lebih tinggi, iaitu 2,077 g. Panjang larva bagi 100% nanas ialah 0.53 cm, berbanding 0.60 cm bagi campuran buah	Kulit nanas sebagai substrat tunggal tidak semestinya memberikan prestasi tertinggi; campuran beberapa sisa buah lebih seimbang untuk pertumbuhan larva
Hermansyah, Putra & Riyanti (2023)	Indonesia	50% kulit nanas + 50% dedak padi + 0.25% molases; 75% kulit nanas + 25% dedak padi + 0.25% molases	Perbezaan formulasi memberi kesan signifikan terhadap panjang maggot pada hari ke-16; formulasi 75% kulit nanas menunjukkan *R/C ratio* > 1	Kulit nanas boleh digunakan pada kadar tinggi jika dicampur dengan dedak dan molases bagi meningkatkan struktur substrat dan kelayakan operasi
Fuso et al. (2021)	Itali	Pelbagai hasil sampingan buah dan sayuran sebagai substrat larva lalat askar hitam	Komposisi substrat mempengaruhi kandungan protein dan asid amino pra-pupa, termasuk lisina, valina dan leusina	Pertumbuhan morfologi larva perlu dikaitkan dengan kualiti nutrisi, khususnya protein dan profil asid amino, bukan panjang atau berat larva sahaja

alam sekitar dan kesihatan yang signifikan dalam konteks pengurusan sisa mampan. Proses biopenukaran oleh larva lalat askar hitam berkesan mengurangkan isi padu dan jisim sisa organik antara 50% hingga 85%, sekali gus mengurangkan keperluan pelupusan akhir, tekanan terhadap tapak pelupusan serta risiko pembentukan larut lesap dan pencemaran tanah dan air bawah tanah (Amin, Lando & Djamaluddin 2024; Yudistira, Pratama & Nugroho 2025). Di samping itu, rawatan sisa menggunakan BSFL dilaporkan menghasilkan pelepasan gas rumah hijau yang lebih rendah berbanding kaedah pelupusan konvensional, khususnya metana, yang menyumbang kepada mitigasi perubahan iklim.

Dari perspektif kesihatan dan pencemaran, interaksi larva–mikrob dalam substrat mempercepatkan degradasi bahan organik dan mengurangkan beban patogen. Pengurangan kulat fitopatogen dan mikroorganisma penunjuk pencemaran telah dilaporkan, meningkatkan keselamatan sisa terawat sebelum digunakan semula dalam sistem pertanian (Liang, Zhang & Chen 2024; Schwarz, Müller & Ponsa 2019). Walau bagaimanapun, keselamatan biojisim larva sebagai bahan makanan ternakan memerlukan perhatian, khususnya berkaitan risiko pengumpulan logam berat dan pencemaran mikrobiologi. Kajian menunjukkan risiko ini boleh diminimumkan melalui pemilihan substrat yang sesuai, pemantauan berkala dan rawatan pasca-penuaian bagi

JADUAL 3. Peluang pasaran dan potensi pengkomersilan produk BSFL

Sektor pasaran	Produk utama	Aplikasi komersil	Negara/pasaran berpotensi	Rujukan
Pengurusan sisa	Perkhidmatan rawatan sisa	Pengurangan kos & pemulihan sumber	Sri Lanka, Indonesia dan Malaysia	Perera et al. (2022); Amin, Lando & Djamaluddin (2024)
Makanan ternakan	Biojisim BSFL	Protein & lipid alternatif	Malaysia, Pakistan, China, Thailand dan Kenya	Lu et al. (2022); Batool, Tabinda & Tahir (2024)
Pertanian	Fras BSFL	Baja organik & baja berfungsi	Malaysia, Kenya, Singapura dan Nepal	Abd Manan et al. (2024);
Industri bioproduk	Lemak BSFL	Biodiesel, kosmetik, surfaktan	Indonesia, China, Kesatuan Eropah dan pasaran global	Suryati, Astuti & Setyawati (2023); Wilson, Ray & Lohakare (2025)
Bioperubatan & makanan	Ekstrak bioaktif	Antimikrob & kestabilan produk	Jerman, Afrika Selatan, Kesatuan Eropah dan pasaran global	Arabzadeh et al. (2023)

mematuhi piawaian keselamatan makanan dan makanan ternakan (Alharthi, Albogami & Alsubaie 2025; Shelomi 2024).

Fras BSFL memainkan peranan penting dalam meningkatkan kesihatan tanah dan kesuburan agroekosistem melalui sumbangan nutrien makro, bahan organik dan mikroorganisma berfaedah. Aplikasi fras dilaporkan memperbaiki struktur tanah, aktiviti mikrobiologi dan ketersediaan nutrien, serta meningkatkan pertumbuhan dan hasil tanaman (Amorim, Rodrigues & Cardoso 2025; Wang, Shelomi & Chen 2021). Selain itu, komponen bioaktif seperti kitin dan mikroorganisma antagonistik berpotensi menekan patogen tanah. Namun, kadar aplikasi yang berlebihan atau fras yang tidak stabil boleh menyebabkan fitotoksisiti dan gangguan keseimbangan mikrobiologi tanah, manakala kehadiran pencemar seperti mikroplastik memerlukan pemantauan lanjut (Proctor, Smith & Thompson 2025).

Aspek keselamatan produk perlu diberikan perhatian khusus kerana biojisim larva berpotensi digunakan sebagai bahan makanan ternakan, manakala fras digunakan sebagai bahan pembaik tanah atau baja organik. Keselamatan biojisim larva perlu dinilai berdasarkan risiko pengumpulan logam berat, residu racun perosak, mikroplastik, patogen dan mikotoksin. Larva berpotensi menyerap atau mengumpulkan bahan tertentu daripada substrat, manakala pencemaran mikrobiologi boleh berlaku melalui pengendalian, penyimpanan dan pemprosesan yang tidak terkawal. Risiko tersebut boleh diminimumkan melalui pemilihan bahan mentah yang sesuai, pemantauan substrat secara berkala, amalan kebersihan yang baik serta rawatan pasca-penuaian seperti pencucian, pengeringan atau pemanasan bagi memenuhi piawaian keselamatan makanan ternakan (Alharthi, Albogami & Alsubaie 2025; Shelomi 2024).

Secara keseluruhannya, implikasi alam sekitar, kesihatan dan keselamatan produk hasil penggunaan BSFL adalah positif dan merangkumi pengurangan sisa dan pencemaran, peningkatan keselamatan sisa terawat serta sokongan kepada agroekologi mampan. Dengan kawalan operasi, penyeragaman kualiti dan pematuhan piawaian keselamatan, kaedah biopenukaran BSFL berpotensi menjadi penyelesaian lestari yang menyumbang kepada perlindungan alam sekitar, keselamatan makanan dan kesihatan awam (Bermúdez-Serrano & Sánchez-Velázquez 2023; Wilson, Ray & Lohakare 2025).

INOVASI TEKNOLOGI DAN ARAH PENYELIDIKAN BAGI PENGOPTIMUMAN BIOPENUKARAN KULIT NANAS OLEH BSFL

Perkembangan kaedah biopenukaran menggunakan BSFL menunjukkan potensi besar untuk berkembang daripada kaedah rawatan sisa konvensional kepada sistem bioekonomi bersepadu yang berkecekapan tinggi. Antara inovasi utama ialah integrasi BSFL dengan bioteknologi fermentasi dan bioaugmentasi bagi meningkatkan kebolehcernaan substrat, kestabilan proses dan prestasi pertumbuhan larva. Pra-rawatan fermentasi menggunakan konsortium mikroorganisma terpilih dilaporkan mampu mempercepatkan degradasi lignoselulosa dan meningkatkan ketersediaan nutrien dalam sisa agroindustri seperti kulit nanas, sekali gus meningkatkan kadar pertumbuhan larva dan kecekapan pengurangan sisa (Memon, Qureshi & Siddiqui 2025; Quan, Liu & Chen 2023). Pendekatan bioaugmentasi yang menyasarkan mikrobiota substrat dan usus larva turut dikenal pasti berpotensi menstabilkan prestasi biopenukaran merentasi variasi kualiti sisa input (Li, Zhang & Liu 2026).

Integrasi sistem Internet Kebendaan (IoT), automasi dan reka bentuk reaktor baharu berperanan penting dalam meningkatkan kecekapan penggunaan kulit nanas sebagai substrat BSFL, khususnya bagi operasi berskala besar dan industri. Hal ini kerana kulit nanas mempunyai kelembapan tinggi, pH berasid, kandungan gula larut yang tinggi dan mudah mengalami fermentasi, yang boleh mempengaruhi kestabilan substrat serta pertumbuhan larva (Meena et al. 2022; Pradabphetrat, Sathawong & Pimsen 2024). Pemantauan masa nyata melalui sensor suhu, kelembapan, pH, pengudaraan dan kepadatan larva membolehkan keadaan optimum dikawal dengan lebih tepat, selari dengan penggunaan IoT dalam pemantauan parameter ternakan BSFL dan model pertumbuhan dinamik yang menekankan kepentingan suhu, kualiti suapan, kadar pemberian makanan, kelembapan dan aliran udara (Van, Pham & Nguyen 2022).

Bagi aplikasi industri, sistem automasi boleh diintegrasikan dengan reaktor modular, sistem pemberian makanan automatik, pengudaraan terkawal, pencampuran mekanikal, pemisahan larva-fras secara automatik dan papan pemuka digital untuk memantau prestasi proses secara berterusan. Data sensor membolehkan pelarasan automatik terhadap kadar pemberian kulit nanas, penambahan bahan penyerap kering, kawalan kelembapan, pengaktifan pengudaraan dan kekerapan pencampuran bagi mengelakkan keadaan anaerobik. Pendekatan ini disokong oleh pembangunan sistem penternakan automatik, tong pintar, reaktor modular dan sistem pemberian makanan automatik yang dapat meningkatkan kebolehulangan proses, penggunaan ruang, kawalan kualiti serta mengurangkan kebergantungan kepada buruh manual (Du et al. 2025; Erbland, Alyokhin & Peterson 2021; Urrutia Avila et al. 2022). Dalam konteks kulit nanas, automasi berskala industri penting untuk mengurangkan masalah fras terlalu cair, bau, keasidan berlebihan dan kemerosotan kelangsungan hidup larva akibat kelembapan substrat yang tidak terkawal (Cheng, Chiu & Lo 2017).

Dalam konteks agroindustri nanas, konsep kilang pemurnian biologi nanas yang mengintegrasikan BSFL sebagai komponen teras rantaian nilai bioekonomi menawarkan hala tuju strategik. Pendekatan ini membolehkan pemulihan sumber secara berperingkat melalui penghasilan biojisim larva, fras, serta integrasi dengan kaedah lain seperti pengkomposan dan pencernaan anaerobik bagi memaksimumkan kecekapan dan meminimumkan sisa baki (Tariq, Khan & Rehman 2025). Walau bagaimanapun, pembangunan kaedah biopenukaran BSFL masih memerlukan sokongan penyelidikan lanjut melalui kajian penilaian kitar hayat (LCA), piawaian parameter operasi dan analisis kebolehlaksanaan industri, di samping menangani jurang pengetahuan berkaitan interaksi mikrobiologi, pemindahan bahan cemar dan penerimaan pasaran (Anokye 2025; Ferronato, Torretta & Ragazzi 2024; Ramzy, Abdel-Hadi & El-Sayed 2025). Secara keseluruhannya, pembangunan sistem BSFL-nanas memerlukan pendekatan bersepadu yang menggabungkan inovasi teknologi, pendigitalan dan sokongan dasar bagi menyokong transformasi agroindustri mampan berasaskan ekonomi kitaran.

KESIMPULAN

Ulasan sistematik ini menegaskan bahawa kebaharuan kajian terletak pada penilaian khusus terhadap sisa kulit nanas sebagai substrat biopenukaran BSFL, bukan sekadar membincangkan lalat askar hitam secara umum. Kulit nanas dikenal pasti sebagai substrat berpotensi kerana kandungan gula larut, karbohidrat, kelembapan dan jumlah pepejal terlarut yang tinggi, namun penggunaannya sebagai substrat tunggal mempunyai kekangan dari segi pH berasid, protein rendah, kelembapan berlebihan serta fraksi pektin dan lignoselulosa yang boleh menjejaskan pengudaraan, kestabilan fras dan kecekapan proses. Dari sudut aplikasi praktikal, kulit nenas lebih sesuai digunakan sebagai komponen dalam substrat campuran bersama bahan sampingan agroindustri seperti hampas kelapa, hampas soya, sisa makanan atau sisa ikan bagi menyeimbangkan kelembapan, meningkatkan nilai nutrisi dan memperbaiki struktur substrat. Prarawatan melalui pemotongan, fermentasi terkawal, bioaugmentasi serta pemantauan parameter operasi seperti pH, kelembapan dan nisbah campuran turut penting bagi meningkatkan kebolehcernaan substrat dan kestabilan produk akhir. Oleh itu, ulasan ini penting dalam menyediakan asas saintifik dan panduan praktikal untuk mengoptimumkan penggunaan sisa kulit nanas dalam sistem biopenukaran BSF yang lebih terkawal, selamat dan berpotensi menyokong pengurusan sisa agroindustri serta pembangunan ekonomi kitaran.

PENGHARGAAN

Kami ingin merakamkan penghargaan dan ucapan terima kasih kepada Kementerian Pendidikan Tinggi Malaysia atas sokongan kewangan yang disalurkan melalui Skim Geran Penyelidikan Fundamental (FRGS) di bawah Nombor Projek FRGS/1/2023/TK08/UKM/03/3 dan Geran Translational KPT TRANSLATIONAL-2023-001, yang telah memungkinkan pelaksanaan dan penerbitan kajian ini.

RUJUKAN

Abd Manan, F., Yeoh, Y.K., Chai, T.T. & Wong, F.C. 2024. Unlocking the potential of black soldier fly frass as a sustainable organic fertilizer: Nutrient composition, soil health and agronomic performance. *Journal of Environmental Management* 351: 119706. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119706

Alharthi, S.S., Albogami, S. & Alsubaie, A. 2025. Microbiological safety and hazard assessment of black soldier fly larvae used in animal feed. *Journal of Food Safety* 45(1): e13118. https://doi.org/10.1111/jfs.13118

Amin, U.K., Lando, A.T. & Djamaluddin, I. 2024. Potential of black soldier fly larvae in reduction of various types of organic waste. *Ecological Engineering and Environmental Technology* 25(1): 47-55. https://doi.org/10.12912/27197050/178821

Amorim, A.M., Rodrigues, J.L.M. & Cardoso, E.J.B.N. 2025. Effects of insect frass on soil fertility, microbial biomass and crop productivity. *Soil Biology and Biochemistry* 191: 109189. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2024.109189

Anokye, K. 2025. Black soldier fly larvae as a circular solution for organic waste management and sustainable livestock feed in Ghana. *Cleaner Waste Systems* 6: 100092. https://doi.org/10.1016/j.clwas.2024.100092

Arabzadeh, N., Hagn, A., Kublik, S. & Schloter, M. 2023. Black soldier fly frass shapes soil microbial communities and suppresses soil-borne plant pathogens. *Applied Soil Ecology* 186: 104799. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.104799

Batool, M., Tabinda, A.B. & Tahir, A. 2024. Black soldier fly larvae feed suitability for chicken and prospects for economic valuation and viability aspects. *Journal of Insects as Food and Feed* 10(2): 231-244. https://doi.org/10.3920/JIFF2023.0057

Beesigamukama, S., Mochoge, B., Korir, N.K., Fiaboe, K.K.M., Nakimbugwe, D., Khamis, F.M., Subramanian, S. & Tanga, C.M. 2021. Nutrient quality of black soldier fly frass and its effect on soil fertility and crop productivity. *Journal of Insects as Food and Feed* 7(4): 559-574. https://doi.org/10.3920/JIFF2020.0049

Bermúdez-Serrano, I.M. & Sánchez-Velázquez, L.R. 2023. Agroecological integration of insects for sustainable nutrient cycling. *Agronomy for Sustainable Development* 43: 62. https://doi.org/10.1007/s13593-023-00892-6

Boafo, H.A., Gbemavo, D.S.J.C., Timpong-Jones, E.C., Eziah, V.Y., Billah, M.K., Chia, S.Y., Aidoo, O.F., Clottey, V.A. & Kenis, M. 2022. Substrates most preferred for black soldier fly *Hermetia illucens* (L.) oviposition are not the most suitable for their larval development. *Journal of Insects as Food and Feed* 9(2): 183-192. https://doi.org/10.3920/jiff2022.0034

Chavez, A. & Uchanski, M. 2021. Chitin-based soil amendments and induced plant resistance: A review. *Agronomy* 11(3): 493. https://doi.org/10.3390/agronomy11030493

Cheng, J.Y.K., Chiu, S.L.H. & Lo, I.M.C. 2017. Effects of moisture content of food waste on residue separation, larval growth and larval survival in black soldier fly bioconversion. *Waste Management* 67: 315-323. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.05.046

da Silva, G.D.P. & Hesselberg, T. 2020. A review of the use of black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), to compost organic waste in tropical regions. *Neotropical Entomology* 49(2): 151-162. https://doi.org/10.1007/S13744-019-00719-Z

dos Anjos, M.M., da Silva, A.A., de Pascoli, I.C., Mikcha, J.M., Machinski Jr. M., Peralta, R.M. & de Abreu Filho, B.A. 2016. Antibacterial activity of papain and bromelain on *Alicyclobacillus* spp. *International Journal of Food Microbiology* 216: 121-126. https://doi.org/10.1016/J.IJFOODMICRO.2015.10.007

Du, L., Zhang, Y., Chen, Y. & Wang, X. 2025. Design and optimization of continuous-flow black soldier fly larvae reactors for organic waste valorisation. *Bioresource Technology* 388: 129722. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.129722

Ebeneezar, S., Gunasekaran, M. & Balasubramanian, S. 2021. Nutritional evaluation and bioconversion performance of black soldier fly larvae valorized from food waste. *Environmental Technology & Innovation* 24: 101873. https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.101873

Erbland, P., Alyokhin, A. & Peterson, M. 2021. An automated incubator for rearing black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*). *Transactions of the ASABE 64*(6): 1989-1997. https://doi.org/10.13031/trans.14623

FAO. 2024. *Global Pineapple Production Statistics*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd3818en

Ferronato, N., Torretta, V. & Ragazzi, M. 2024. Life cycle assessment of insect-based organic waste treatment technologies. *Journal of Cleaner Production* 421: 138394. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138394

Fuso, A., Barbi, S., Macavei, L.I., Luparelli, A.V., Maistrello, L., Montorsi, M., Sforza, S. & Caligiani, A. 2021. Effect of the rearing substrate on total protein and amino acidcomposition in black soldier fly. *Foods* 10(8): 1773. https://doi.org/10.3390/foods10081773

Hermansyah, H., Putra, K. & Riyanti, L. 2023. Pemanfaatan kulit nanas sebagai media pertumbuhan maggot black soldier fly. *Jurnal Triton 14*(1): 10-17. https://doi.org/10.47687/jt.v14i1.365

Isibika, A., Vinnerås, B., Kibazohi, O., Zurbrügg, C. & Lalander, C. 2021. Co-composting of banana peel and orange peel waste with fish waste to improve conversion by black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.), Diptera: Stratiomyidae) larvae. *Journal of Cleaner Production* 318: 128570. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128570

Jacqueline, P.J. & Velvizhi, G. 2024. Substantial physicochemical pretreatment and rapid delignification of lignocellulosic banana, pineapple and papaya fruit peels: A study on physical-chemical characterization. *Sustainable Chemistry and Pharmacy* 37: 101347. https://doi.org/10.1016/j.scp.2023.101347

Kieβling, M., Franke, K-P., Heinz, V. & Aganovic, K. 2023. Relationship between substrate composition and larval weight: A simple growth model for black soldier fly larvae. *Journal of Insects as Food and Feed* 9(8): 1027-1036. https://doi.org/10.3920/jiff2022.0096

Ketnawa, S., Chaiwut, P. & Rawdkuen, S. 2011. Aqueous two-phase extraction of bromelain from pineapple peels ('Phu Lae' cultv.) and its biochemical properties. *Food Science and Biotechnology* 20(5): 1219-1226. https://doi.org/10.1007/s10068-011-0168-5

Lamin, S., Nofyan, E., Kirin, R.A. & Juswardi. 2024. Evaluasi bungkil inti sawit dan kulit nanas sebagai media tumbuh dan berkembang maggot *Hermetia illucens* L. *Jurnal Penelitian Sains 26*(3): 324-332. https://doi.org/10.56064/jps.v26i3.1086

Li, W., Zhang, H. & Liu, G. 2026. Gut microbiota engineering of black soldier fly larvae for enhanced bioconversion efficiency. *Trends in Biotechnology* 44(1): 15-27. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2025.03.002

Liang, Y., Zhang, J. & Chen, H. 2024. Suppression of soil-borne pathogens by black soldier fly frass and associated microbial communities. *Applied Soil Ecology* 190: 104850. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.104850

Lopes, F.M., Silva, M.C. & Andrade, T.S. 2022. Bioactive compound preservation in insect-derived extracts. *Food Chemistry Advances* 8(2): 100-112. https://doi.org/10.1016/j.focha.2022.100134

Lu, F., Liu, X., Li, S. & Wang, Y. 2022. Black soldier fly larvae as a sustainable protein source in poultry diets: A review. *Journal of Insects as Food and Feed* 8(3): 265-278. https://doi.org/10.3920/JIFF2021.0056

Meena, L., Sengar, A.S., Neog, R. & Sunil, C.K. 2022. Pineapple processing waste (PPW): Bioactive compounds, their extraction, and utilisation: A review. *Journal of Food Science and Technology* 59: 4152-4164. https://doi.org/10.1007/s13197-022-05539-9

Memon, S.A., Qureshi, T.A. & Siddiqui, P.J.A. 2025. Fermentation-assisted bioconversion of agro-industrial waste using black soldier fly larvae. *Bioresource Technology Reports* 21: 101459. https://doi.org/10.1016/j.biteb.2024.101459

Mendez-Encinas, M.A., García-Moreno, P.J., Guadix, A. & Guadix, E.M. 2020. Pineapple processing by-products: Composition and valorisation. *Food Research International* 137: 109430. https://doi.org/10.1016/j.foodres.2020.109430

Nadzirah, K.Z., Zainal, S., Noriham, A., Normah, I., Roha, A.M.S. & Nadya, H. 2013. Physico-chemical properties of pineapple variety N36 harvested and stored at different maturity stages. *International Food Research Journal* 20(1): 225-231.

Nguyen, A.N., Huynh, V.T., Le, P.N.T., Nguyen, D.T., Tran, D.T.N. & Le, P.H. 2025. Current status, challenges, and valorization strategies in pineapple processing waste management: A review. *International Journal of Scholarly Research in Biology and Pharmacy* 6(2): 011-021. https://doi.org/10.56781/ijsrbp.2025.6.2.0027

Nualkaekul, S. & Charalampopoulos, D. 2011. Survival of *Lactobacillus plantarum* in model solutions and fruit juices. *International Journal of Food Microbiology* 146(2): 111-117. https://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2011.01.040

Oyoo, V., Riungu, J., Dey, P., Kirimi, J.G. & Matheka, R.M. 2023. Process performance evaluation of faecal matter treatment via black soldier fly. *Journal of Water Sanitation and Hygiene for Development* 13(6): 441-452. https://doi.org/10.2166/washdev.2023.010

Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L.A., Stewart, L.A., Thomas, J., Tricco, A.C., Welch, V.A., Whiting, P. & Moher, D. 2021. The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *PLOS Medicine* 18(3): e1003583. https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1003583

Perera, K.S.L., Liyanage, C.J., Jinadasa, H.R.N., Karunaratne, W.A.I.P. & Wijesekara, S.G. 2022. Resource-efficient and eco-friendly model for fruit processing industry waste valorisation using black soldier fly larvae under tropical conditions. *Journal of Insects as Food and Feed* 8(6): 607-620. https://doi.org/10.3920/JIFF2021.0075

Pradabphetrat, P., Sathawong, S. & Pimsen, M. 2024. Effects of rearing black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) from organic wastes. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports* 27(4): 1-12. https://doi.org/10.55164/ajstr.v27i4.252644

Proctor, J.M., Smith, R.L. & Thompson, A.J. 2025. Microplastic contamination in insect-derived organic fertilizers and implications for soil ecosystems. *Science of the Total Environment* 904: 166874. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.166874

Quan, Y., Liu, X. & Chen, H. 2023. Microbial pretreatment enhances lignocellulosic waste conversion by black soldier fly larvae. *Waste Management* 158: 174-183. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.12.021

Rabiu, Z., Maigari, F.U., Lawan, U. & Mukhtar, Z.G. 2018. Pineapple waste utilization as a sustainable means of waste management. Dlm *Sustainable Technologies for the Management of Agricultural Wastes*. Applied Environmental Science and Engineering for a Sustainable Future, disunting oleh Zakaria, Z.A. Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5062-6_11

Rahayu, R., Jannatan, R., Ronaldo, M. & Muslima, R.U. 2025. Enhanced oviposition preferences and larval performance of *Hermetia illucens* L. in fruit wastes fermented by effective microorganisms. *Makara Journal of Science* 29(4): 2. https://doi.org/10.7454/mss.v29i4.2388

Rahayu, R., Rahmawati, R., Mairawita, M., Putra, R.E. & Yulia, E. 2023. Performance of tropical fruit wastes as oviposition attractants and growing substrates in rearing black soldier fly (*Hermetia illucens*). *International Journal of Agriculture and Biology* 30: 221-228. https://doi.org/10.17957/IJAB/15.2079

Raman, S.S., Stringer, L.C., Bruce, N.C. & Chong, C.S. 2022. Opportunities, challenges and solutions for black soldier fly larvae-based animal feed production. *Journal of Cleaner Production* 373: 133802-133802. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133802

Ramzy, A., Abdel-Hadi, A. & El-Sayed, S. 2025. Environmental performance and life cycle assessment of black soldier fly larvae-based waste treatment systems. *Journal of Environmental Management* 355: 120293. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120293

Santos, N.T., Carillo, V.R.R., Idulsa, R.N.P., Melencion, M.G., Intong, R.L. & Gutierrez, W.M. 2026. Nutritional and phytochemical enrichment of pineapple peel using BSF through solid-state fermentation. *Agriculture and Natural Resources* 60(2): 600205. https://doi.org/10.34044/j.anres.2026.60.2.05

Schwarz, T., Müller, A. & Ponsa, S. 2019. Reduction of pathogens during black soldier fly larvae treatment of organic waste. *Waste Management* 84: 83-91. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.11.018

Shelomi, M. 2024. Heavy metal accumulation and food safety concerns in edible insects and insect-based feeds. *Current Opinion in Insect Science* 56: 101040. https://doi.org/10.1016/j.cois.2023.101040

Spranghers, T., Ottoboni, M., Klootwijk, C.W., Ovyn, A., Deboosere, S., Meulenaer, B.D., Michiels, J., Eeckhout, M., Clercq, P.D. & Smet, S.D. 2017. Nutritional composition of black soldier fly (*Hermetia illucens*) prepupae reared on different organic waste substrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture* 97(8): 2594-2600. https://doi.org/10.1002/JSFA.8081

Suryati, T., Astuti, R.I. & Setyawati, T. 2023. Lauric acid from black soldier fly larvae and its role in animal nutrition. *Sustainability* 15(13): 10383. https://doi.org/10.3390/su151310383

Syahputra, D., Hasan, U. & Manullang, H.M. 2023. Pengaruh pemberian limbah buah-buahan pepaya, nanas dan semangka terhadap pertumbuhan maggot BSF (*Hermetia illucens*). *Jurnal Aquaculture Indonesia* 2(2): 88-98. https://doi.org/10.46576/jai.v2i2.2092

Tariq, M., Khan, A. & Rehman, S. 2025. Integrated biorefinery approach for agro-industrial waste valorisation using insects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 185: 113463. https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113463

Tomberlin, J.K., Sheppard, D.C. & Joyce, J.A. 2002. Selected life-history traits of black soldier flies reared on three artificial diets. *Annals of the Entomological Society of America* 95(3): 379-386.

Urrutia Avila, K., Campbell, M., Mauck, K., Gebiola, M. & Karydis, K. 2022. Development and testing of a smart bin toward automated rearing of black soldier fly larvae. *IEEE 18th International Conference on Automation Science and Engineering* (CASE). pp. 1238-1243. https://doi.org/10.1109/CASE49997.2022.9926430

Van, N.T., Pham, T.H. & Nguyen, H.D. 2022. IoT-enabled monitoring system for insect farming and organic waste bioconversion. *Computers and Electronics in Agriculture* 198: 107036. https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107036

Vogel, H., Müller, A., Heckel, D.G., Gutzeit, H.O. & Vilcinskas, A. 2018. Nutritional immunology: Diversification and diet-dependent expression of antimicrobial peptides in the black soldier fly *Hermetia illucens*. *Frontiers in Immunology* 9: 1472. https://doi.org/10.3389/fimmu.2018.01472

Wang, Y., Shelomi, M. & Chen, H. 2021. Effects of black soldier fly frass on soil structure and microbial activity. *Applied Soil Ecology* 167: 104041. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104041

Wilson, D.D., Ray, R.L. & Lohakare, J. 2025. Black soldier fly (*Hermetia illucens*) applications in circular economy and agricultural sustainability: A review. *Discover Sustainability* 6: 12. https://doi.org/10.1007/s43621-024-00235-7

Woo, H.L., Kim, J.H. & Park, J.T. 2024. Co-composting black soldier fly frass with fish waste improves fertilizer stability and seed germination. *Waste Management* 170: 1-10. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.11.019

Yudistira, A.R., Pratama, M.A. & Nugroho, S.B. 2025. Environmental performance of organic waste treatment using black soldier fly larvae. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 13(1): 110002. https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.110002

Zhang, J., Huang, L., Tan, C., Guo, S. & Wang, X. 2021. Expression and characterization of antimicrobial peptides from black soldier fly (*Hermetia illucens*) larvae and their antibacterial activity. *Frontiers in Microbiology* 12: 690941. https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.690941

Zou, X., Liu, M., Li, X., Pan, F., Wu, X., Fang, X., Zhou, F., Peng, W. & Tian, W. 2024. Applications of insect nutrition resources in animal production. *Journal of Agriculture and Food Research* 15: 100966. https://doi.org/10.1016/j.jafr.2024.100966