

BLACK SOLDIER FLY (*Hermetia illucens* L.): SIKLUS HIDUP DAN FAKTOR-FAKTOR YANG MEMENGARUHI KEBERHASILAN BUDIDAYA DI SETIAP TAHAPANNYA

**Mulki Salendra Kusumah*, Bagus Giri Yudanto, Frisda Rimbun Panjaitan,
Muhammad Edwin Syahputra Lubis, Brahmani Dewa Bajra, Ilmi Fadhilah Rizki, dan
Manda Edy Mulyono**

Abstrak - *Black soldier fly* (BSF) adalah salah satu serangga polifagus yang tersebar luas di perkebunan kelapa sawit khususnya pada tandan kosong kelapa sawit yang dibiarkan melapuk. Larva BSF menunjukkan kapabilitas biokonversi yang tinggi terhadap limbah dan produk samping dari industri kelapa sawit. Selain itu, larva BSF menghasilkan berbagai produk turunan bernilai ekonomi, seperti bahan baku pakan ternak serta sumber nutrisi penting yang mendukung pertumbuhan tanaman. Artikel ini menyajikan kompilasi hasil-hasil penelitian terkait teknik budidaya BSF, khususnya terkait karakteristik siklus hidup dan variabel utama yang menentukan keberhasilan pada setiap tahapan perkembangan. Siklus hidup BSF terdiri atas lima fase utama, yaitu telur, larva, prepupa, pupa, dan imago (lalat dewasa), di mana setiap tahap menunjukkan karakteristik biologis dan ekologis khas yang berperan penting dalam keseluruhan dinamika perkembangan spesies ini. Efektivitas pada setiap tahap perkembangan dalam siklus hidup BSF dipengaruhi secara signifikan oleh sejumlah variabel lingkungan, termasuk suhu, kelembaban relatif, intensitas cahaya, ketersediaan sumber pakan, serta karakteristik fisik dan kimia substrat yang digunakan. Pemahaman mendalam mengenai interaksi antara siklus hidup dan faktor-faktor yang memengaruhi keberhasilan budidaya BSF ini sangat penting untuk diperhatikan, guna mengoptimalkan budidaya BSF dalam pengaplikasiannya sebagai upaya berkelanjutan dalam melakukan pengolahan limbah ataupun pemanfaatan produk samping industri kelapa sawit.

Kata kunci: Black soldier fly, cahaya, faktor lingkungan, kelembaban, produk samping industri kelapa sawit, siklus hidup, suhu

PENDAHULUAN

Dalam beberapa tahun terakhir, entomologi terapan (*applied entomology*) telah mengalami perkembangan yang signifikan, mulai dari pemanfaatan serangga dalam pengelolaan limbah organik, hingga pemanfaatan serangga sebagai sumber makanan alternatif baik bagi manusia maupun hewan ternak (Nabaterega et al., 2025). Serangga dapat dijadikan sebagai solusi yang ideal untuk memenuhi permintaan protein global yang tinggi,

Penulis yang tidak disertai dengan catatan kaki instansi adalah peneliti pada Pusat Penelitian Kelapa Sawit

Mulki Salendra Kusumah* (✉)

Pusat Penelitian Kelapa Sawit
Jl. Brigjen Katamso No. 51 Medan 20158, Indonesia

Email: mulkikusumah@iopri.org

seiring dengan upaya menurunkan angka penumpukan limbah organik akibat dari pertumbuhan populasi global yang terus meningkat (Lisboa et al., 2024; Siddiqui et al., 2023). Di dalam bukunya, Addy et al. (2021) mengungkapkan setidaknya ada lima alasan yang membuat serangga disebut sebagai solusi ideal untuk menyelesaikan kebutuhan protein dan penurunan limbah organik secara simultan. Berikut kelima alasannya:

Pertama, banyak serangga yang dapat memanfaatkan berbagai jenis limbah organik sebagai sumber pakan, sehingga serangga memiliki fleksibilitas yang tinggi.

Kedua, Serangga menunjukkan laju pertumbuhan yang cepat serta kapasitas reproduksi yang tinggi, yang secara kolektif berkontribusi terhadap efisiensi konversi limbah organik menjadi sumber

nutrisi alternatif.

Ketiga, emisi gas rumah kaca dari serangga secara signifikan lebih rendah daripada peternakan tradisional lainnya.

Keempat, budidaya serangga mudah ditingkatkan dan layak dilakukan pada skala industri.

Kelima, biomassa serangga kaya akan protein dan memiliki profil mikronutrien yang beragam dengan bioavailabilitas yang tinggi.

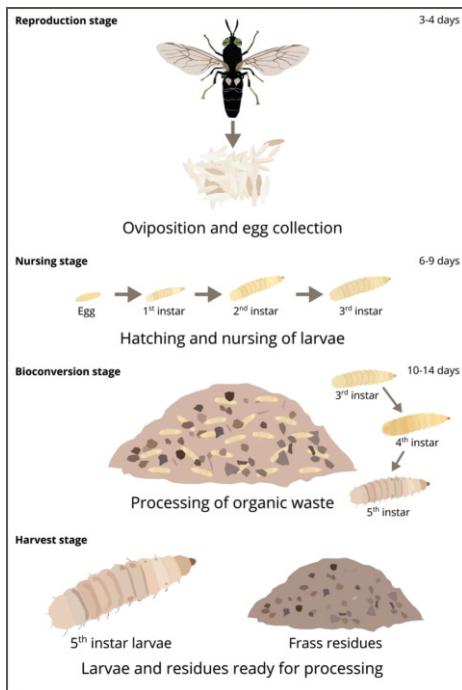
Beragam studi telah dilakukan untuk mengevaluasi potensi pemanfaatan serangga dalam pengurangan limbah organik, termasuk investigasi terhadap spesies lalat tertentu yang menunjukkan efisiensi tinggi dalam proses biokonversi. Pada penelitian yang dilakukan Čičková et al. (2015), sekelompok larva dari berbagai macam spesies lalat dilakukan pengujian untuk melihat efisiensi konversi limbah organik dan profil nutrisi yang dihasilkan. Jenis lalat yang digunakan dalam studi tersebut mencakup beberapa spesies yang telah teridentifikasi memiliki potensi dalam proses biokonversi, antara lain lalat rumah (*Musca domestica* L.), lalat hijau (*Lucilia sericata*), lalat tentara hitam (*Hermetia illucens* L.), lalat wajah (*Musca autumnalis* L.), dan lalat daging (*Sarcophaga carnaria* L.). Dari penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa larva lalat sangat efektif dalam mengurangi berbagai macam limbah organik, seperti sampah perkotaan, kotoran hewan, lumpur tinja, sampah restoran, sampah pasar, sisa makanan, dan sisa tanaman. Kajian ilmiah yang menitikberatkan pada spesies lalat tentara hitam (*Hermetia illucens* L.), atau yang dikenal secara luas sebagai *Black Soldier Fly* (BSF), menunjukkan tren peningkatan dalam pengembangannya seiring dengan potensi aplikatifnya dalam bidang biokonversi dan pengelolaan limbah organik. Hal ini dipicu salah satunya karena spesies BSF dinilai sebagai lalat yang lebih aman karena tidak berpotensi membawa ataupun menularkan patogen penyakit kepada manusia (Banks et al., 2014; Kenis et al., 2014). Sehingga banyak peneliti yang melakukan penelitian lebih jauh guna dapat memahami karakter individu, optimalisasi budidaya dan pemanfaatan produk yang mungkin dihasilkan dari lalat BSF ini.

BSF, *Hermetia illuecens* (L., 1758) adalah spesies serangga yang berasal dari filum Arthropoda, kelas Insekta, ordo Diptera, famili Stratiomyidae, dan

subfamili Hermetiinae (Doelle et al., 2016; Pérez-Pacheco et al., 2022; Rehman et al., 2023). Lalat BSF sangat mudah dikenali karena memiliki tubuh yang cukup besar, panjang dan ramping, serta memiliki antena dengan tiga segmen yang berada di atas kepala (Rehman et al., 2023). BSF secara ekologis beradaptasi dengan baik pada wilayah tropis dan subtropis yang memiliki iklim hangat, sehingga keberadaannya umum dijumpai di negara-negara berkembang di kawasan Asia, Afrika, dan Amerika Selatan, yang secara simultan menyediakan sumber limbah organik dalam jumlah besar sebagai substrat potensial untuk biokonversi (da Silva & Hesselberg, 2020; Rehman et al., 2023). Habitat alami BSF biasanya berada di luar ruangan, seperti area kompos, peternakan unggas, atau tempat dengan limbah yang terfermentasi, agar dapat menyediakan sumber makanan untuk keperluan regenerasi (Murawska et al., 2021). BSF merupakan salah satu spesies serangga yang secara alami dapat ditemukan pada tandan kosong sawit (TKS) yang mengalami pelapukan di lahan terbuka perkebunan kelapa sawit, sebagai respons terhadap kondisi substrat organik yang mendukung aktivitas kolonisasi dan dekomposisi (Kusumah, 2023). Menurut Jayanthi & Khairani (2017), kehadiran BSF membantu proses pelapukan TKS agar lebih cepat terurai menjadi sumber hara organik untuk tanah.

BSF telah dikenal secara luas sebagai serangga yang memiliki kapabilitas tinggi dalam mendegradasi beragam jenis material organik, serta mengkonversinya menjadi produk-produk bernilai tambah, seperti biomassa kaya protein, lipid, dan senyawa kitin yang memiliki potensi aplikatif di berbagai sektor industri (Singh et al., 2021). Selain itu, pada residu substrat pakan BSF diketahui mengandung banyak mikroba bermanfaat yang dapat diaplikasikan sebagai pupuk hayati (Klüber, Müller, et al., 2022; Sasmita et al., 2022).

Berdasarkan informasi yang dijelaskan oleh Liu et al. (2022), proses budidaya BSF dibagi menjadi empat, dimulai dari tahapan reproduksi yang dilakukan oleh lalat BSF jantan dan betina, pembesaran awal larva yang baru menetas (*nursing*), perombakan material organik oleh larva BSF (biokonversi), dan terakhir tahap pemanenan yang setidaknya menghasilkan dua produk utama berupa sumber protein dan pupuk hayati (Gambar 1).

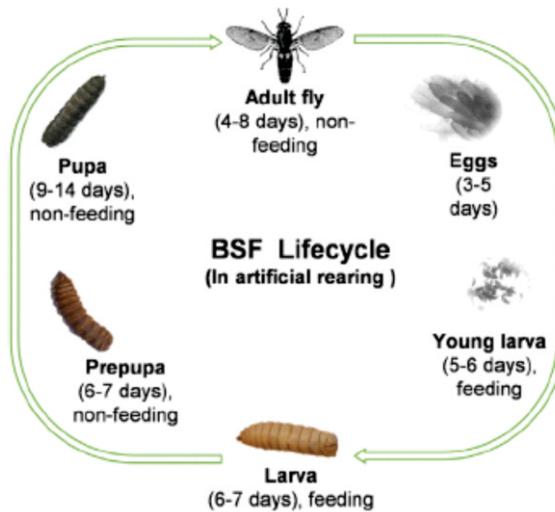


Gambar 1. Skema teknologi sederhana dari budidaya BSF. Sumber: Liu et al. (2022)

SIKLUS HIDUP BSF

Siklus hidup BSF terdiri atas lima fase perkembangan utama (Facchini et al., 2022). Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, tahapan

tersebut mencakup fase telur, larva (termasuk larva muda), prepupa, pupa, dan imago (lalat dewasa), yang masing-masing memiliki fungsi biologis spesifik dalam proses perkembangan individu.

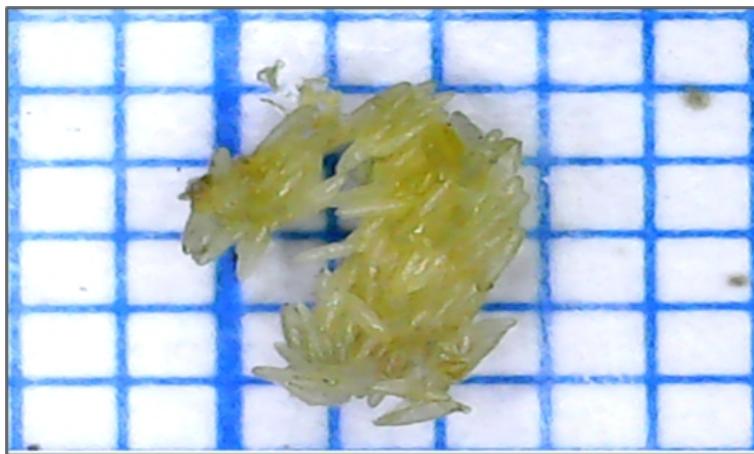


Gambar 2. Siklus hidup BSF. Sumber: Facchini et al. (2022)

Tahapan Pertama: Telur

Tahapan pertama pada siklus hidup BSF adalah telur. Holmes et al. (2013) menjelaskan bahwa setelah terjadi proses perkawinan, alat betina akan menyimpan telurnya di celah-celah kering yang dekat

dengan bahan organik. Mekanisme penyimpanan telur seperti ini bertujuan untuk melindungi telur dari ancaman predator dan kekeringan akibat sinar matahari, serta menyediakan sumber makanan bagi larva-larva yang baru menetas (Purnamasari et al., 2022).



Gambar 3. Telur BSF. Sumber: Kusumah, Bajra, Samosir, & Saveliev (2018)

Telur BSF berwarna bening kekuningan dan biasa ditemukan secara berkoloni (Gambar 3). Setiap individu betina BSF memiliki kapasitas reproduksi yang tinggi, dengan jumlah telur yang dihasilkan berkisar antara 324 hingga 998 butir. Berat rata-rata per butir telur tercatat sebesar $0,028 \pm 0,001$ mg (Chia et al., 2018). Telur BSF umumnya mengalami proses penetasan dalam rentang waktu 1 hingga 5 hari, yang sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan kondisi substrat (Facchini et al., 2022; Kusumah, 2023).

Tahapan Kedua: Larva

Larva BSF yang baru menetas menunjukkan aktivitas konsumsi substrat pakan secara intensif sejak awal fase post-embrionik, disertai dengan laju pertumbuhan yang sangat cepat dan progresif (Facchini et al., 2022). Substrat yang dikonsumsi sebagian besarnya disimpan sebagai biomassa tubuh dalam bentuk lemak dan protein untuk nantinya digunakan pada tahap kehidupan

selanjutnya (Permana et al., 2021; Soetemans et al., 2020). Larva BSF memiliki morfologi mulut tipe penghisap, sehingga larva BSF memiliki preferensi jenis pakan dengan kandungan air substrat yang cukup tinggi (Purkayastha & Sarkar, 2022). Berikut adalah bentuk fisik dari tahapan larva BSF (Gambar 4).

Tahapan kedua ini akan berlangsung selama 18-60 sejak hari pertama menetas, tergantung pada kondisi dan lokasi pertumbuhannya (Facchini et al., 2022; Kusumah, 2023). Pada tahapan kedua ini, BSF akan mengalami lima stadia (instar) yang secara fisik didominasi oleh warna putih-krem, namun pada empat instar awalnya cukup sulit dibedakan kecuali dari ukuran tubuh dan ketegasan segmen tubuh di antara setiap instarnya (Cai et al., 2022). Pada setiap perubahan instar, larva akan melepaskan kulit (eksuvia) dan membuat warna larva dari putih-krem semakin mendekati warna coklat tua. Pada instar kelima, larva tidak akan mengonsumsi pakan lagi dan pada saat itulah BSF memasuki tahapan ketiga sebagai prepupa (Soetemans et al., 2020).



Gambar 4. Larva BSF. Sumber: Kusumah et al. (2018)

Tahapan Ketiga: Prepupa

Tahapan prepupa dapat teridentifikasi melalui perubahan warna kulit BSF yang menjadi semakin coklat gelap, namun masih aktif bergerak (Gambar 5). Selain itu, perilaku 'self-harvesting' merupakan indikator paling praktis lainnya untuk mengenali larva BSF sudah memasuki fase prepupa. *Self-harvesting* pada prepupa BSF adalah perilaku menjauhi substrat pakan yang basah menuju tempat yang lebih kering (Purkayastha & Sarkar, 2022). Pada fase prepupa, morfologi mulut larva mengalami transformasi menjadi struktur menyerupai kait, yang mencerminkan

adaptasi fisiologis terhadap perubahan fungsi dan aktivitas metabolismik menjelang tahap pupasi (Rampure & Velayudhannair, 2023). Mulut berbentuk kait ini memudahkan prepupa untuk merangkak keluar menjauhi substrat dan mencari tempat yang kering dan tersembunyi (Diener et al., 2009). Seluruh mekanisme ini merupakan mekanisme pertahanan diri dari serangan predator, karena setelah tahapan ini pupa BSF akan kaku hingga menetas dari cangkangnya menjadi lalat BSF dewasa (X. Liu et al., 2017). Perubahan dari prepupa menjadi pupa berlangsung sekitar 6-14 hari (Facchini et al., 2022; Kusumah, 2023).



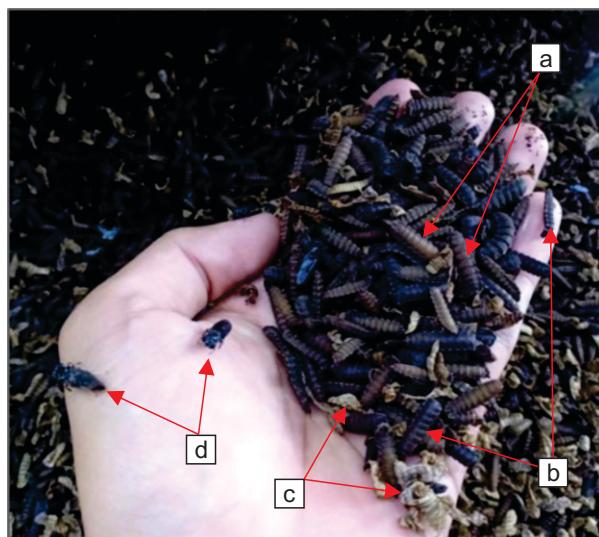
Gambar 5. Prepupa BSF. Sumber: Kusumah et al. (2018)

Tahapan Keempat: Pupa

Tahapan pupa disebut tahapan keempat pada siklus BSF. Tahapan pupa ditandai dengan perubahan warna kulit yang semakin menghitam, bentuk tubuh yang lurus menegang kaku, dan tidak ada pergerakan apapun pada BSF (Gambar 6). Pada tahapan ini terjadi proses pupasi yang dimulai pada saat prepupa berhasil menjauhi makan dan menemukan tempat yang tepat untuk berhenti bergerak agar dapat memasuki tahap pupa (Rampure & Velayudhannair,

2023).

Proses pupasi terjadi selama 9-14 hari tergantung pada kondisi tempat pertumbuhannya, yang diakhiri dengan keluarnya lalat dewasa dari cangkang pupa (Facchini et al., 2022; Kusumah, 2023). Berdasarkan penelitian Furman et al. (1959), dalam kondisi lingkungan yang suboptimal, proses kemunculan imago BSF dapat mengalami keterlambatan yang signifikan, dengan durasi yang mencapai hingga lima bulan.



Gambar 6. a. Pupa BSF, b. cangkang pupa BSF, c. eksuvia BSF, d. lalat dewasa BSF yang baru menetas.
Sumber: Kusumah et al. (2018)

Tahapan Kelima: Imago (Lalat Dewasa)

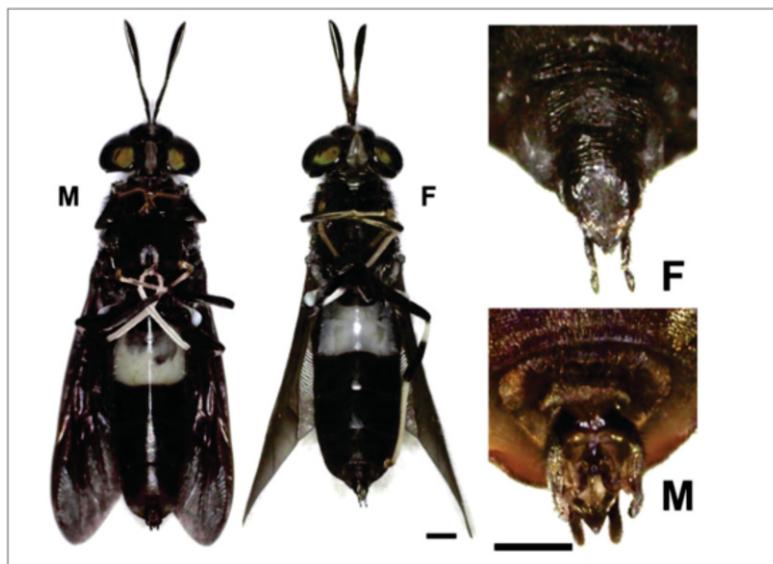
Pada tahapan dewasa atau tahapan kelima, aktivitas lalat BSF dewasa terbatas pada fungsi reproduksi yakni, mencari pasangan lalu kawin dan memproduksi telur (Purkayastha & Sarkar, 2022). Lalat BSF dewasa memiliki rentang hidup rata-rata sekitar 4–8 hari (Facchini et al., 2022; Kusumah, 2023). Lalat BSF dewasa tidak dilengkapi dengan struktur mulut yang berfungsi secara aktif untuk proses pencernaan, sehingga pada tahap ini tidak terjadi aktivitas konsumsi makanan (da Silva & Hesselberg, 2020). Lalat BSF dewasa hanya hidup mengandalkan cadangan lemak yang terkumpul selama tahap perkembangan larva, oleh karena itu, lalat BSF dewasa tidak memerlukan tambahan nutrisi lainnya selain air untuk bertahan hidup (Furman et al., 1959).

Berbeda halnya seperti lalat rumah (*Musca domestica* L.) yang masih aktif makan pada fase dewasanya (Purkayastha & Sarkar, 2022; Sinansari & Fahmi, 2020). Secara alamiah lalat BSF betina tidak bertelur di atas sumber makanan, melainkan di sekitar tepi sumber makanan (Banks et al., 2014). Kombinasi karakteristik biologis dan perilaku ekologis BSF menjadikannya tidak diklasifikasikan sebagai vektor transmisi patogen dari limbah menuju manusia (Sinansari & Fahmi, 2020).

Sebagaimana halnya dengan anggota ordo Diptera lainnya, morfologi tubuh imago BSF terdiri atas tiga segmen utama, yakni kepala, toraks (dada), dan abdomen (perut), yang masing-masing memiliki fungsi struktural dan fisiologis tersendiri (Rampure & Velayudhannair, 2023). Cai et al. (2022) menjelaskan

bahwa lalat BSF memiliki panjang tubuh berkisar antara 15-20 mm, berwarna hitam sedikit kecoklatan, bagian abdomennya terdapat warna putih transparan, dan khusus untuk lalat betina memiliki ovipositor pada bagian ujung abdomennya (Gambar 7). Sayap pada

imago BSF mengalami perkembangan morfologis yang sempurna, dengan rentang yang cukup luas hingga mampu menutupi sebagian besar segmen toraks dan abdomen (Oonincx et al., 2015; Rehman et al., 2023).



Gambar 7. Morfologi fase dewasa BSF jantan (A) dan betina (B). Sumber: Oonincx et al. (2016)

Purkayastha & Sarkar (2022) menjelaskan bahwa lalat betina BSF bersifat monogami dan akan kawin pada hari kedua setelah keluar dari cangkang pupa, yang kemudian dilanjutkan dengan proses bertelur (oviposisi) pada dua hari setelahnya. Pada saat oviposisi lalat betina umumnya membutuhkan waktu sekitar 20–30 menit untuk mengeluarkan semua telur dari tubuhnya (Muraro et al., 2024; Purkayastha & Sarkar, 2022).

FAKTOR-FAKTOR YANG MEMPENGARUHI KEBERHASILAN BUDIDAYA BSF DI SETIAP TAHAPANNYA

Keberhasilan budidaya BSF dipengaruhi oleh sejumlah faktor biotik dan abiotik yang secara signifikan memengaruhi dinamika pertumbuhan dan perkembangan larva hingga fase imago (Broeckx et al., 2021; Chia et al., 2018; Muraro et al., 2024; Purkayastha & Sarkar, 2022).

Faktor yang mempengaruhi penetasan telur BSF

Penetasan telur merupakan salah satu kunci keberlangsungan dalam aktivitas budidaya BSF. Rentang suhu 28–30°C merupakan kondisi lingkungan yang ideal untuk memfasilitasi proses penetasan telur BSF secara optimal (Purkayastha & Sarkar, 2022). Holmes et al. (2013), melaporkan bahwa penetasan telur BSF tidak terjadi pada suhu 12°C, sedangkan pada suhu yang lebih tinggi (16 dan 19°C), penetasan dapat berlangsung namun disertai dengan tingkat mortalitas neonatus yang signifikan.

Salah satu faktor yang dapat meningkatkan angka penetasan telur BSF adalah peningkatan kelembaban relatif (Broeckx et al., 2021). Pada kelembaban relatif rendah, terjadi penurunan kadar air yang signifikan pada selaput telur yang mengakibatkan tingginya angka kematian karena kekeringan (Broeckx et al., 2021; Holmes et al., 2013). Kelembaban relatif di atas 60% terbukti dapat meningkatkan efisiensi dan kecepatan proses penetasan telur BSF secara signifikan (Holmes et al., 2013).

Selain itu, Oonincx et al. (2015) melaporkan bahwa penetasan telur BSF dipengaruhi juga oleh cahaya. Pada percobaan menggunakan pencahayaan jenis LED dengan fraksi panjang gelombang cahaya berkisar antara 300-500 nm, terjadi peningkatan angka penetasan telur yang lebih tinggi dibandingkan dengan lampu jenis fluoresensi yang memiliki fraksi panjang gelombang cahaya berkisar antara 500–650 nm.

Faktor yang mempengaruhi pertumbuhan larva menjadi prepupa

Pada tahap pertumbuhan larva menuju prepupa, berbagai faktor seperti jenis dan kondisi pakan, suhu dan kelembaban ruangan, serta kepadatan populasi memiliki pengaruh besar terhadap keberhasilan tahapan ini (Cattaneo et al., 2025). Telah banyak penelitian yang dilakukan untuk mencoba berbagai jenis material organik sebagai sumber pakan larva BSF. Larva BSF mampu bertahan hidup pada rentang pH yang luas, berkisar antara pH 2-10, dengan kondisi terbaiknya berada pada area pH netral (Purkayastha & Sarkar, 2022). Sebagian besar penelitian dengan berbagai jenis sumber pakan menggerucut pada sebuah rekomendasi kadar air pakan yang efektif untuk dapat dikonsumsi oleh larva BSF. Kadar air yang paling efektif tersebut berkisar antara 60-70% dari total pakan yang diberikan (Klüber, Müller, et al., 2022; Wang & Shelomi, 2017; Zhang et al., 2023). Purkayastha & Sarkar (2022) menjabarkan bahwa setidaknya akan ada 2 kondisi ekstrim terkait kadar air suatu material organik yang akan berdampak langsung terhadap pertumbuhan larva. Pertama, pada kondisi pakan kekurangan kandungan air, ketersediaan jumlah nutrisi organik terlarut akan mengalami penurunan, dan aktivitas mikroba yang membantu proses pelunakkan substrat pun akan terhambat. Kedua, pada kondisi pakan kelebihan kandungan air, sebagian besar pori-pori substrat akan terisi air yang akhirnya membatasi penetrasi dan sirkulasi oksigen di dalam substrat. Hal ini akan memicu penurunan konsentrasi nutrisi pada suatu substrat akibat dari pengenceran yang terjadi secara signifikan (Albalawneh et al., 2024; Purkayastha & Sarkar, 2022). Terakhir, larva BSF harus mengeluarkan energi ekstra untuk menjaga dirinya agar tetap stabil, yang akhirnya menyebabkan larva mengalami stress dan menurunkan performa pertumbuhan (Albalawneh et al., 2024). Pada jenis

material organik yang memiliki kadar air sangat tinggi, sistem drainase atau penurunan kadar air di awal proses perlu dilakukan untuk mengurangi sebagian kandungan air (Diener et al., 2011).

Pertumbuhan larva BSF berlangsung secara optimal pada kisaran suhu ruang antara 25 hingga 35°C, yang mendukung aktivitas metabolismik dan perkembangan morfologis secara efisien (Chia et al., 2018; Shumo et al., 2019). Larva BSF termasuk hewan yang memiliki kemampuan hidup pada suhu ekstrim (Klüber, Tegtmeier, et al., 2022). Dilaporkan oleh Chia et al. (2018) pada suhu substrat 40 °C larva BSF masih dapat bertahan hidup dengan kompensasi waktu pertumbuhan yang relatif lebih lama dengan tingkat mortalitas yang tinggi mencapai 72,4%. Sedangkan pada suhu substrat yang rendah di 15 °C, larva BSF memiliki waktu pertumbuhan yang sangat panjang mencapai 62 hari dan tingkat mortalitas yang rendah di angka 13% (Chia et al., 2018; Facchini et al., 2022).

Faktor penting lainnya adalah kelembaban ruangan. Berdasarkan penelitian yang telah dilaporkan oleh (Holmes et al., 2012), kondisi kelembaban suatu tempat budidaya memiliki korelasi yang berbanding terbalik dengan angka kematian pada larva BSF. Semakin tinggi kelembabannya, maka angka kematian pada larva BSF semakin menurun. Penelitian tersebut dilakukan pada perlakuan kelembaban 25, 40, dan 70% RH, dan menghasilkan penurunan angka kematian secara berturut-turut: 62, 26, dan 3% pada larva BSF (Holmes et al., 2012).

Kepadatan populasi atau jumlah larva per satuan luas juga merupakan aspek penting lainnya dalam menentukan keberhasilan pertumbuhan larva menjadi prepupa. Menurut Cattaneo et al. (2025), kepadatan populasi yang berlebihan akan mengakibatkan produksi lindi asam dan kenaikan suhu pada substrat yang berbahaya bagi larva BSF. Kondisi tersebut termasuk ke dalam kondisi lingkungan ekstrim yang dapat menghambat tumbuh kembang larva BSF (Cattaneo et al., 2025; Parra Paz et al., 2015). Parra Paz et al. (2015) melaporkan kepadatan larva BSF sebesar 1,2 individu per cm² merupakan kondisi optimal untuk budidaya BSF, sementara kepadatan melebihi 5 individu per cm² dinilai tidak ideal dan sebaiknya dihindari karena berpotensi menurunkan performa biokonversi. Namun pada penelitian lanjutan Barragan-Fonseca et al. (2018), peningkatan kepadatan populasi hingga dua kali lipat dari 1,2

individu per cm² tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap kondisi fisiologis maupun performa larva BSF.

Faktor yang mempengaruhi perubahan prepupa menjadi pupa

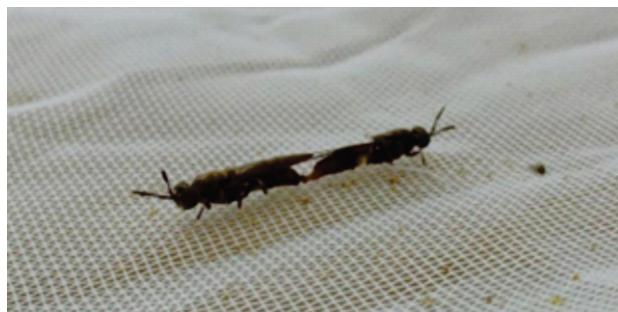
Tahapan pupa BSF dipengaruhi oleh beberapa faktor abiotik seperti suhu dan substrat pupasi (Holmes et al., 2012). Shumo et al. (2019) mengungkapkan bahwa durasi transisi dari fase prepupa menuju pupa pada BSF menunjukkan hubungan positif terhadap peningkatan suhu, di mana suhu yang lebih tinggi cenderung mempercepat proses perkembangan tersebut. Berdasarkan penelitian yang dilakukan dalam rentang suhu 15 hingga 35°C, hasil paling optimal diperoleh pada suhu 30 dan 35°C. (Shumo et al., 2019).

Substrat pupasi adalah material organik yang biasanya ditambahkan pada wadah berisikan prepupa. Penambahan substrat pupasi bertujuan untuk meredam pergerakan aktif dari prepupa, sehingga memberikan kondisi lingkungan buatan

yang nyaman untuk prepupa memasuki fase hibernasi menjadi pupa (Purkayastha & Sarkar, 2022). Holmes et al. (2012) mengatakan bahwa prepupa yang dibiarkan tanpa adanya penambahan substrat pupasi akan mengakibatkan periode pupasi lebih panjang dan menurunkan tingkat penetasan lalat. Beberapa substrat pupasi yang biasa digunakan berupa serutan kayu, tanah pot (*potting soil*), pasir, dan tanah (Purkayastha & Sarkar, 2022).

Faktor yang mempengaruhi perkawinan lalat BSF

Setelah mencapai kematangan seksual, lalat jantan dan betina akan melakukan perkawinan, yang ditandai dengan terhubungnya bagian ekor masing-masing seperti yang tergambar pada Gambar 8. Proses perkawinan lalat BSF dapat dilakukan pada saat diam di suatu permukaan datar ataupun pada saat kondisi sedang terbang (Purkayastha & Sarkar, 2022). Keberhasilan proses perkawinan pada lalat BSF berkorelasi dengan produktivitas telur BSF. Semakin tinggi jumlah lalat yang kawin, maka produktivitas telur BSF pun akan semakin tinggi (Julita et al., 2020).



Gambar 8. Proses perkawinan lalat BSF. Sumber: Kusumah et al. (2018)

Intensitas dan keberadaan cahaya merupakan salah satu faktor lingkungan yang berperan krusial dalam mendukung keberhasilan proses perkawinan pada lalat BSF. Cahaya berperan sebagai stimulus lingkungan yang memfasilitasi lalat jantan dalam mengidentifikasi keberadaan lalat betina, sehingga mendukung terjadinya proses kopulasi (Oonincx et al., 2015). Menurut Zhang et al. (2010) dan Nakamura et al. (2016) aktivitas perkawinan pada lalat BSF dewasa cenderung berlangsung ketika lingkungan

pencahayaan berada dalam rentang panjang gelombang antara 450 hingga 700 nm. Pada penelitian yang dilakukan oleh Oonincx et al. (2015), mengungkapkan bahwa retina pada mata majemuk lalat BSF mengandung sel-sel fotoresistor yang peka terhadap radiasi ultraviolet, cahaya biru, dan cahaya hijau, sehingga mendukung sistem penglihatan trikromatik pada spesies tersebut. Pada penelitian tersebut dijelaskan bahwa LED yang memiliki fraksi cahaya dengan panjang gelombang 300–500 nm lebih

efektif dalam mendorong perkawinan pada lalat BSF, dibandingkan menggunakan lampu fluoresensi yang memiliki fraksi cahaya dengan panjang gelombang pada rentang 500–650 nm (Oonincx et al., 2015).

Tomberlin & Sheppard (2002) melaporkan bahwa aktivitas perkawinan pada lalat BSF yang terpapar sinar matahari alami umumnya dimulai ketika intensitas cahaya melebihi $63 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$, dengan frekuensi kopulasi yang meningkat secara signifikan pada tingkat pencahayaan di atas $200 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$. Pengembangan teknologi sumber cahaya buatan

(*artificial light*) pun semakin banyak dilakukan, hal ini sangat berguna dalam mengatasi permasalahan fluktuasi ketersediaan cahaya matahari pada negara-negara dengan empat musim, utamanya pada musim dingin (Oonincx et al., 2015). Eksplorasi terhadap sumber cahaya buatan menjadikan negara-negara tersebut sangat mungkin melakukan budidaya BSF sepanjang tahun (Heussler et al., 2018). Tabel 1 merangkum beberapa penelitian yang telah dilakukan terkait alternatif penerapan sumber cahaya buatan yang terbukti berhasil pada aktivitas perkawinan lalat BSF.

Tabel 1. Alternatif sumber cahaya buatan yang terbukti berhasil pada aktivitas perkawinan lalat BSF.

Sumber cahaya buatan	Panjang gelombang (nm)	Intensitas cahaya ($\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$)	Ukuran kandang (cm)	Jumlah lalat (jantan:betina)	Kondisi lingkungan	Sumber
Lampu 500-W quartz-iodide	350- 2500	135	180 × 120 × 150	1000	Suhu 28 °C, kelembaban 60%, rasio terang:gelap 9:15 jam	(Zhang et al., 2010)
LED (Light-emitting diode)	365, 450 dan 515	64,4- 110,4	30 × 30 × 30	20 (1:1)	Suhu 26 °C, kelembaban 70%, rasio terang:gelap 12:12 jam	(Oonincx et al., 2015)
LED (Light-emitting diode)	400- 750, puncak: 438	59	39 × 28 × 28	60 (1:1) 80 (1:1)	Suhu 27 °C, kelembaban 60%, rasio terang:gelap 16:8 jam	(Heussler et al., 2018)
Fluorescent light	311- 711, puncak: 430, 541 dan 612	59	30 × 30 × 30	60 (1:1) 80 (1:1)	Suhu 27 °C, kelembaban 60%, rasio terang:gelap 16:8 jam	(Heussler et al., 2018)

(continued)

Sumber cahaya buatan	Panjang gelombang (nm)	Intensitas cahaya ($\mu\text{mol/m}^2/\text{s}$)	Ukuran kandang (cm)	Jumlah lalat (jantan:betina)	Kondisi lingkungan	Sumber
Halogen light	300 dan terus meningkat hingga rentang gelombang panjang spektrometer	59	39 × 28 × 28	60 (1:1) 80 (1:1)	Suhu 27 °C, kelembaban 60%, rasio terang:gelap 16:8 jam	(Heussler et al., 2018)

Faktor yang mempengaruhi lalat bertelur dan oviposisi

Pada tahapan imago, lalat betina yang sudah dibuahi akan mencari tempat yang aman untuk melakukan oviposisi (Julita et al., 2020). Selain agar aman dari serangan predator, lalat BSF betina pun akan berupaya mencari tempat yang sedekat mungkin dengan tempat ketersediaan makanan, guna mempermudah larva BSF yang baru menetas (neonates) mengakses makanannya (Cai et al., 2022).

Di habitat aslinya, lalat betina yang dipandu oleh respons penciumannya akan mencari material-material organik yang beraroma cukup tajam sebagai tempat ideal untuk meletakkan telurnya, seperti pada celah kayu lapuk, sekitar buah atau sayuran busuk (Purkayastha & Sarkar, 2022). Atraktaan oviposisi merupakan senyawa yang berasal dari bahan organik

maupun sintetik, yang diaplikasikan pada fase imago di dalam kandang BSF guna merangsang perilaku oviposisi. Penggunaan atraktaan bertujuan untuk menstimulasi perilaku oviposisi pada BSF betina dengan cara merekayasa lingkungan kandang agar menyerupai habitat alaminya, sehingga telur diletakkan secara terarah pada wadah pengumpul (ovitrap) (Holmes et al., 2012). Faktor yang berperan penting pada keberhasilan suatu atraktaan oviposisi adalah kadar air dan bahan baku yang digunakan (Nyakeri et al., 2017), karena pada perpaduan yang tepat akan menghasilkan dekomposisi material organik secara maksimal, sehingga atraktaan oviposisi akan mengeluarkan bau yang kuat (Nyakeri et al., 2017; Purkayastha & Sarkar, 2022). Beberapa hasil penelitian terkait penggunaan berbagai jenis sumber bahan baku pembuatan atraktaan ovoposisi dirangkum pada Tabel 2.

Tabel 2. Berbagai jenis sumber bahan baku pembuatan atraktaan ovoposisi

Bahan baku atraktaan oviposisi	Sumber
50% dedak gandum, 30% tepung alfalfa, dan 20% tepung jagung (Gainesville housefly diet)	(Holmes et al., 2012)
Pakan ayam	(Heussler et al., 2018; Oonincx et al., 2015)
Kotoran sapi	(Nyakeri et al., 2017)
Kasgot (frass BSF)	(Nakamura et al., 2016; Nyakeri et al., 2017)

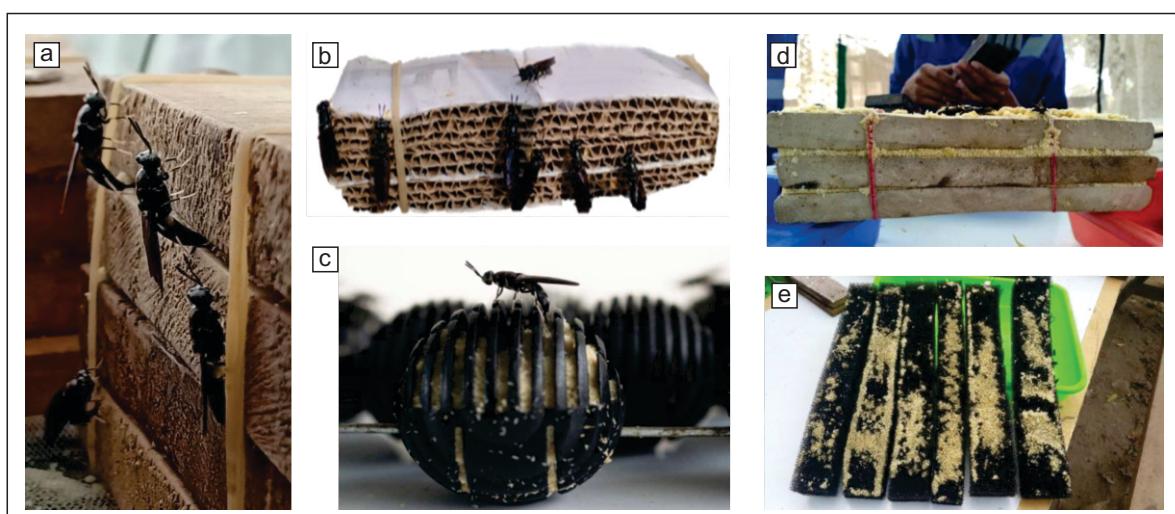
(continued)

Bahan baku atraktan oviposisi	Sumber
Buah segar (campuran nanas, pisang, semangka dan alpukat)	(Nyakeri et al., 2017)
Ikan busuk	(Nyakeri et al., 2017)
Pakan ayam dan susu sapi	(Julita et al., 2020)

Tomberlin & Sheppard (2002) menambahkan bahwa faktor lainnya yang terbukti mempengaruhi aktivitas oviposisi adalah kelembaban dari area tempat hidup lalat dewasa. Kelembaban terbaik berkisar antara 60-70%. Pada kelembaban yang lebih rendah akan mengakibatkan telur menjadi kering (Tomberlin & Sheppard, 2002).

Dalam budidaya BSF, potongan kardus karton bergelombang paling sering digunakan sebagai ovitrap untuk mengumpulkan telur (Chia et al.,

2018; Diener et al., 2011; Holmes et al., 2012). Ovitrap yang baik biasanya memiliki celah lubang atau celah datar sekitar 0,5-1 cm yang tertutup oleh bahan alami dengan bentuk fisik permukaan yang relatif kering non-konduktor dan diletakan pada posisi yang terhindar dari sinar matahari langsung (Purkayastha & Sarkar, 2022). Gambar 9 menunjukkan aktivitas oviposisi dan beberapa jenis bahan baku yang dapat digunakan sebagai ovitrap.



Gambar 9 a. Lalat BSF betina sedang melakukan oviposisi (Kusumah et al., 2018), b. ovitrap berbahan kardus (Purkayastha & Sarkar, 2022), c. ovitrap berbahan plastik (*bioball*) (Dortmans et al., 2021), d. ovitrap berbahan papan kayu (Kusumah et al., 2018), dan e. ovitrap berbahan biofoam filter (Kusumah et al., 2018).

BIOKONVERSI PRODUK SAMPING INDUSTRI KELAPA SAWIT OLEH BSF

Pada limbah maupun produk samping industri kelapa sawit, BSF terbukti mampu berperan aktif sebagai agen biokonversi (Klüber, Tegtmeier, et al., 2022). Sebagaimana yang dijelaskan oleh Leela & Nur (2019), bahwa aktivitas industri kelapa sawit menghasilkan berbagai macam produk samping

organik yang jumlahnya sangat besar. Pengolahan setiap satu ton tandan buah segar (TBS) kelapa sawit secara umum menghasilkan berbagai fraksi limbah dan produk samping, meliputi sekitar 27 kg bungkil inti sawit (BIS) 210-230 kg TKS, 144 kg serat mesokarp, 40-50 kg *palm oil solid decanter* (POSD), dan 583-650 kg *palm oil mill effluent* (POME) (Leela & Nur, 2019).

Pada penelitian yang dilakukan oleh Nugroho et al.

(2024), BIS berhasil digunakan sebagai media tumbuh BSF pada kondisi suhu lingkungan 28°C dan kelembaban berkisar antara 60 hingga 70%. BSF berhasil mengkonversi BIS menjadi biomassa larva yang berpotensi sebagai sumber nutrisi bernilai tinggi, dengan kandungan protein mencapai 50,66% dan kadar lemak sebesar 20,75%.

Pada penelitian lainnya yang dilaporkan oleh Mujahid et al. (2017), aktivitas biokonversi oleh BSF menghasilkan biomassa larva dengan kandungan sumber protein dan lemak sebesar 35,40% dan 36,41% pada media TKS. Namun pada penelitian ini dilakukan pretreatment berupa pemberian fungi *Trichoderma* sp. yang ditumbuhkan pada suhu lingkungan 27-34°C dengan pH 7. Hal ini bertujuan untuk memecah kandungan lignoselulosa yang tinggi pada TKS sebelum diaplikasikan sebagai pakan BSF (Mujahid et al., 2017).

Pada kondisi suhu lingkungan 25 - 27°C dan kelembaban antara 60 - 70%, penggunaan BIS yang dicampur dengan TKS sebagai pakan BSF juga telah dilakukan dan menghasilkan biomassa larva yang berpotensi sebagai sumber protein tinggi (Kusumah et al., 2025).

Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Jing Lim et al. (2022) menunjukkan bahwa POSD dapat dikonversi secara efektif oleh BSF menjadi biomassa larva dengan kandungan lemak yang tinggi, yakni mencapai 70,07% dan berpotensi sebagai sumber energi seperti biodiesel. Pada penelitian ini dilakukan juga pretreatment berupa pemberian enzim selulase untuk memecah kandungan lignoselulosa pada POSD. Setelah itu, BSF diberi pakan POSD yang sudah difерментasi pada kondisi suhu lingkungan 30°C dengan kelembaban berkisar antara 60 hingga 70%.

Lebih lanjut, biomassa larva BSF memiliki potensi untuk dikembangkan menjadi berbagai produk turunan yang bernilai komersial, antara lain sebagai bahan baku pakan unggas (Bovera et al., 2018; Loponte et al., 2017; Murawska et al., 2021) dan pakan ikan (Tippayadara et al., 2021; Were et al., 2022). Selain itu, kandungan lipid yang tinggi memungkinkan pemanfaatannya dalam produksi bahan bakar biodiesel (Jing Lim et al., 2022), serta sebagai bahan tambahan pangan bagi manusia, seperti margarin (Smetana et al., 2020), dan komponen pendukung dalam formulasi roti (Delicato et al., 2020).

KESIMPULAN

BSF sebagai serangga polifagus yang dapat hidup secara alami di lingkungan perkebunan kelapa sawit, telah terbukti sebagai agen biokonversi yang efektif dalam mengolah berbagai material organik. Konversi yang dilakukan oleh BSF ini dapat menghasilkan berbagai produk turunan baru yang bernilai tinggi seperti pakan ayam, pakan burung, pakan ikan, biodiesel, margarin, hingga pupuk hayati. Siklus hidup BSF terdiri dari lima tahapan, yang masing-masingnya memiliki karakteristik biologis dan ekologis spesifik yang harus diperhatikan. Memahami lebih dalam terkait siklus hidup dan interaksi antar faktor-faktor yang mempengaruhinya sangat penting untuk diperhatikan, guna mengoptimalkan aplikasi BSF dalam sistem bioekonomi berkelanjutan. Lebih lanjut budidaya BSF ini dapat menawarkan solusi yang efisien dan berkelanjutan dalam sinergisasi pengolahan limbah ataupun produk samping industri kelapa sawit yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

- Addy, M., Huo, S., Liu, J., Li, K., Cheng, P., Schiappacasse, C., Chen, D., Cheng, Y., Liu, Y., Ma, Y., Wang, L., Wang, Y., Cobb, K., Chen, P., & Ruan, R. (2021). Bioconversion Technologies: Insect and Worm Farming. In *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering* (pp. 235–256). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819148-4.00008-7>
- Albalawneh, A., Hasan, H., Alarsan, S. F., Diab, M., Abu Znaimah, S., Sweity, A., Aladwan, M. M., Sharman, B., Alalwan, A. M., AlBalawnah, Y., Dayyeh, M. A., & Alnaimat, E. (2024). Evaluating the Influence of Nutrient-Rich Substrates on the Growth and Waste Reduction Efficiency of Black Soldier Fly Larvae. *Sustainability (Switzerland)*, 16(22). <https://doi.org/10.3390/su16229730>
- Banks, I. J., Gibson, W. T., & Cameron, M. M. (2014). Growth rates of black soldier fly larvae fed on fresh human faeces and their implication for improving sanitation. *Tropical Medicine & International Health*, 19(1), 14–22. <https://doi.org/10.1111/tmi.12228>

- 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>
- Bovera, F., Loponte, R., Pero, M. E., Cutrignelli, M. I., Calabrò, S., Musco, N., Vassalotti, G., Panettieri, V., Lombardi, P., Piccolo, G., Di Meo, C., Siddi, G., Fliegerova, K., & Moniello, G. (2018). Laying performance, blood profiles, nutrient digestibility and inner organs traits of hens fed an insect meal from *Hermetia illucens* larvae. *Research in Veterinary Science*, 120, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2018.09.006>
- Broeckx, L., Frooninckx, L., Slegers, L., Berrens, S., Noyens, I., Goossens, S., Verheyen, G., Wuyts, A., & Van Miert, S. (2021). Growth of black soldier fly larvae reared on organic side-streams. *Sustainability*, 13(23). <https://doi.org/10.3390/su132312953>
- Cai, M., Li, L., Zhao, Z., Zhang, K., Li, F., Yu, C., Yuan, R., Zhou, B., Ren, Z., Yu, Z., & Zhang, J. (2022). Morphometric Characteristic of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Wuhan Strain and Its Egg Production Improved by Selectively Inbreeding. *Life*, 12(6), 873. <https://doi.org/10.3390/life12060873>
- Cattaneo, A., Belperio, S., Sardi, L., Martelli, G., Nannoni, E., Dabbou, S., & Meneguz, M. (2025). Black Soldier Fly Larvae's Optimal Feed Intake and Rearing Density: A Welfare Perspective (Part II). *Insects*, 16(1). <https://doi.org/10.3390/insects16010005>
- Chia, S. Y., Tanga, C. M., Khamis, F. M., Mohamed, S. A., Salifu, D., Sevgan, S., Fiaboe, K. K. M., Niassy, S., Van Loon, J. J. A., Dicke, M., & Ekesi, S. (2018). Threshold temperatures and thermal requirements of black soldier fly *Hermetia illucens*: Implications for mass production. *PLoS ONE*, 13(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0206097>
- Čižková, H., Newton, G. L., Lacy, R. C., & Kozánek, M. (2015). The use of fly larvae for organic waste treatment. *Waste Management*, 35, 68–80. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.026>
- 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>
- Delicato, C., Schouteten, J. J., Dewettinck, K., Gellynck, X., & Tzompa-Sosa, D. A. (2020). Consumers' perception of bakery products with insect fat as partial butter replacement. *Food Quality and Preference*, 79, 103755. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2019.103755>
- Diener, S., Studt Solano, N. M., Roa Gutiérrez, F., Zurbrügg, C., & Tockner, K. (2011). Biological Treatment of Municipal Organic Waste using Black Soldier Fly Larvae. *Waste and Biomass Valorization*, 2(4), 357–363. <https://doi.org/10.1007/s12649-011-9079-1>
- Diener, S., Zurbrügg, C., & Tockner, K. (2009). Conversion of organic material by black soldier fly larvae: Establishing optimal feeding rates. *Waste Management and Research*, 27(6), 603–610. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103838>
- Doelle, K., Oliveira, F., & Smith, R. (2016). Gold Nanoparticle Uptake and Distribution in the Digestive Tract of *Hermetia illucens* Stratiomyidae: Diptera (L.1758) Based on Transmission Electron Microscopy. *Annual Research & Review in Biology*, 9(3), 1–8. <https://doi.org/10.9734/ARRB/2016/23907>
- Facchini, E., Shrestha, K., van den Boer, E., Junes, P., Sader, G., Peeters, K., & Schmitt, E. (2022). Long-Term Artificial Selection for Increased Larval Body Weight of *Hermetia illucens* in Industrial Settings. *Frontiers in Genetics*, 13. <https://doi.org/10.3389/fgene.2022.865490>
- Furman, D. P., Young, R. D., & Catts, Paul. E. (1959). *Hermetia illucens* (Linnaeus) as a Factor in the Natural Control of *Musca domestica* Linnaeus. *Journal of Economic Entomology*, 52(5), 917–921. <https://doi.org/10.1093/jee/52.5.917>
- Heussler, C. D., Walter, A., Oberkofler, H., Insam, H., Arthofer, W., Schlick-Steiner, B. C., & Steiner, F. M. (2018). Influence of three artificial light

- sources on oviposition and half-life of the Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): Improving small-scale indoor rearing. *PLOS ONE*, 13(5), e0197896. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0197896>
- Holmes, L. A., Vanlaerhoven, S. L., & Tomberlin, J. K. (2012). Relative Humidity Effects on the Life History of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Environmental Entomology*, 41(4), 971–978. <https://doi.org/10.1603/EN12054>
- Holmes, L. A., Vanlaerhoven, S. L., & Tomberlin, J. K. (2013). Substrate Effects on Pupation and Adult Emergence of *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): Table 1. *Environmental Entomology*, 42(2), 370–374. <https://doi.org/10.1603/EN12255>
- Jayanthi, S., & Khairani, R. (2017). TEKNIK BUDIDAYA BLACK SOLDIER FLY (*Hermetia illucens*). In *Jurnal Jeumpa* (Vol. 4, Issue 1).
- Jing Lim, J., Seng Liew, C., Rakasat, R., Merican, Z. M. A., Kiatkittipong, K., Alaaeldin Abdelfattah, E., Mohamad, M., Bashir, M. J. K., Karabo Obed Ntwampe, S., & Lim, J. W. (2022). Cellulase pretreated palm decanter cake for feeding of black soldier fly larvae in triggering bioaccumulation of protein and lipid into biodiesel productions. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102485. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102485>
- Julita, U., Lusianti F. L., Eka Putra, R., & Dana Perma, A. (2020). Mating Success and Reproductive Behavior of Black Soldier Fly *Hermetia illucens* L. (Diptera, Stratiomyidae) in Tropics. *Journal of Entomology*, 17(3), 117–127. <https://doi.org/10.3923/je.2020.117.127>
- Kenis, M., Koné, N., Chrysostome, C. A. A. M., Devic, E., Koko, G. K. D., Clottey, V. A., Nacambo, S., & Mensah, G. A. (2014). Insects used for animal feed in West Africa. *Entomologia*. <https://doi.org/10.4081/entomologia.2014.218>
- Klüber, P., Müller, S., Schmidt, J., Zorn, H., & Rühl, M. (2022). Isolation of Bacterial and Fungal Microbiota Associated with *Hermetia illucens* Larvae Reveals Novel Insights into Entomopathogenicity. *Microorganisms*, 10(2). <https://doi.org/10.3390/microorganisms10020319>
- Klüber, P., Tegtmeier, D., Hurka, S., Pfeiffer, J., Vilcinskas, A., Rühl, M., & Zorn, H. (2022). Diet Fermentation Leads to Microbial Adaptation in Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*; Linnaeus, 1758) Larvae Reared on Palm Oil Side Streams. *Sustainability (Switzerland)*, 14(9). <https://doi.org/10.3390/su14095626>
- Kusumah, M. S. (2018). Pengamatan Pertumbuhan Black Soldier Fly, *Hermetia illucens* L. (Diptera: Stratiomyidae). Data tidak dipublikasikan
- Kusumah, M. S., Bajra, B. D., Samosir, P., & Saveliev, Y. (2018). Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as an Efficient Bioreactor for a Sustainable and Industrial Scaled Oil Palm Biorefinery: a Bioconversion, Processes, Procedures, Product, and Management Concept. Data tidak dipublikasikan
- Kusumah, M. S. (2023). BLACK SOLDIER FLY (*Hermetia illucens* L.): AGEN BIOKONVERSI PRODUK SAMPING INDUSTRI KELAPA SAWIT DAN PEMANFAATANNYA DALAM PRODUKSI MINYAK DAN PROTEIN. *WARTA Pusat Penelitian Kelapa Sawit*, 28(2), 115–131. <https://doi.org/10.22302/iopri.war.warta.v28i2.110>
- Kusumah, M. S., Panjaitan, F. R., Yudanto, B. G., & Bajra, B. D. (2025). Substrate degradation and black soldier fly larvae bioconversion performance profile on co-digested oil palm biomass-based feedstock. *PLOS ONE*, 20(9 September). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0332046>
- Leela, D., & Nur, S. M. (2019). Processing technology POME-pond in Indonesia: A mini review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 365(1), 012009. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/365/1/012009>
- Lisboa, H. M., Nascimento, A., Arruda, A., Sarinho, A., Lima, J., Batista, L., Dantas, M. F., & Andrade, R. (2024). Unlocking the Potential of Insect-Based Proteins: Sustainable Solutions for Global Food Security and Nutrition. *Foods*, 13(12), 1846. <https://doi.org/10.3390/foods13121846>
- Liu, T., Klammsteiner, T., Dregulo, A. M., Kumar, V., Zhou, Y., Zhang, Z., & Awasthi, M. K. (2022).

- Black soldier fly larvae for organic manure recycling and its potential for a circular bioeconomy: A review. *Science of The Total Environment*, 833, 155122. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155122>
- Liu, X., Chen, X., Wang, H., Yang, Q., ur Rehman, K., Li, W., Cai, M., Li, Q., Mazza, L., Zhang, J., Yu, Z., & Zheng, L. (2017). Dynamic changes of nutrient composition throughout the entire life cycle of black soldier fly. *PLOS ONE*, 12(8), e0182601. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0182601>
- Loponte, R., Nizza, S., Bovera, F., De Riu, N., Fliegerova, K., Lombardi, P., Vassalotti, G., Mastellone, V., Nizza, A., & Moniello, G. (2017). Growth performance, blood profiles and carcass traits of Barbary partridge (*Alectoris barbara*) fed two different insect larvae meals (*Tenebrio molitor* and *Hermetia illucens*). *Research in Veterinary Science*, 115, 183–188. <https://doi.org/10.1016/j.rvsc.2017.04.017>
- Mujahid, Amin, A. A., Hariyadi, & Fahmi, M. R. (2017). *Biokonversi Tandan Kosong Kelapa Sawit Menggunakan Trichoderma Sp. dan Larva Black Soldier Fly Menjadi Bahan Pakan Unggas Oil Palm Empty Bunches Bioconversion using Trichoderma sp. and Black Soldier Fly Larvae as Poultry Feed Composition*. <https://journal.ipb.ac.id/index.php/ipthp/article/view/19620>
- Muraro, T., Lalanne, L., Pelozuelo, L., & Calas-List, D. (2024). Mating and oviposition of a breeding strain of black soldier fly *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): polygyny and multiple egg-laying. *Journal of Insects as Food and Feed*, 10(8), 1423–1435. <https://doi.org/10.1163/23524588-20220175>
- Murawska, D., Daszkiewicz, T., Sobotka, W., Gesek, M., Witkowska, D., Matusevičius, P., & Bakula, T. (2021). Partial and total replacement of soybean meal with full-fat black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal in broiler chicken diets: Impact on growth performance, carcass quality and meat quality. *Animals*, 11(9). <https://doi.org/10.3390/ani11092715>
- Nabaterega, R., Kavuma, C., Darr, D., & Egonyu, J. P. (2025). Insect-based organic waste recycling technology: Potential and bottlenecks for large-scale application in the bioeconomy. *International Journal of Tropical Insect Science*. <https://doi.org/10.1007/s42690-025-01502-x>
- Nakamura, S., Ichiki, R. T., Shimoda, M., & Morioka, S. (2016). Small-scale rearing of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), in the laboratory: low-cost and year-round rearing. *Applied Entomology and Zoology*, 51(1), 161–166. <https://doi.org/10.1007/s13355-015-0376-1>
- Nugroho, R. A., Aryani, R., Hardi, E. H., Manurung, H., Rudianto, R., & Jati, W. N. (2024). Fermented palm kernel waste with different sugars as substrate for black soldier fly larvae. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 10(2), 503–516. <https://doi.org/10.22035/gjesm.2024.02.06>
- Nyakeri, E. M., Ogola, H. J., Oginga Odinga, J., Amimo, F. A., & Ayieko, M. A. (2017). Comparison of the performance of different baiting attractants in the egg laying activity of the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.). ~ 1583 ~ *Journal of Entomology and Zoology Studies*, 5(6).
- Onincx, D. G. A. B., Van Broekhoven, S., Van Huis, A., & Van Loon, J. J. A. (2015). Feed conversion, survival and development, and composition of four insect species on diets composed of food by-products. *PLOS ONE*, 10(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0144601>
- 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>
- Pérez-Pacheco, R., Hinojosa-Garro, D., Ruíz-Ortíz, F., Camacho-Chab, J. C., Ortega-Morales, B. O., Alonso-Hernández, N., Fonseca-Muñoz, A., Landero-Valenzuela, N., Loeza-Concha, H. J., Diego-Nava, F., Arroyo-Balán, F., & Granados-Echegoyen, C. A. (2022). Growth of the Black

- Soldier Fly *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae) on Organic-Waste Residues and Its Application as Supplementary Diet for Nile Tilapia *Oreochromis niloticus* (Perciformes: Cichlidae). *Insects*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/insects13040326>
- Permana, A. D., Putra, R. E., Nurulfah, A., Rosmiati, M., Kinashih, I., & Sari, D. A. (2021). GROWTH OF BLACK SOLDIER FLY LARVAE (*Hermetia illucens*) FED WITH PAK CHOI (*Brassica chinensis*) AND CARP (*Cyprinus carpio*) RESIDUES. *Biotropia*, 28(2), 92–101. <https://doi.org/10.11598/btb.2021.28.2.1078>
- Purkayastha, D., & Sarkar, S. (2022). Sustainable waste management using black soldier fly larva: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 19(12), 12701–12726. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03524-7>
- Purnamasari, L., P Lopez, Z., & dela Cruz, J. F. (2022). A Review: Evaluation of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae Meal as a Dietary Protein Source in Poultry Diets. *Biotropika: Journal of Tropical Biology*, 10(3), 191–202. <https://doi.org/10.21776/ub.biotropika.2022.01.03.05>
- Rampure, S. M., & Velayudhannair, K. (2023). Influence of agricultural wastes on larval growth phases of the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae): An integrated approach. *Journal of Applied and Natural Science*, 15(2), 860–869. <https://doi.org/10.31018/jans.v15i2.4656>
- Rehman, K. ur, Hollah, C., Wiesotzki, K., Rehman, R. ur, Rehman, A. U., Zhang, J., Zheng, L., Nienaber, T., Heinz, V., & Aganovic, K. (2023). Black soldier fly, *Hermetia illucens* as a potential innovative and environmentally friendly tool for organic waste management: A mini-review. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 41(1), 81–97. <https://doi.org/10.1177/0734242X221105441>
- Sasmita, K. D., Rokmah, D. N., Sakiroh, Hafif, B., & Putra, S. (2022). The Effect of Biofertilizer from Waste Bioconversion on the Growth of Cocoa Seedlings. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1038(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1038/1/012008>
- Shumo, M., Khamis, F. M., Tanga, C. M., Fiaboe, K. K. M., Subramanian, S., Ekesi, 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>
- Siddiqui, S. A., Osei-Owusu, J., Yunusa, B. M., Rahayu, T., Fernando, I., Shah, M. A., & Centoducati, G. (2023). Prospects of edible insects as sustainable protein for food and feed – a review. *Journal of Insects as Food and Feed*, 10(2), 191–217. <https://doi.org/10.1163/23524588-20230042>
- Sinansari, S., & Fahmi, M. R. (2020). Black soldier fly larvae as nutrient-rich diets for ornamental fish. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 493(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/493/1/012027>
- Singh, A., Srikanth, B. H., & Kumari, K. (2021). Determining the Black Soldier fly larvae performance for plant-based food waste reduction and the effect on Biomass yield. *Waste Management*, 130, 147–154. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.05.028>
- Smetana, S., Leonhardt, L., Kauppi, S.-M., Pajic, A., & Heinz, V. (2020). Insect margarine: Processing, sustainability and design. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121670. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121670>
- Soetemans, L., Uyttebroek, M., & Bastiaens, L. (2020). Characteristics of chitin extracted from black soldier fly in different life stages. *International Journal of Biological Macromolecules*, 165, 3206–3214. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.11.041>
- Tippayadara, N., Dawood, M. A. O., Krutmuang, P., Hoseinifar, S. H., Doan, H. Van, & Paolucci, M. (2021). Replacement of Fish Meal by Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) Larvae Meal: Effects on Growth, Haematology, and Skin Mucus Immunity of Nile Tilapia, *Oreochromis*

- niloticus. *Animals*, 11(1), 193.
<https://doi.org/10.3390/ani11010193>
- Tomberlin, J. K., & Sheppard, D. C. (2002). Factors Influencing Mating and Oviposition of Black Soldier Flies (Diptera: Stratiomyidae) in a Colony. *Journal of Entomological Science*, 37(4), 345–352. <https://doi.org/10.18474/0749-8004-37.4.345>
- Wang, Y.-S., & Shelomi, M. (2017). Review of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) as Animal Feed and Human Food. *Foods*, 6(10), 91. <https://doi.org/10.3390/foods6100091>
- Were, G. J., Irungu, F. G., Ngoda, P. N., Affognon, H., Ekesi, S., Nakimbugwe, D., Fiaboe, K. K. M., & Mutungi, C. M. (2022). Nutritional and microbial quality of extruded fish feeds containing black soldier fly (*Hermetia illucens* L) larvae meal as a replacement for fish meal for Nile Tilapia (Oreochromis niloticus) and African sharptooth catfish (Clarias gariepinus). *Journal of Applied Aquaculture*, 34(4), 1036–1052. <https://doi.org/10.1080/10454438.2021.1922327>
- Zhang, J., Huang, L., He, J., Tomberlin, J. K., Li, J., Lei, C., Sun, M., Liu, Z., & Yu, Z. (2010). An Artificial Light Source Influences Mating and Oviposition of Black Soldier Flies, *Hermetia illucens*. *Journal of Insect Science*, 10(202), 1–7. <https://doi.org/10.1673/031.010.20201>
- Zhang, J., Luo, Z., Li, N., Yu, Y., Cai, M., Zheng, L., Zhu, F., Huang, F., K. Tomberlin, J., Rehman, K. ur, Yu, Z., & Zhang, J. (2023). Cellulose-degrading bacteria improve conversion efficiency in the co-digestion of dairy and chicken manure by black soldier fly larvae. *Journal of Environmental Management*, 348. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119156>