

BLACK SOLDIER FLY (*HERMETIA ILLUCENS*) SEBAGAI BIOREAKTOR ALAMI UNTUK PRODUKSI PUPUK ORGANIK BERBASIS LIMBAH PABRIK MINYAK KELAPA SAWIT

Brahmani Dewa Bajra

Abstrak - Sebagai salah satu produsen terbesar minyak sawit di dunia, Indonesia perlu menerapkan prinsip *Circular Green Economy* (CGE). Pengolahan produk sampingan pabrik minyak sawit secara efektif dan efisien merupakan salah satu upaya penerapan prinsip CGE. Teknologi pengomposan merupakan salah satu upaya yang lazim dilakukan untuk mengolah tandan kosong kelapa sawit (TKKS) secara berkelanjutan. Namun, belum ada metode yang dinilai dapat dilakukan dan bernilai ekonomis, mudah diterapkan, berkelanjutan, efektif, dan efisien. Black Soldier Fly (BSF, *Hermetia illucens*) adalah salah satu organisme unik dan bersifat endemik di Sumatera Utara yang dapat membantu melakukan pengomposan TKKS dan meningkatkan nilai ekonomisnya. Organisme yang memiliki sifat adaptif yang sangat tinggi ini telah berasimilasi dengan kondisi lingkungan di perkebunan kelapa sawit, bahkan sering ditemui di TKKS yang terdekomposisi secara alami. BSF sangat mudah dikembangbiakkan dan dilengkapi dengan enzim serta mikrobiota dalam tubuhnya untuk memperkaya kompos TKKS serta mempercepat proses pengomposan TKKS menjadi sebuah produk biofertilizer dalam jangka waktu yang lebih singkat.

Kata kunci: Tandan Kosong Kelapa Sawit, Pengomposan, Pupuk, Berkelanjutan, *Black Soldier Fly*

PENDAHULUAN

Indonesia adalah salah satu produsen terbesar minyak sawit di dunia dengan industri kelapa sawit yang merupakan salah satu industri penyumbang devisa terbesar negara. Namun, efek samping dari industrialisasi kelapa sawit, yakni penumpukan limbah yang telah menjadi permasalahan yang dihadapi para pelaku industri kelapa sawit di Indonesia. Penumpukan limbah akibat kegiatan industri minyak sawit merupakan salah satu isu yang menjadi bahan kampanye gelap (*Black Campaign*) terhadap industri kelapa sawit (Almeida Frazão et al., 2010).

CGE adalah prinsip ekonomi untuk meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya sebagai sarana penunjang produksi dalam sebuah sistem dengan menggunakan teknologi yang ramah lingkungan dan terbarukan. Prinsip ini mencakup penerapan prinsip *Circular Economy* (CE), yakni sistem penggunaan

sumber daya yang dihasilkan dari suatu sistem secara efisien, berkelanjutan, serta ramah lingkungan sebagai sarana penunjang produksi dari sistem tersebut. Prinsip CE dengan menggunakan pendekatan biologis (*Green approach*) untuk menghasilkan sumber daya organik yang memiliki nilai jual, bermutu tinggi, serta memiliki efisiensi tinggi adalah dasar penerapan dari CGE (Chen et al., 2020; D'Amato et al., 2017, 2019; Gregorio et al., 2018; Pergola et al., 2018; Seroka-Stolka & Ociepa-Kubicka, 2019).

Limbah TKKS yang dihasilkan mencapai 21% dari 100% tandan buah segar, sementara limbah cair berupa *Palm Oil Mill Effluent* dapat mencapai 58.3% dari keseluruhan neraca massa produksi minyak sawit (Razali et al., 2012). Limbah TKKS yang tidak ditangani dengan baik dapat menyebabkan pencemaran lingkungan seperti gas rumah kaca (karbon dioksida dan methane, hasil metabolisme dan respirasi mikroba) dan bau yang tidak sedap diakibatkan oleh terjadinya fermentasi anaerobik di tumpukan limbah tersebut. TKKS kelapa sawit dapat dimanfaatkan sebagai pupuk organik, namun, memerlukan metode pengomposan yang efektif dan efisien untuk mengolahnya. (FUJITA et al., 2019; Hau et al., 2020).

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

Brahmani Dewa Bajra (✉)
Pusat Penelitian Kelapa Sawit
Jl. Brigjen Katamsa No. 51 Medan, Indonesia
Email: brahmanibajra93@gmail.com

Pengomposan adalah upaya perombakan senyawa organik kompleks dalam suatu substrat menjadi senyawa yang lebih sederhana dengan memanfaatkan agen biologis secara aerobik dan/atau anaerobik fakultatif terkontrol (Pergola et al., 2018) (Ayilara et al., 2020) dan menghasilkan produk berupa pupuk organik dengan berbagai manfaat (Palaniveloo et al., 2020). Teknologi pengomposan adalah teknologi yang sudah umum dilakukan, namun memiliki kelemahan di antaranya adalah tumbuhnya mikroorganisme patogen serta inefisiensi penggunaan lahan akibat durasi pengomposan yang lama (Ayilara et al., 2020; Harindintwali et al., 2020; Supriatna et al., 2014).

Teknologi pengomposan adalah salah satu metode yang dapat diterapkan dalam mengatasi penumpukan limbah padat pabrik kelapa sawit, yakni TKKS. Pengomposan TKKS merupakan salah satu metode

untuk menekan penggunaan pupuk komersial di kebun kelapa sawit hingga 40% (Rahutomo et al., 2007). Hingga saat ini, belum ada metode yang dinilai sebagai metode yang paling efektif dan efisien dalam mengomposkan TKKS (Harindintwali et al., 2020; Rame, 2018).

BSF memiliki sifat polifag mampu mendegradasi TKKS dengan sekresi saliva dengan kandungan enzim amilase dan lipase serta aktivitas enzimatis dalam sistem pencernaannya. (da Silva & Hesselberg, 2020; W. Kim et al., 2011; Li et al., 2011; Zhang & Zhang, 2020; Zhu et al., 2019). Tingginya tingkat adaptasi BSF mempengaruhi keragaman mikrobiota dan aktivitas enzimatis BSF akibat variasi jenis pakan yang dikonsumsi (Alvarez et al., 2019; Bonelli et al., 2020; Bosch et al., 2019; Zhang & Zhang, 2020).



Gambar 1. (kiri) Larva Black Soldier Fly ; (kanan) Lalat Black Soldier Fly (Bajra et al., 2018)

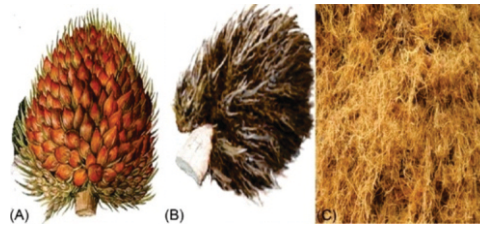
Proses pengomposan yang efektif, efisien dan menguntungkan untuk menerapkan prinsip *circular green economy* dalam industri kelapa sawit sangat dibutuhkan. Memilah metode yang sesuai untuk pengomposan perlu dimulai dengan menentukan dan mempelajari serta mengambil kesimpulan akan sebuah teknologi terbaru untuk pengomposan TKKS yang dapat diterapkan penggiat industri minyak sawit.

1. TKKS (Tandan Kosong Kelapa Sawit) : Substrat bersifat “Sulit-Olah”

Sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2, TKKS adalah bagian dari Tandan Buah Segar (TBS) yang telah dipisahkan dari buah – buahnya melalui proses

sterilisasi dan pemipilan di Pabrik Minyak Kelapa Sawit. Tingginya kandungan serat merupakan penyebab TKKS sulit dimanfaatkan selain rendahnya nutrisi (Trisakti et al., 2018).

Kandungan nutrisi TKKS dalam Tabel 1 menunjukkan tingginya rasio C/N (77.7%), menunjukkan bahwa TKKS adalah substrat yang sulit terdekomposisi dalam waktu singkat secara alami. Kandungan karbon yang tinggi dalam TKKS (44.1%) merupakan akumulasi dari kandungan selulosa dan hemiselulosa. Rendahnya kandungan N pada TKKS merupakan salah satu parameter yang membatasi pertumbuhan dan perkembangan mikroba. Menurunkan rasio C/N secara efektif dan efisien adalah kunci teknik pengomposan yang utama (Aini & Linda, 2020; Hau et al., 2020; Ishak et al., 2014; Siddiquee et al., 2017; USDA-NRCS, 2011).



Gambar 2. (A) Tandan Buah Segar ; (B) Tandan Kosong Kelapa Sawit ; (C) Serat TKKS (Saba et al., 2017)

Tabel 1. Kandungan Nutrisi Tandan Kosong Kelapa Sawit (Razali et al., 2012)

Parameter	Kandungan
Kadar Air (%)	44.9
pH	5.9
C(%)	44.1
N(%)	0.6
C/N	77.7
Selulosa (%)	37.3
Hemiselulosa (%)	27.8
Lignin (%)	16.5
Abu (%)	5.8
Fosfor (%)	0.1
Kalium (%)	1.4

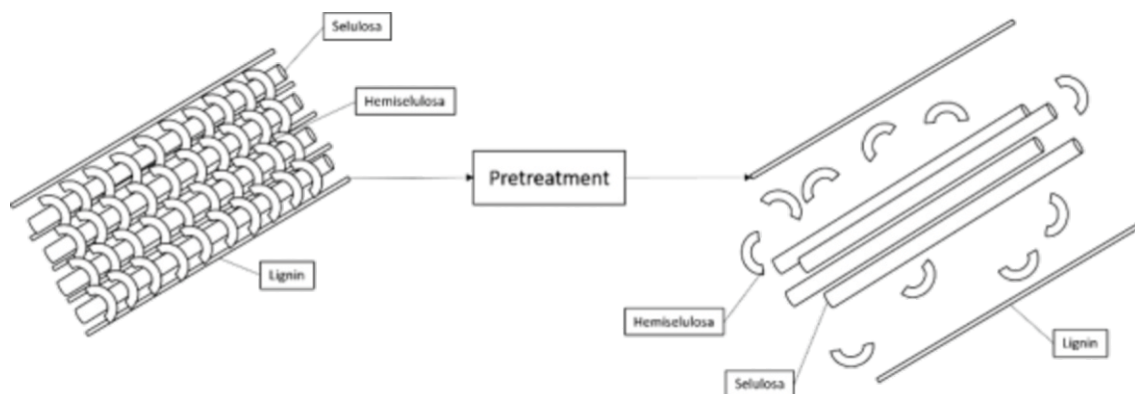
Menurut Darnoko (1992), teknik pengomposan TKKS terbagi menjadi 3 (tiga) tahapan. Pertama-tama TKKS perlu dipersiapkan terlebih dahulu. Kemudian perlu ada kegiatan persiapan dan inokulasi agen pengomposan. Kegiatan pengomposan juga memerlukan kegiatan pengaturan tumpukan kompos agar menjaga proses berjalan dengan baik sehingga hasil kompos dapat memenuhi harapan (Almeida Frazão et al., 2010; Darnoko, 1992).

a. Persiapan Substrat TKKS

Proses persiapan TKKS merupakan proses perombakan struktur kimia dan fisiknya agar dapat didegradasi dengan mudah oleh mikroba. Tujuan dari proses persiapan substrat adalah : a)

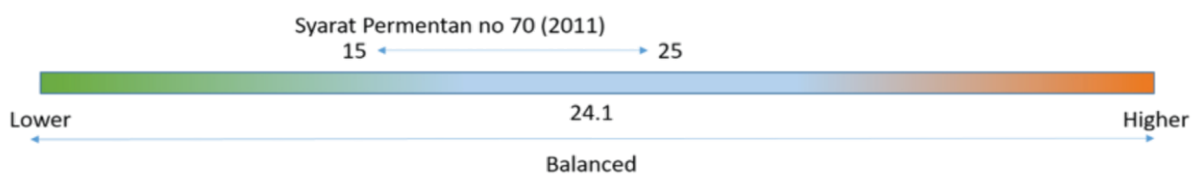
Merombak struktur Lignin ; b) Menurunkan kristilanitas Selulosa ; c) Meningkatkan porositas selulosa. Syarat yang harus dipenuhi proses ini antara lain : a) Meningkatkan kandungan gula sederhana yang mudah diakses; b) Menghindari kehilangan karbohidrat ; c) Tidak menghasilkan senyawa berbahaya ; d) murah dan mudah dilakukan (Muhd Ali et al., 2016).

Proses persiapan yang efektif sangat dibutuhkan untuk mempercepat proses pengomposan untuk mencapai kualitas kompos TKKS yang diharapkan (Hamzah et al., 2018; Himmatun Wisda et al., 2016; Zulkiple et al., 2016). Persiapan TKKS dapat dilakukan dengan metode fisika, kimia, fisika-kimia, maupun biologis (Anita et al., 2020; Hamzah et al., 2018; Hidayat, 2013; Isroi et al., 2012; Muhd Ali et al., 2016; Zahrim et al., 2017; Zhai et al., 2020).



Gambar 3. Skema Perombakan Senyawa Lignoselulosa di TKKS

b. Composting Agent



Gambar 4. Grafik Rasio C/N (Permentan, 2011)

Dalam proses pengomposan, diperlukan metode untuk menurunkan rasio C/N untuk meningkatkan kandungan nutrisi yang dapat diserap oleh tanaman. Tingginya rasio C/N disebabkan oleh tingginya kandungan C-organik yang diakibatkan oleh tingginya kandungan gula kompleks (Tahir et al., 2019). Enzim yang dapat merombak senyawa tersebut antara lain Peroxidase dan Laccase Arbaain et al., 2019). Mikroba yang mengandung enzim β -Glukosidase (Himmatun Wisda et al., 2016) juga dinilai optimal dan efektif untuk merombak TKKS. Studi terbaru menunjukkan bahwa pengomposan TKKS sebagian besar dilakukan oleh bakteri dari genus *Paenibacillia* (Tahir et al., 2019). Namun sejauh ini, peneliti menggunakan bakteri endofitik seperti *Trichoderma* sp. dan *Aspergillus* sp. (Hanum et al., 2015).

c. Pengaturan Kondisi Pengomposan

Aspek utama yang perlu diperhatikan dalam

mengatur kondisi pengomposan adalah pengaturan kadar air dan oksigen. Namun, beberapa aspek lain antara lain adalah suhu dan pH dari pengomposan juga dapat memengaruhi keberlangsungan hidup mikroba (Hamzah et al., 2018; Himmatun Wisda et al., 2016).

Aerasi adalah salah satu bentuk pengaturan pengomposan untuk meningkatkan aktivitas biologis dalam pengomposan (Xu et al., 2015). Aerasi pengomposan paling umum dilakukan dengan metode aerasi aktif, yaitu pengadukan yang dilakukan dengan memanfaatkan tenaga manusia yang dilengkapi mesin berat (Schuchardt et al., 2005). Selain metode aerasi aktif, metode aerasi pasif, seperti menggunakan instalasi pengomposan dengan pipa aerasi, juga diterapkan untuk mengatur aliran oksigen tumpukan (Barrington et al., 2003; Toriyama & Asako, 2010).

Pengaturan dan manajemen kandungan air dalam pengomposan umumnya bergantung pada air

tawar (Hamzah et al., 2018). Namun Pengaplikasian POME pada tumpukan pengomposan juga dapat dilakukan. Selain itu, pemberian POME saat pengomposan tidak hanya menjaga kadar airnya, namun juga membantu repopulasi mikroba dan menunjang propagasi mikroba di dalam substrat selama proses pengomposan (Almeida Frazão et al., 2010; Hamzah et al., 2018; Razali et al., 2012; Winanti et al., 2019).

Suhu juga menjadi aspek yang perlu diperhatikan dalam proses pengomposan, sebab mikroba agen pengomposan memiliki toleransi suhu untuk menunjang keberlangsungan hidupnya. Sebagai contoh, *Trichoderma* sp. sebagai mikroba yang umum digunakan sebagai agen pengompos TKKS, tidak dapat bertahan hidup di suhu lebih dari 37°C (Domingues et al., 2016).

2. Teknologi Pengomposan Umum dan Pendekatan Sistem Pengomposan yang Lebih Efektif dan Efisien

Peneliti dari berbagai aspek telah mencoba dan meningkatkan efektivitas dan efisiensi pengomposan TKKS. Namun, belum ada satu metode yang terbukti efektif sebagai teknik pengomposan yang baik. Selain itu, belum ada metode pengomposan yang memberikan keuntungan komersil langsung selain pengurangan penggunaan pupuk sintetis, sehingga penerapan metode pengomposan kurang diminati penggiat industri kelapa sawit. Riset – riset terkait pengomposan TKKS tercantum di tabel 2.

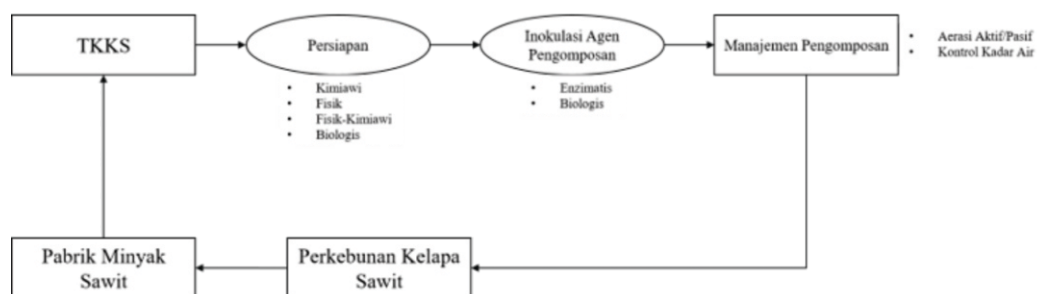
Sebagaimana ditunjukkan pada tabel 2, mengacu pada hasil rasio C/N, bahwa membutuhkan

waktu lebih dari satu bulan untuk mendapatkan hasil yang sesuai dan layak disebut pupuk organik (Permentan, 2011). Dengan menggunakan agen pengomposan yang langka dan tidak tersedia secara komersil, atau menggunakan mesin berat, dapat memperpendek durasi pengomposan, namun tidak dengan signifikan. Durasi pengomposan yang lama akan berimbas pada tingginya jejak karbon dan penggunaan lahan yang sangat luas, sehingga penumpukan tetap terjadi dan permasalahan pelepasan gas rumah kaca akan terjadi.

3. Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) sebagai Agen Pengompos untuk Proses Pengomposan TKKS

Metode pengomposan konvensional dapat dirangkum dalam suatu diagram alir yang tercantum di Gambar 5. Dalam sistem tersebut, seluruh komponen input baik dari fase persiapan, inokulasi, dan manajemen bertujuan utama untuk menghasilkan pupuk organik TKKS. Durasi waktu yang lama serta inefisiensi penggunaan lahan, seperti tercantum pada Tabel 2, merupakan salah satu kelemahan sistem ini.

Dibandingkan dengan sistem pengomposan konvensional lain pada tabel 2, pemanfaatan BSF sebagai bioreaktor dalam proses Biorefinery adalah salah satu metode yang memiliki efektivitas dan efisiensi yang tinggi, BSF juga menghasilkan produk yang memiliki nilai jual tinggi sehingga dapat diolah dan menjadi salah satu sumber pendapatan tambahan. Produk BSF di antaranya adalah pupuk organik, kitin, minyak, dan protein untuk pakan ternak (Bajra et al., 2018; Ravi et al., 2020).



Gambar 5. Diagram Alur Mekanisme Pengomposan Konvensional

Tabel 2. Riset Pengomposan TKKS

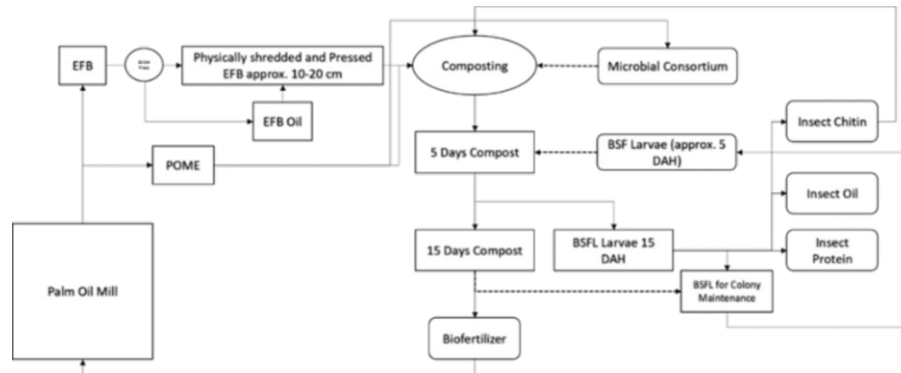
No	Metode Pengomposan				Hasil					Catatan	Referensi
	Persiapan	Agen Pengomposan	Manajemen		C/N	N(%)	P(%)	K(%)	Durasi		
			Aerasi	Kadar Air							
1	Pencincangan	<i>Trichoderma pseudokoningii</i> , <i>T. polysporum</i> , dan <i>Phanerochaete chrysosporium</i> .	Tidak diaerasi	N.A	19.4	1.9	0.6	3.8	28 hari		(Santi et al., 2019)
2	Pencincangan dan Pengempaan	POME	<i>In Vessel Aeration</i>	Air	13.8	0.6	0.1	1.4	40 hari		(Razali et al., 2012)
3	Pencincangan dan Pengempaan	<i>Bacillus</i> sp. S43, <i>Bacillus cereus</i> strain IARI-MB-6, <i>Bacillus cereus</i> strain TS11, <i>Alcaligenes faecalis</i> strain ZJUTBX11, <i>Bacillus</i> sp. 13847, <i>Stenotrophomonas</i> sp. S169-III-5, <i>Alcaligenes faecalis</i> strain KH-48 dan <i>Bacillus cereus</i> strain Y22	Manual	Air	25.56	1.35	N.A	N.A	30 hari		(Aini & Linda, 2020)

(continued)

No	Metode Pengomposan			Hasil					Catatan	Referensi
	Persiapan	Agen Pengomposan	Manajemen		C/N	N(%)	P(%)	K(%)	Durasi	
4	Pencincangan dan Pengempaan	LDD1 : Fungi Pengompos Lignoselulosa Aerobik (<i>Corynascus</i> sp., <i>Scytalidium</i> sp., <i>Chaetomium</i> sp. dan <i>Scopulariopsis</i> sp.), dan bakteri (<i>Bacillus</i> sp.) dan actinomycete (<i>Streptomyces</i> sp.). LDD2 mengandung ragi alkoholik fakultatif (<i>Saccharomyces</i> sp.), bakteri asam laktat (<i>Lactobacillus</i> sp.), dan bakteri pengkatabolis protein (<i>Bacillus</i> sp.)	Aerasi	Kadar Air	10.51	3.3	1.59	2.75	90 hari	(Kananam et al., 2011)
			Manual	Air						
5	Pencincangan dan Pengempaan	Activated Sludge	Manual	Air	12.2	0.703	88.6	77.4	100 hari	(Ishak et al., 2014)

(continued)

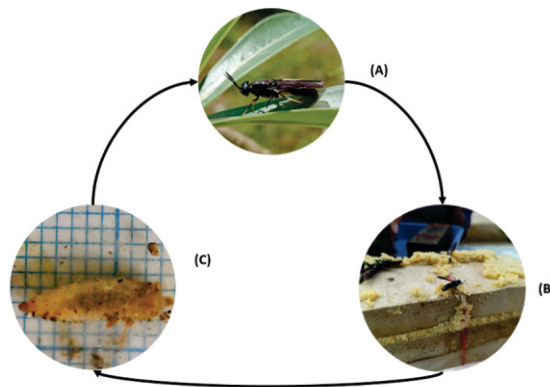
No	Metode Pengomposan				Hasil					Catatan	Referensi
	Persiapan	Agen Pengomposan	Manajemen		C/N	N(%)	P(%)	K(%)	Durasi		
			Aerasi	Kadar Air							
6	Pengincangan, Pengempaan, Perendaman, Autoklaf	<i>Trichoderma</i> sp.	Tidak diaerasi	Air	3.33	0.91	2.13	6.68	28 hari		(Siddiquee et al., 2017)
7	N.A	POME + Kotoran Ayam + <i>T. virens</i>	N.A	N.A	N.A	1.304	0.543	0.645	28 hari		(Amira Dayana et al., 2011)
8	Pencincangan	BSF	Etologi BSF	POME	11	4.69	3.17	2.29	15 hari	Produk : Pupuk Hayati, Protein, Minyak, dan Kitin	(Bajra et al., 2018)



Gambar 6. Metode Pengomposan Terintegrasi Sawit - BSF (Bajra et al., 2018)

Gambar 6 merupakan rangkuman dan kesimpulan yang dapat diterapkan sebagai metode pengomposan TKKS yang berkelanjutan, aman, efektif, dan ekonomis. Metode ini juga menghasilkan produk sampingan yang sangat menguntungkan sehingga dapat meningkatkan kesejahteraan penggiatnya. Selain itu, untuk memenuhi prinsip CGE, sistem ini memanfaatkan limbah secara efektif dan mengubahnya menjadi substrat yang memiliki nilai ekonomis serta produk saprota yang bermanfaat bagi kebun (Bagastyo & Soesanto, 2020; Jiang et al., 2019; C. H. Kim et al., 2021; Raksasat et al., 2020).

Black Soldier Fly (BSF) adalah serangga bersayap dua (diptera) dari famili Stratiomyidae. BSF berasal dari Amerika Selatan dan saat ini sudah tersebar di seluruh dunia. Sifat mudah dikembangbiakkan dan adaptif terhadap substrat pakannya, membuat BSF menjadi salah satu organisme yang dikembangbiakkan sebagai pakan ternak alternatif. Daur hidup BSF relatif singkat, satu minggu sebagai imago (*nonfeeding phase*), 2 hari fase telur dan penetasan (*initial stage*), dan 20-30 hari sebagai larva dan prepupa (*feeding phase*).



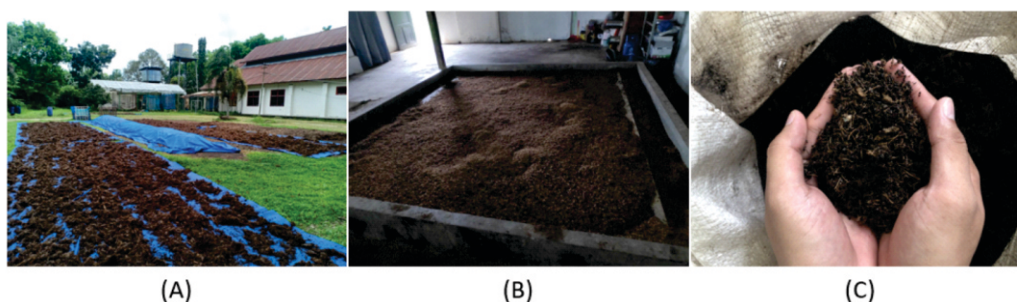
Gambar 7. Siklus Hidup BSF (Bajra et al., 2018)

BSF atau dikenal sebagai Lalat Tentara Hitam adalah organisme yang diklasifikasikan sebagai dekomposer yang bersifat *polyphagous*, non patogenik, dan efektif mengurangi dan mengurai biomassa limbah. BSF memiliki sistem pencernaan yang terdiri dari produksi saliva dengan aktivitas enzim amilase dan lipase yang tinggi dilanjutkan dengan

pencernaan enzimatik di saluran pencernaannya dengan aktivitas enzim amilase, lipase, dan protease yang sangat kuat (da Silva & Hesselberg, 2020; W. Kim et al., 2011; Li et al., 2011; Zhang & Zhang, 2020; Zhu et al., 2019). Tingginya tingkat adaptasi BSF menyebabkan tingginya tingkat keragaman mikrobiota dan aktivitas enzimatik BSF disebabkan oleh jenis

pakan yang beragam. Sehingga, BSF tidak dapat digeneralisasikan sebagai bioreaktor yang *uniform*, melainkan sebuah bioreaktor yang adaptif dengan aktivitas fisiologis yang mudah dimodifikasi (Alvarez et al., 2019; Bonelli et al., 2020; Bosch et al., 2019; Zhang & Zhang, 2020). BSF juga dapat menghasilkan kitin yang membantu pertumbuhan agen pengompos yang terdiri dari sebagian besarnya adalah fungi. Kitin yang diproduksi BSF dapat bermanfaat untuk memperkuat

dinding sel fungi dan mempertahankan keberlangsungan hidup fungi, sehingga meningkatkan efektivitas kinerja fungi dalam melakukan pengomposan. Sehingga BSF dapat disebut sebagai bioreaktor proses *biorefinery* TKKS yang ramah lingkungan dan dapat mendorong diversifikasi produk bernilai tinggi yang dihasilkan dari limbah TKKS (Bajra et al., 2018; Hadj Saadoun et al., 2020; Merzendorfer, 2011; USDA-NRCS, 2011; Wang & Shelomi, 2017).



Gambar 8. (A) Pengomposan Tahap Awal TKKS (Inokulan saja tanpa BSF) ; (B) Pengomposan Lanjutan TKKS (plus BSF) di Composting Pool ; (C) Kompos TKKS-BSF (Bajra et al., 2018)

KESIMPULAN

Metode pengomposan dengan bioreaktor BSF sebagai agen pengomposan adalah salah satu penerapan prinsip CGE. Metabolisme dan etologi BSF yang spesifik sesuai substrat hidupnya, dapat berdampak pada hasil sekresi berupa nutrisi tanaman yang spesifik dan mikroba pengompos dan dapat memperkaya biodiversitas mikrobiota di dalam substrat sehingga meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengomposan.

Pengaplikasian BSF dalam pengomposan TKKS dapat membuka cakrawala baru dalam dunia pengomposan dan penerapan *circular green economy* di industri kelapa sawit. Efektivitas dan efisiensi BSF dapat membuka pintu optimalisasi industri hilir industri sawit dengan penerapan nano teknologi di berbagai aspek produk *biorefinery* berbasis limbah industri sawit. BSF dapat menjadi organisme yang menjembatani industri sawit dengan berbagai industri lain sehingga terintegrasi dalam sebuah sistem.

DAFTAR PUSTAKA

- Aini, D. N., & Linda, T. M. (2020). Efficacy of Cellulolytic Bacteria Consortium for Composting Oil Palm Empty Bunches Containing Phytonutrients. *Jurnal Natur Indonesia*, 18(1).
<https://doi.org/10.31258/jnat.18.1.12-19>
- Almeida Frazão, L., Bohluli, M., Teh, C., Sung, B., Husni, A., Hanif, M., Rahman, A., Chew, P. S., Goh, K. J., Kee, K. K., D. T. Sabrina, Elbersen, H., Dam, J. Van, Espinosa, J. C., N, J. A. G., Ramirez, N., Silva, A., Garzón Edna, Yáñez Edgar, ... Stichnothe, H. (2010). Oil palm by-products as a biomass source: availability and sustainability. *Journal of Oil Palm Research*, 22(2), 1–4.
[http://alfredhartemink.nl/PDF/2006 - Soil erosion ESS.pdf%5Cnpapers3://publication/doi/10.1081/E - E S S - 1 2 0 0 4 1 2 3 4 % 5 C n http://www.biobased.nl/downloadattachment/1426/930/ElbersenOilPalmByproducts.pdf](http://alfredhartemink.nl/PDF/2006-Soil%20erosion%20ESS.pdf%5Cnpapers3://publication/doi/10.1081/E-ESS-120041234%5Cnhttp://www.biobased.nl/downloadattachment/1426/930/ElbersenOilPalmByproducts.pdf)
- Alvarez, D., Wilkinson, K. A., Treilhou, M., Téné, N., Castillo, D., & Sauvain, M. (2019). Prospecting Peptides Isolated From Black Soldier Fly (Diptera: Stratiomyidae) With Antimicrobial

- Activity Against *Helicobacter pylori* (Campylobacterales: Helicobacteraceae). *Journal of Insect Science* (Online), 19(6), 1–5. <https://doi.org/10.1093/jisesa/iez120>
- Amira Dayana, R., Roshanida, A. R., Rosli, M. I., Siti Fatimah Zahrah, M. F., Mohd Anuar, J., & Nazrul Adha, C. M. (2011). Bioconversion of empty fruit bunches (EFB) and palm oil mill effluent (POME) into compost using *trichoderma virens*. *African Journal of Biotechnology*, 10(81). <https://doi.org/10.5897/AJB11.2751>
- Anita, S. H., Fitria, Solihat, N. N., Sari, F. P., Risanto, L., Fatriasari, W., & Hermiati, E. (2020). Optimization of Microwave-Assisted Oxalic Acid Pretreatment of Oil Palm Empty Fruit Bunch for Production of Fermentable Sugars. *Waste and Biomass Valorization*, 11(6). <https://doi.org/10.1007/s12649-018-00566-w>
- Arbaain, E. N. N., Bahrin, E. K., Ibrahim, M. F., Ando, Y., & Abd-Aziz, S. (2019). Biological pretreatment of oil palm empty fruit bunch by *Schizophyllum commune* ENN1 without washing and nutrient addition. *Processes*, 7(7). <https://doi.org/10.3390/pr7070402>
- Ayilara, M. S., Olanrewaju, O. S., Babalola, O. O., & Odeyemi, O. (2020). Waste management through composting: Challenges and potentials. In *Sustainability (Switzerland)* (Vol. 12, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/su12114456>
- Bagastyo, A. Y., & Soesanto, K. (2020). Vermicomposting process of mixed food waste and black soldier fly larvae composting residue by using *eudrilus eugeniae*. *Ecology, Environment and Conservation*, 26.
- Bajra, B. D., Kusumah, M. S., Samosir, P. ., Arifani, R., & 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. *Unpublished*.
- Barrington, S., Choinière, D., Trigui, M., & Knight, W. (2003). Compost convective airflow under passive aeration. *Bioresource Technology*, 86(3). [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00155-4](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00155-4)
- Bonelli, M., Bruno, D., Brilli, M., Gianfranceschi, N., Tian, L., Tettamanti, G., Caccia, S., & Casartelli, M. (2020). Black soldier fly larvae adapt to different food substrates through morphological and functional responses of the midgut. *International Journal of Molecular Sciences*, 21(14), 1 – 27. <https://doi.org/10.3390/ijms21144955>
- Bosch, G., van Zanten, H. H. E., Zamprogn, A., Veenenbos, M., Meijer, N. P., van der Fels-Klerx, H. J., & van Loon, J. J. A. (2019). Conversion of organic resources by black soldier fly larvae: Legislation, efficiency and environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 222, 355 – 363. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.02.270>
- Chen, T. L., Kim, H., Pan, S. Y., Tseng, P. C., Lin, Y. P., & Chiang, P. C. (2020). Implementation of green chemistry principles in circular economy system towards sustainable development goals: Challenges and perspectives. *Science of the Total Environment*, 716. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136998>
- D'Amato, D., Droste, N., Allen, B., Kettunen, M., Lähinen, K., Korhonen, J., Leskinen, P., Matthies, B. D., & Toppinen, A. (2017). Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. *Journal of Cleaner Production*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.09.053>
- D'Amato, D., Droste, N., Winkler, K. J., & Toppinen, A. (2019). Thinking green, circular or bio: Eliciting researchers' perspectives on a sustainable economy with Q method. *Journal of Cleaner Production*, 230. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.05.099>
- 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. In *Neotropical Entomology* (Vol. 49, Issue 2). <https://doi.org/10.1007/s13744-019-00719-z>
- Darnoko. (1992). Potensi Pemanfaatan Limbah Lignoselulosa Kelapa Sawit Melalui

- Biokonversi. *Berita Penelitian Perkebunan*.
- Domingues, M. V. P. F., Moura, K. E. de, Salomão, D., Elias, L. M., & Patricio, F. R. A. (2016). Effect of temperature on mycelial growth of *Trichoderma*, *Sclerotinia minor* and *S. sclerotiorum*, as well as on mycoparasitism. *Summa Phytopathologica*, 42(3). <https://doi.org/10.1590/0100-5405/2146>
- FUJITA, H., NAKANO, K., CHAISOMPHOB, T., & HAMBALI, E. (2019). Greenhouse Gas Emission of Electricity Generation and Field Abandonment Scenarios Using Empty Fruit Bunches at a Palm Oil Mill, Surat Thani Province, Thailand. *Journal of the Japan Institute of Energy*, 98(5). <https://doi.org/10.3775/jie.98.119>
- Gregorio, V. F., Pié, L., & Terceño, A. (2018). A systematic literature review of bio, green and circular economy trends in publications in the field of economics and business management. *In Sustainability (Switzerland)* (Vol. 10, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/su10114232>
- Hadj Saadoun, J., Montevecchi, G., Zanasi, L., Bortolini, S., Macavei, L. I., Masino, F., Maistrello, L., & Antonelli, A. (2020). Lipid profile and growth of black soldier flies (*Hermetia illucens*, Stratiomyidae) reared on by-products from different food chains. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 100(9), 3648–3657. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10397>
- Hamzah, N. H. C., Yahya, A., Man, H. C., & Baharuddin, A. S. (2018). Effect of pretreatments on compost production from shredded oil palm empty fruit bunch with palm oil mill effluent anaerobic sludge and chicken manure. *BioResources*, 13(3), 4998–5012. <https://doi.org/10.15376/biores.13.3.4998-5012>
- Hanum, H., Lisnawita, & Tantawi, A. R. (2015). The Increasing of NPK Nutrient in Palm Oil Under Prenursery Seedling by Application of Palm Oil Waste Compost and Endofitic Microbes. *Proceedings of The 5th Annual International Conferennce Syiah Kuala University*, 232–236.
- Harindintwali, J. D., Zhou, J., & Yu, X. (2020). Lignocellulosic crop residue composting by cellulolytic nitrogen-fixing bacteria: A novel tool for environmental sustainability. *In Science of the Total Environment* (Vol. 715). <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136912>
- Hau, L. J., Shamsuddin, R., May, A. K. A., Saenong, A., Lazim, A. M., Narasimha, M., & Low, A. (2020). Mixed Composting of Palm Oil Empty Fruit Bunch (EFB) and Palm Oil Mill Effluent (POME) with Various Organics: An Analysis on Final Macronutrient Content and Physical Properties. *Waste and Biomass Valorization*, 11(10). <https://doi.org/10.1007/s12649-020-00993-8>
- Hidayat, M. R. (2013). Teknologi Pretreatment Bahan Lignoselulosa. *Biopropal Industri*, 4(1), 33–48.
- Himmatun Wisda, Wahyudi Budi Sediawan, & Sarto. (2016). PENGARUH AERASI PADA FERMENTASI PADAT TANDAN KOSONG KELAPA SAWIT OLEH *Aspergillus niger* TERHADAP PRODUKSI GULA SEDERHANA. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 5(3), 12–16. <https://doi.org/10.32734/jtk.v5i3.1539>
- Ishak, N. F., Ahmad, A. L., & Ismail, S. (2014). Feasibility of anaerobic co-composting empty fruit bunch with activated sludge from palm oil mill wastes for soil conditioner. *Journal of Physical Science*, 25(1).
- Isroi, Ishola, M. M., Millati, R., Syamsiah, S., Cahyanto, M. N., Niklasson, C., & Taherzadeh, M. J. (2012). Structural changes of oil palm empty fruit bunch (OPEFB) after fungal and phosphoric acid pretreatment. *Molecules*, 17(12), 14995–15012. <https://doi.org/10.3390/molecules171214995>
- Jiang, C. L., Jin, W. Z., Tao, X. H., Zhang, Q., Zhu, J., Feng, S. Y., Xu, X. H., Li, H. Y., Wang, Z. H., & Zhang, Z. J. (2019). Black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*) strengthen the metabolic function of food waste biodegradation by gut microbiome. *Microbial Biotechnology*, 12(3). <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13393>
- Kananam, W., Suksaroj, T. T., & Suksaroj, C. (2011). Biochemical changes during oil palm (*Elaeis guineensis*) empty fruit bunches composting with decanter sludge and chicken manure. *Science Asia*, 37(1).

- <https://doi.org/10.2306/scienceasia1513-1874.2011.37.017>
- Kim, C. H., Ryu, J., Lee, J., Ko, K., Lee, J. Y., Park, K. Y., & Chung, H. (2021). Use of black soldier fly larvae for food waste treatment and energy production in asian countries: A review. *Processes*, 9(1), 1–17. <https://doi.org/10.3390/pr9010161>
- Kim, W., Bae, S., Park, K., Lee, S., Choi, Y., Han, S., & Koh, Y. (2011). Biochemical characterization of digestive enzymes in the black soldier fly, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae). *Journal of Asia-Pacific Entomology*, 14(1), 1–4. <https://doi.org/10.1016/j.aspen.2010.11.003>
- Li, Q., Zheng, L., Cai, H., Garza, E., Yu, Z., & Zhou, S. (2011). From organic waste to biodiesel: Black soldier fly, *Hermetia illucens*, makes it feasible. *Fuel*, 90(4), 1545–1548. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2010.11.016>
- Merzendorfer, H. (2011). The cellular basis of chitin synthesis in fungi and insects: Common principles and differences. In *European Journal of Cell Biology* (Vol. 90, Issue 9). <https://doi.org/10.1016/j.ejcb.2011.04.014>
- Muhd Ali, M. D., Tamunaidu, P., Nor Aslan, A. K. H., Morad, N. A., Sugiura, N., Goto, M., & Zhang, Z. (2016). Hydrothermal pre-treatment of oil palm empty fruit bunch into fermentable sugars. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 36(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/36/1/012042>
- Palaniveloo, K., Amran, M. A., Norhashim, N. A., Mohamad-Fauzi, N., Peng-Hui, F., Hui-Wen, L., Kai-Lin, Y., Jiale, L., Chian-Yee, M. G., Jing-Yi, L., Gunasekaran, B., & Razak, S. A. (2020). Food waste composting and microbial community structure profiling. In *Processes* (Vol. 8, Issue 6). <https://doi.org/10.3390/pr8060723>
- Pergola, M., Persiani, A., Palese, A. M., Di Meo, V., Pastore, V., D'Adamo, C., & Celano, G. (2018). Composting: The way for a sustainable agriculture. *Applied Soil Ecology*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2017.10.016>
- Permentan. (2011). *Pupuk Organik, Pupuk Hayati dan Pembenahan Tanah*. 1–109.
- Rahutomo, S., Sutarta E, S., Siregar H, H., Darlan N, H., & Winarna. (2007). Kemajuan budidaya kelapa sawit di Indonesia (2007). In *90 Tahun Penelitian Kelapa Sawit Indonesia* (p. 2007). Pusat Penelitian Kelapa Sawit.
- Raksasat, R., Lim, J. W., Kiatkittipong, W., Kiatkittipong, K., Ho, Y. C., Lam, M. K., Font-Palma, C., Mohd Zaid, H. F., & Cheng, C. K. (2020). A review of organic waste enrichment for inducing palatability of black soldier fly larvae: Wastes to valuable resources. *Environmental Pollution*, 267, 115488. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115488>
- Rame. (2018). Oil Palm Empty Fruit Bunches (OPEFB): Existing Utilization and Current Trends Bio Refinery in Indonesia. *E3S Web of Conferences*, 31, 1–5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183103014>
- Ravi, H. K., Degrou, A., Costil, J., Trespeuch, C., Chemat, F., & Vian, M. A. (2020). Larvae mediated valorization of industrial, agriculture and food wastes: Biorefinery concept through bioconversion, processes, procedures, and products. In *Processes* (Vol. 8, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/PR8070857>
- Razali, W. A. W., Baharuddin, A. S., TarmezeeTalib, A., Sulaiman, A., Naim, M. N., Hassan, M. A., & Shirai, Y. (2012). Degradation of oil palm empty fruit bunches (OPEFB) fibre during composting process using in-vessel composter. *BioResources*, 7(4), 4786–4805. <https://doi.org/10.15376/biores.7.4.4786-4805>
- Saba, N., Jawaid, M., & Sultan, M. T. H. (2017). Thermal properties of oil palm biomass based composites. *Lignocellulosic Fibre and Biomass-Based Composite Materials: Processing, Properties and Applications, September 2017*, 95–122. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100959-8.00006-8>
- Santi, L. P., Kalbuadi, D. N., & Goenadi, D. H. (2019). Empty Fruit Bunches as Potential Source for Biosilica Fertilizer for Oil Palm. *Journal of Tropical Biodiversity and Biotechnology*, 4(3), 90. <https://doi.org/10.22146/jtbb.38749>
- Schuchardt, F., Wulfert, K., & Darnoko, D. (2005). New

- process for combined treatment of waste (EFB) and waste water (POME) from palm oil mills - Technical, economical and ecological aspects. *Landbauforschung Volkenrode*, 55(1).
- Seroka-Stolka, O., & Ociepa-Kubicka, A. (2019). Green logistics and circular economy. *Transportation Research Procedia*, 39. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.049>
- Siddiquee, S., Shafawati, S. N., & Naher, L. (2017). Effective composting of empty fruit bunches using potential *Trichoderma* strains. *Biotechnology Reports*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.11.001>
- Supriatna, A., Putra, R. E., Manurung, R., & Esyanthi, R. R. (2014). Study on Bioconversion of Cassava Tuber Skin and Dry Rice Stalk By Black Soldier Flies (*Hermetia illucens*). *The 4th Annual Basic Science International Conference*.
- Tahir, A. A., Barnoh, N. F. M., Yusof, N., Said, N. N. M., Utsumi, M., Yen, A. M., Hashim, H., Noor, M. J. M. M., Akhir, F. N. M. D., Mohamad, S. E., Sugiura, N., Othman, N., Zakaria, Z., & Hara, H. (2019). Microbial diversity in decaying oil palm empty fruit bunches (OPEFB) and isolation of lignin-degrading bacteria from a tropical environment. *Microbes and Environments*, 34(2). <https://doi.org/10.1264/jsme2.ME18117>
- Toriyama, H., & Asako, Y. (2010). Aeration of Compost Heating System Using Magnetic Field. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, 1(1). <https://doi.org/10.5098/hmt.v1.1.3005>
- Trisakti, B., Mhardela, P., Husaini, T., Irvan, & Daimon, H. (2018). Production of oil palm empty fruit bunch compost for ornamental plant cultivation. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 309(1), 0–8. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/309/1/012094>
- USDA-NRCS. (2011). Conservation. *USDA Natural Resources Conservation Service*, 2. <http://www.nrcs.usda.gov>
- 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>
- Winanti, W. S., Prasetyadi, P., & Wiharja, W. (2019). Pengolahan Palm Oil Mill Effluent (POME) menjadi Biogas dengan Sistem Anaerobik Tipe Fixed Bed tanpa Proses Netralisasi. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(1), 143. <https://doi.org/10.29122/jtl.v20i1.3248>
- Xu, D., Zhao, S., Xiong, Y., Peng, C., Xu, X., Si, G., Yuan, J., & Huang, Q. (2015). Biological, Physicochemical, and Spectral Properties of Aerated Compost Extracts: Influence of Aeration Quantity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 46(18), 2295–2310. <https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1081693>
- Zahrim, A. Y., Yee, I. K. T., Thian, E. S. C., Heng, S. Y., Janaun, J., Chong, K. P., Haywood, S. K., Tan, V., Asis, T., & Al-Mizi, T. M. T. M. A. (2017). Effect of pre-treatment and inoculant during composting of palm oil empty fruit bunches. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 17(2). <https://doi.org/10.22146/ajche.49551>
- Zhai, L., Manglekar, R. R., & Geng, A. (2020). Enzyme production and oil palm empty fruit bunch bioconversion to ethanol using a hybrid yeast strain. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 67(5). <https://doi.org/10.1002/bab.1816>
- Zhang, A., & Zhang, A. (2020). The Black Soldier Fly. Can Science and Technology Save China?, 1 6 3 – 1 8 3 . <https://doi.org/10.7591/cornell/9781501747021.003.0008>
- Zhu, Z., Rehman, K. U., Yu, Y., Liu, X., Wang, H., Tomberlin, J. K., Sze, S. H., Cai, M., Zhang, J., Yu, Z., Zheng, J., & Zheng, L. (2019). De novo transcriptome sequencing and analysis revealed the molecular basis of rapid fat accumulation by black soldier fly (*Hermetia illucens*, L.) for development of insectival biodiesel. *Biotechnology for Biofuels*, 12(1), 1–16. <https://doi.org/10.1186/s13068-019-1531-7>
- Zulkiple, N., Maskat, M. Y., & Hassan, O. (2016). Pretreatment of Oil Palm Empty Fruit Fiber (OPEFB) with Aqueous Ammonia for High Production of Sugar. *Procedia Chemistry*, 18 (M c l s 2 0 1 5) , 1 5 5 – 1 6 1 . <https://doi.org/10.1016/j.proche.2016.01.024>