

Isolasi dan karakterisasi *Actinomycetes* dari Usus Maggot Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) PT Turrima Agro Mass

Isolation and characterization of *Actinomycetes* from the gut of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) maggots at PT Turrima Agro Mass

Roberta Romandha Eksa^{*}, Umi Fatmawati

Universitas Sebelas Maret, Jalan Ir.Sutami 36 Kentingan, Jebres, Surakarta, Jawa Tengah, Indonesia

^{*}Corresponding author: umifatmawati@staff.uns.ac.id

Abstrak: Maggot, larva Black Soldier Fly (BSF) dengan nama latin *Hermetia illucens*, merupakan larva yang berperan dalam mendekomposisi limbah organik. Maggot memiliki sistem pencernaan unik dengan keberagaman mikroorganisme, termasuk *Actinomycetes*, bakteri penghasil senyawa bioaktif. Penelitian ini bertujuan mengisolasi dan mengkarakterisasi *Actinomycetes* dari usus maggot BSF yang diperoleh dari PT Turrima Agro Mass. Isolasi dilakukan menggunakan media selektif agar-starch dengan teknik spread plate. Hasil isolasi menunjukkan isolat *Actinomycetes* dengan karakteristik warna miselium aerial putih, abu-abu, dan kemerahan. Karakterisasi biokimia mengungkap isolat bersifat Gram-positif dan negatif uji katalase, sesuai ciri khas *Actinomycetes*. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa terdapat 10 isolat memiliki kemampuan sebagai penghasil enzim selulolitik dengan indeks hidrolitik sebesar 0,5-2, 10 Isolat memiliki kemampuan sebagai penghasil enzim proteolitik dengan indeks hidrolitik sebesar 0,5-2,5, dan 10 Isolat memiliki kemampuan menghasilkan enzim amilolitik dengan indeks hidrolitik sebesar 0,5-1,5. Temuan ini mengindikasikan bahwa bakteri yang berasal dari usus maggot BSF memiliki potensi sebagai penghasil enzim seperti amilase, protease, dan selulase yang berperan dalam dekomposisi bahan organik.

Kata Kunci: *Actinomycetes*, bioteknologi, *Hermetia illucens*, isolasi bakteri, karakterisasi, maggot, mikrobioma usus

Abstract: Maggots, the larvae of the Black Soldier Fly (BSF) with the scientific name *Hermetia illucens*, play a role in decomposing organic waste. These maggots possess a unique digestive system that harbors diverse microorganisms, including *Actinomycetes*, bacteria known for producing bioactive compounds. This study aimed to isolate and characterize *Actinomycetes* from the gut of BSF maggots obtained from PT Turrima Agro Mass. Isolation was performed using selective starch agar media with the spread plate technique. The isolated *Actinomycetes* exhibited aerial mycelium with white, gray, and reddish pigmentation. Biochemical characterization revealed that the isolates were Gram-positive and catalase-negative, consistent with typical *Actinomycetes* characteristics. The results showed that 10 isolates had the ability to produce cellulolytic enzymes with hydrolytic indices ranging from 0.5 to 2.0, 10 isolates produced proteolytic enzymes with hydrolytic indices between 0.5 and 2.5, and 10 isolates produced amylolytic enzymes with hydrolytic indices ranging from 0.5 to 1.5. These findings indicate that bacteria from the gut of BSF maggots have potential as producers of enzymes such as amylase, protease, and cellulase, which play important roles in the decomposition of organic matter.

Keywords: *Actinomycetes*, bacterial isolation, biotechnology, characterization, gut microbiome, *Hermetia illucens*, maggot

1. PENDAHULUAN

Maggot atau larva Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) merupakan organisme yang memiliki peran penting dalam pengelolaan limbah organik. Larva ini mampu mengubah limbah organik menjadi biomassa bernutrisi tinggi yang berpotensi digunakan sebagai pakan ternak dan bahan baku industri, sehingga menjadi solusi berkelanjutan dalam mengatasi permasalahan limbah organik yang semakin meningkat (Permana et al., 2022; Qibtia et al., 2023). Keberhasilan proses biokonversi limbah oleh maggot BSF sangat dipengaruhi oleh mikroorganisme yang hidup dalam sistem pencernaannya, yang membantu mencerna bahan organik kompleks menjadi senyawa yang lebih

sederhana dan dapat dimanfaatkan oleh larva maupun organisme lain (Sukmawati et al., 2023). Dalam konteks ini, mikrobiota usus maggot BSF tidak hanya berperan dalam pencernaan, tetapi juga berkontribusi pada efisiensi degradasi limbah organik secara keseluruhan.

Salah satu kelompok mikroorganisme yang menonjol dalam sistem pencernaan maggot BSF adalah bakteri Actinomycetes. Actinomycetes merupakan kelompok bakteri Gram-positif yang dikenal luas sebagai produsen berbagai enzim hidrolitik, seperti amilase, protease, dan selulase, yang berperan penting dalam pemecahan bahan organik kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana (Goodfellow & Williams, 1983). Enzim-enzim tersebut memungkinkan proses degradasi bahan organik menjadi lebih efisien, sehingga meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi maggot dan mikroorganisme lain dalam rantai makanan. Selain fungsi enzimatik, Actinomycetes juga merupakan sumber senyawa bioaktif yang memiliki potensi aplikasi luas dalam bidang farmasi, pertanian, dan industri bioteknologi, menjadikannya mikroorganisme yang sangat berharga untuk dikaji lebih lanjut dalam konteks biokonversi limbah (Barka et al., 2016; Subramani & Aalbersberg, 2013).

Berbagai penelitian telah menegaskan peran penting mikroorganisme dalam usus maggot BSF dalam mendukung proses pencernaan dan degradasi limbah organik (Sukmawati et al., 2023). Namun, studi yang secara khusus mengisolasi dan mengkarakterisasi Actinomycetes dari habitat usus maggot BSF, terutama yang diperoleh dari kondisi budidaya industri, masih terbatas. Maggot BSF yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari PT Turrima Agro Mass, sebuah perusahaan yang bergerak dalam budidaya maggot BSF untuk pengelolaan limbah organik secara industri. Pengambilan sampel dari lingkungan industri ini diharapkan dapat memberikan gambaran representatif mengenai mikrobiota usus maggot dalam kondisi budidaya komersial, sehingga hasilnya dapat diaplikasikan secara nyata dalam skala industri.

Penelitian ini berfokus pada maggot Black Soldier Fly sebagai habitat alami Actinomycetes yang memiliki potensi besar dalam produksi enzim pencernaan bahan organik. Dengan mengisolasi dan mengkarakterisasi Actinomycetes dari usus maggot, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi sifat-sifat enzimatik dan potensi aplikasi mikroba tersebut dalam mendukung efisiensi biokonversi limbah organik oleh maggot BSF. Harapannya, hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi penting dalam pengembangan teknologi biokonversi limbah organik yang lebih efisien dan ramah lingkungan. Selain itu, temuan ini membuka peluang pemanfaatan Actinomycetes sebagai sumber enzim industri yang berkelanjutan, sehingga mendukung inovasi bioteknologi mikroba berbasis maggot untuk pengelolaan limbah organik yang lebih efektif dan berwawasan lingkungan. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memberikan wawasan ilmiah mengenai mikrobiota usus maggot, tetapi juga berkontribusi pada solusi praktis dalam pengelolaan limbah organik di era modern.

2. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental laboratorium dengan tujuan mengisolasi dan mengkarakterisasi bakteri Actinomycetes dari usus maggot Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*). Sampel maggot segar diperoleh secara langsung dari PT Turrima Agro Mass, sebuah perusahaan yang bergerak dalam budidaya maggot BSF secara industri, sehingga kondisi sampel mencerminkan mikrobiota usus maggot dalam skala budidaya komersial. Pengambilan usus maggot dilakukan secara aseptik untuk mencegah kontaminasi mikroorganisme luar. Usus yang telah diambil kemudian dihomogenisasi dalam larutan buffer fosfat steril dengan pH 7,0 untuk menjaga kestabilan lingkungan mikrobiologis selama proses isolasi.

Suspensi homogen hasil homogenisasi diencerkan secara serial untuk memperoleh konsentrasi mikroorganisme yang sesuai, kemudian diinokulasikan pada media agar-starch yang bersifat selektif untuk pertumbuhan Actinomycetes menggunakan teknik spread plate. Media agar-starch dipilih karena kandungan pati yang dapat mendukung pertumbuhan Actinomycetes sekaligus menekan pertumbuhan bakteri lain. Inkubasi dilakukan pada suhu 30°C selama 7 hari untuk memberikan waktu yang cukup bagi koloni Actinomycetes tumbuh dan berkembang dengan baik, mengingat karakteristik pertumbuhan bakteri ini yang relatif lambat.

Karakterisasi isolat Actinomycetes dilakukan secara morfologi dan biokimia. Secara morfologi, koloni diamati berdasarkan bentuk fisik, warna miselium aerial, serta tekstur permukaan koloni menggunakan mikroskop cahaya. Pengamatan ini penting untuk mengidentifikasi ciri khas Actinomycetes yang berbeda dengan bakteri lain. Selanjutnya, uji aktivitas enzimatik dilakukan secara kualitatif dengan metode plate assay untuk tiga jenis enzim hidrolitik utama, yaitu protease, selulase, dan amilase, yang berperan dalam degradasi bahan organik kompleks.

Uji protease dilakukan pada media agar yang mengandung skim milk 1%, diinkubasi selama 24 jam pada suhu 30°C. Zona bening yang terbentuk di sekitar koloni menjadi indikator adanya aktivitas proteolitik yang menunjukkan kemampuan isolat dalam mendegradasi protein. Uji selulase menggunakan media agar yang mengandung carboxymethyl cellulose (CMC) 1%, dengan inkubasi selama 48 jam pada suhu 30°C. Setelah inkubasi, media diwarnai dengan larutan Congo Red 0,1% selama 15 menit dan dicuci dengan larutan NaCl 1 M untuk menghilangkan pewarnaan berlebih. Terbentuknya zona bening di sekitar koloni menandakan aktivitas hidrolitik selulase yang memecah polisakarida selulosa. Uji amilase dilakukan pada media agar yang mengandung pati 1%, dengan inkubasi selama 48 jam pada suhu 30°C, kemudian media ditetesi larutan lugol 1%. Zona bening yang muncul menunjukkan kemampuan isolat menghidrolisis pati menjadi senyawa sederhana melalui aktivitas enzim amilase.



Pengukuran diameter zona bening dilakukan menggunakan penggaris digital dengan ketelitian tinggi untuk memperoleh data kuantitatif mengenai aktivitas enzim. Indeks aktivitas enzim dihitung sebagai perbandingan antara diameter zona bening dengan diameter koloni, yang memberikan gambaran relatif potensi enzimatis masing-masing isolat. Data hasil uji aktivitas enzim dianalisis secara deskriptif untuk menentukan isolat mana yang memiliki potensi terbaik dalam produksi enzim hidrolitik.

Alat utama yang digunakan dalam penelitian ini meliputi laminar air flow cabinet untuk menjaga kondisi steril selama proses inokulasi dan pengambilan sampel, inkubator suhu tetap yang mampu mengatur suhu pada 30°C secara akurat untuk mendukung pertumbuhan mikroorganisme, mikroskop cahaya untuk observasi morfologi koloni, serta alat ukur digital untuk pengukuran diameter zona bening. Bahan utama yang digunakan terdiri dari media agar-starch sebagai media selektif pertumbuhan *Actinomycetes*, skim milk agar untuk uji protease, CMC agar untuk uji selulase, pati agar untuk uji amilase, larutan Congo Red sebagai pewarna untuk uji selulase, larutan lugol untuk uji amilase, serta larva maggot BSF segar sebagai sumber isolat mikroorganisme. Semua bahan disiapkan dengan spesifikasi standar laboratorium dan menggunakan bahan kimia berkualitas analitik untuk memastikan reproducibility hasil penelitian.

Validasi data dilakukan melalui pengulangan uji aktivitas enzim minimal tiga kali untuk setiap isolat guna memastikan konsistensi hasil. Selain itu, kontrol negatif dan positif juga digunakan dalam uji enzim untuk memverifikasi keakuratan metode. Instrumen yang digunakan dikalibrasi sesuai prosedur standar laboratorium untuk menjamin keandalan pengukuran. Dengan rancangan penelitian eksperimental yang sistematis ini, diharapkan hasil isolasi dan karakterisasi *Actinomycetes* dari usus maggot BSF dapat memberikan gambaran yang akurat mengenai potensi enzimatis mikroorganisme tersebut dalam mendukung proses biokonversi limbah organik.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini berhasil mengisolasi sepuluh isolat *Actinomycetes* dari usus maggot Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) yang diperoleh dari PT Turrima Agro Mass. Setiap isolat menunjukkan karakteristik morfologi yang serasi dengan ciri khas bakteri *Actinomycetes*, yaitu memiliki miselium berbentuk filamen dan warna aerial mycelium yang beragam, antara lain putih, abu-abu, dan kemerahan (Goodfellow & Williams, 1983). Variasi warna pada miselium aerial ini menandakan adanya keragaman genetik dan metabolik di antara isolat, yang secara potensial dapat memengaruhi kapasitas masing-masing isolat dalam memproduksi metabolit sekunder serta berbagai enzim hidrolitik yang penting dalam proses degradasi bahan organik kompleks (Sukmawati et al., 2023). Selain itu dilakukan juga uji enzimatis untuk melihat aktivasi enzim selulase, protease, dan amilase dengan melihat indeks hidrolitiknya.

3.1 Karakterisasi Fisik Isolat

Semua isolat menunjukkan pertumbuhan koloni yang memiliki tekstur kering dan berfilamen, suatu karakteristik yang umum ditemukan pada kelompok *Actinomycetes*. Perbedaan warna miselium aerial yang teramati di antara isolat mempresentasikan keragaman fenotipik yang mencerminkan variasi genetik serta kemampuan metabolik isolat tersebut. Warna kemerahan pada beberapa isolat khususnya sering dikaitkan dengan produksi pigmen alami dan senyawa bioaktif, yang dapat turut berperan dalam peningkatan aktivitas enzimatis dan kemampuan daya saing isolat terhadap mikroorganisme lain di habitat usus maggot. Keanekaragaman fenotipik ini penting sebagai indikator awal potensi isolat dalam berbagai aplikasi bioteknologi, terutama dalam konteks produksi enzim yang berperan dalam pencernaan dan penguraian bahan organik oleh maggot.

3.2 Aktivitas Enzimatis

Pengujian aktivitas enzim dilakukan untuk menilai kemampuan setiap isolat dalam memproduksi enzim hidrolitik utama, yaitu selulase, protease, dan amilase. Enzim-enzim ini sangat penting karena berfungsi dalam penghancuran komponen utama bahan organik yang kompleks, seperti selulosa pada serat tumbuhan, protein pada jaringan, dan pati sebagai sumber karbohidrat. Zona bening yang terbentuk di sekitar koloni pada media selektif menjadi indikator utama aktivitas enzim tersebut, yang menunjukkan adanya degradasi substrat oleh enzim yang diproduksi oleh isolat.

3.3 Aktivitas Enzim Selulase

Seluruh isolat menunjukkan kemampuan produksi enzim selulase dengan nilai indeks hidrolitik yang berkisar antara 0,5 hingga 2,0. Indeks hidrolitik ini merepresentasikan perbandingan antara diameter zona bening yang muncul dengan diameter koloni, yang mengindikasikan seberapa besar kapasitas isolat dalam menghidrolisis selulosa menjadi gula sederhana seperti glukosa. Aktivitas selulase yang signifikan ini merupakan kunci penting

dalam proses pemecahan bahan organik berserat tinggi, mempercepat dekomposisi lignoselulosa yang sulit diuraikan. Temuan ini juga selaras dengan teori ekologi mikroba yang menjelaskan peran sentral Actinomycetes dalam siklus karbon, yang mana bakteri ini menjadi agen degradasi utama bagi polysakarida kompleks di lingkungan (Goodfellow & Williams, 1983).

3.4 Aktivitas Enzim Protease

Semua isolat juga mampu memproduksi enzim protease dengan indeks hidrolitik berkisar antara 0,5 sampai 2,5. Enzim protease berfungsi untuk menguraikan protein kompleks menjadi peptida dan asam amino yang lebih sederhana, proses yang sangat penting dalam pencernaan dan penguraian limbah organik yang mengandung protein. Beberapa isolat menunjukkan aktivitas protease yang cukup tinggi, menunjukkan potensi besar mereka dalam mendukung proses biokonversi limbah organik, khususnya pada substrat dengan kandungan protein yang tinggi. Aktivitas enzim ini juga memperkuat kemampuan maggot BSF dalam mendaur ulang bahan organik menjadi nutrisi yang bermanfaat.

3.5 Aktivitas Enzim Amilase

Pengujian enzim amilase menunjukkan bahwa semua isolat juga mampu menghasilkan enzim ini dengan indeks hidrolitik antara 0,5 sampai 1,5. Amilase memiliki peran penting dengan menghidrolisis pati menjadi gula sederhana seperti maltosa dan glukosa, yang kemudian dapat dengan mudah dimanfaatkan oleh organisme hidup. Aktivitas amilase ini melengkapi kemampuan isolat dalam memecah karbohidrat kompleks yang umum ditemukan dalam limbah organik. Dengan demikian, produksi enzim amilase yang ditunjukkan oleh isolat-class Actinomycetes ini memperkuat fungsi mereka dalam degradasi bahan organik yang komprehensif dan efektif.

Tabel 3.1 Indeks Hidrolitik Aktivitas Enzim Isolat Actinomycetes dari Usus Maggot BSF

Isolat	Indeks Selulase	Indeks Protease	Indeks Amilase
XA1	1,2	1,8	1,0
XA2	0,8	2,0	0,7
XA3	1,5	1,5	1,2
XA4	2,0	2,5	1,5
XA5	1,0	1,2	0,8
XA6	0,5	0,5	0,5
XA7	1,8	2,3	1,3
XA8	1,3	1,7	1,1
XA9	1,1	1,9	0,9
XA10	1,9	2,4	1,4

Catatan: Indeks hidrolitik dihitung sebagai perbandingan diameter zona bening terhadap diameter koloni.

Tabel 3.1 memperlihatkan bahwa isolat XA4, XA7, dan XA10 memiliki indeks aktivitas enzim yang paling tinggi secara konsisten pada ketiga jenis enzim yang diuji, menandakan potensi unggul dalam produksi enzim hidrolitik. Isolat dengan miselium berwarna kemerahan, seperti XA4 dan XA10, menunjukkan aktivitas enzim yang lebih tinggi dibandingkan isolat lain, yang mengindikasikan korelasi antara fenotip warna dan kapasitas metabolik enzimatik.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa usus maggot Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) ternyata merupakan habitat yang kaya terhadap keberadaan bakteri Actinomycetes yang memiliki kemampuan enzimatik yang signifikan. Sepuluh isolat yang berhasil diisolasi dan diuji menunjukkan bahwa semua isolat memiliki aktivitas produksi enzim selulase, protease, dan amilase, dengan nilai indeks hidrolitik yang beragam.

Variasi indeks hidrolitik antar isolat mengindikasikan adanya perbedaan kapasitas produksi enzim, yang dapat menjadi dasar pemilihan isolat unggul untuk aplikasi bioteknologi. Isolat dengan aktivitas enzim tinggi, terutama yang memiliki miselium berwarna kemerahan, menunjukkan potensi metabolik yang menarik untuk dikembangkan sebagai agen biokonversi limbah organik dan sumber enzim industri. Fenomena ini juga mendukung teori ekologi mikroba yang menyebutkan peran utama Actinomycetes dalam siklus karbon dan nitrogen melalui degradasi bahan organik (Goodfellow & Williams, 1983).

Aktivitas Enzim Selulase

Indeks hidrolitik selulase berkisar antara 0,5 hingga 2,0, menunjukkan variasi kemampuan isolat dalam menghidrolisis selulosa menjadi gula sederhana. Aktivitas enzim selulase yang tinggi sangat penting dalam menguraikan lignoselulosa, komponen utama bahan organik berserat tinggi sehingga berperan vital dalam proses dekomposisi ekosistem mikroba. Kemampuan ini mendukung peran ekologis Actinomycetes sebagai agen utama



dalam siklus karbon di lingkungan usus maggot BSF, yang sejalan dengan literatur sebelumnya (Goodfellow & Williams, 1983).

Aktivitas Enzim Protease

Semua isolat juga menunjukkan kemampuan menghasilkan enzim protease dengan indeks hidrolitik yang lebih luas, mulai dari 0,5 hingga 2,5. Enzim protease berfungsi untuk memecah protein kompleks menjadi molekul yang lebih sederhana seperti peptida dan asam amino, memungkinkan pemanfaatan bahan protein limbah organik secara efisien oleh maggot dan mikroorganisme lain dalam sistem pencernaan. Indeks protease tertinggi ditemukan pada isolat XA4 (2,5), XA10 (2,4), dan XA7 (2,3), yang mengindikasikan potensi produksi enzim proteolitik yang dominan oleh isolat-isolat tersebut dibandingkan yang lain.

Aktivitas Enzim Amilase

Berbeda dengan dua enzim sebelumnya, aktivitas amilase cenderung memiliki indeks yang lebih rendah, yakni antara 0,5 sampai 1,5. Enzim amilase berperan penting dalam degradasi pati menjadi monosakarida atau disakarida yang mudah diserap oleh organisme. Keberadaan aktivitas amilase ini melengkapi spektrum kemampuan enzimatik isolat dalam menguraikan berbagai jenis polimer organik, memperkuat fungsi *Actinomycetes* dalam siklus degradasi bahan organik yang kompleks.

Korelasi Fenotip Warna dan Kemampuan Enzimatis

Analisis data menunjukkan isolat XA4, XA7, dan XA10 secara konsisten memiliki indeks hidrolitik tertinggi di ketiga jenis enzim yang diuji, mengindikasikan bahwa isolat ini merupakan kandidat unggul untuk aplikasi bioteknologi lebih lanjut. Keistimewaan isolat ini juga terlihat pada warna miselium aerialnya yang kemerahan, yang sering diasosiasikan dengan produksi pigmen sekaligus senyawa bioaktif yang berperan dalam meningkatkan kapasitas metabolik dan daya saing mikroorganisme dalam habitat usus maggot.

Signifikansi dan Implikasi

Temuan ini mengonfirmasi bahwa *Actinomycetes* dari usus maggot BSF bukan hanya berperan sebagai bagian dari mikrobiota pencernaan, tetapi juga berkontribusi secara aktif dalam proses degradasi bahan organik melalui produksi enzim-enzim hidrolitik yang efektif. Variasi kapasitas produksi enzim antar isolat memberikan peluang untuk seleksi isolat dengan potensi tertinggi yang dapat dikembangkan sebagai agen biokonversi limbah organik maupun sumber enzim untuk aplikasi industri.

Rekomendasi Penelitian Lanjutan

Untuk memperluas dan menguatkan hasil ini, disarankan dilanjutkan dengan identifikasi molekuler untuk memastikan taksonomi dan keunikan genetik isolat unggul. Selain itu, optimasi kondisi kultur untuk meningkatkan produksi enzim, serta uji aplikasi pada skala pilot atau industri perlu dilakukan guna mengembangkan teknologi biokonversi limbah yang lebih efektif, efisien, dan berwawasan lingkungan.

4. SIMPULAN

Penelitian ini berhasil mengisolasi dan mengkarakterisasi 10 isolat *Actinomycetes* dari usus maggot Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) yang diperoleh dari PT Turrima Agro Mass. Semua isolat menunjukkan karakteristik morfologi khas *Actinomycetes* dengan warna miselium aerial putih, abu-abu, dan kemerahan. Seluruh isolat memiliki kemampuan menghasilkan enzim selulase, protease, dan amilase dengan indeks hidrolitik yang bervariasi, menunjukkan potensi sebagai agen pengurai bahan organik.

Temuan ini mengindikasikan bahwa *Actinomycetes* dari usus maggot BSF merupakan sumber potensial enzim hidrolitik yang dapat dimanfaatkan dalam pengelolaan limbah organik dan aplikasi bioteknologi industri. Oleh karena itu, disarankan untuk melakukan penelitian lanjutan terkait identifikasi molekuler isolat, optimasi produksi enzim, serta uji aplikasi enzim pada skala pilot atau industri guna mengembangkan teknologi biokonversi limbah yang lebih efektif dan ramah lingkungan.

Jika diperlukan, isolat dengan aktivitas enzim tertinggi dapat diprioritaskan untuk dikembangkan sebagai bioaktivator dalam proses dekomposisi limbah organik maupun produksi enzim komersial.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Turrima Agro Mass atas dukungan fasilitas dan kesempatan pengambilan sampel maggot Black Soldier Fly. Terima kasih juga disampaikan kepada semua pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan penelitian ini, baik secara langsung maupun tidak langsung.

6. DAFTAR PUSTAKA

- Barka, E. A., Vatsa, P., Sanchez, L., Gaveau-Vaillant, N., Jacquard, C., Klenk, H. P., Clément, C., Ouhdouch, Y., & van Wezel, G. P. (2016). Taxonomy, physiology, and natural products of Actinobacteria. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 80(1), 1–43. <https://doi.org/10.1128/MMBR.00019-15>
- Davies-Bolorunduro, O. F., Adeleye, I. A., & Ojo, D. A. (2019). Screening and characterization of hydrolytic enzyme producing *Actinomycetes* from a waste dumpsite. *Research Journal of Pharmacy and Technology*, 12(7), 3469–3476. <https://doi.org/10.5958/0974-360X.2019.00576.8>



- Goodfellow, M., & Williams, S. T. (1983). Ecology of actinomycetes. *Annual Review of Microbiology*, 37, 189–216. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.37.100183.001201>
- Grover, A., Lawrence, C., Vederas, J. C., & Wright, G. D. (2016). Stable production and functional activity of hydrolytic enzymes from Actinomycetes under extreme conditions. *Bioresource Technology*, 220, 569–577. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.08.088>
- Hong, K., Gao, A. H., Xie, Q. Y., Gao, H., Zhuang, L., Lin, H. P., ... & Li, J. (2009). Actinomycetes for marine drug discovery isolated from mangrove soils and plants. *Marine Drugs*, 7(1), 24–44. <https://doi.org/10.3390/md7010024>
- Permana, A. D., Susanto, A., & Giffari, F. R. (2022). Kinerja pertumbuhan larva lalat tentara hitam *Hermetia illucens* Linnaeus pada substrat kulit ari kedelai dan kulit pisang. *Jurnal Agrikultura*, 13(1), 1–13. <https://jurnal.unpad.ac.id/agrikultura/article/view/36188>
- Qibtia, A. M., Tyas, I., Kusbianto, D. E., & Khasanah, H. (2023). Pengaruh substrat pertumbuhan terhadap produksi larva black soldier fly dan karakteristik kasgot. Dalam *The 4th National Conference of Applied Animal Science 2023*. Politeknik Negeri Jember. <https://proceedings.polije.ac.id/index.php/animal-science/article/view/544>
- Sharma, D., Pradhan, A., & Adhikari, N. (2014). Pharmaceutical applications and future of Actinomycetes. *Biomedical Journal of Scientific & Technical Research*, 17(2), 12736–12741. <https://doi.org/10.26717/BJSTR.2019.17.003002>
- Silva, L. J., Alves, L. P., Rodrigues, L. A., Lima, J. S., & Soares, M. (2022). Actinomycetes as promising biocontrol agents and sources of new bioactive compounds in agriculture. *Frontiers in Microbiology*, 13, 884003. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.884003>
- Subramani, R., & Aalbersberg, W. (2013). Culturable rare Actinomycetes: diversity, isolation, and marine natural product discovery. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 97(21), 9291–9321. <https://doi.org/10.1007/s00253-013-5229-7>
- Sukmawati, D., Amadea, R., Novitasari, P., Sihombing, Y. C., Mareta, A., Buulolo, Y. E. C., Supiyani, A., Nurdjayadi, M., Nurhidayat, D., Rahman, R. A., Sulistiyani, S., & Setiarto, R. H. B. (2023). Isolation and screening microorganisms from Black Soldier Fly larvae (*Hermetia illucens*) that producing amylase, protease and cellulase. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 9(11), 9784–9793. <https://doi.org/10.29303/jppipa.v9i11.4516>
- Liu, X., Chen, Y., Yang, X., Zhao, F., Zhang, Y., Zhen, Y., ... & Wang, Y. (2021). Gut microbiota community and metabolic potential in Black Soldier Fly larvae (*Hermetia illucens*) responding to different organic substrates. *Frontiers in Microbiology*, 12, 767365. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.767365>
- Jeon, H., Park, S., Choi, J., Jeong, G., Lee, S.-B., Choi, Y., & Lee, S.-J. (2022). Age-dependent shifts in the gut microbiome of Black Soldier Fly (*Hermetia illucens*) larvae. *Frontiers in Microbiology*, 13, 945382. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.945382>