



Identifikasi Bakteri Indigenous sebagai Agen Bioremediasi di Lahan Pertanian Cabai Merah Keriting (*Capsicum annuum*) yang Terpapar Pestisida *Profenofos*

Sarah Safira^{1*}, Kartika Manalu², Rizki Amelia Nasution³

^{1,2,3} Program Studi Biologi, Universitas Islam Negeri Sumatra Utara, Medan, Indonesia

*Penulis Korespondensi: kimsarah918@gmail.com

Abstract. Indigenous bacteria are microorganisms that naturally live and adapt to specific environments, making them unique to that area. In bioremediation, these bacteria play a crucial role due to their ability to degrade various environmental contaminants, such as the pesticide profenofos left in the soil. This ability makes indigenous bacteria effective and cost-efficient agents in addressing environmental pollution, highlighting their importance in agricultural land recovery research. The aim of this study is to isolate and identify indigenous bacteria from soil exposed to profenofos pesticide and analyze them descriptively. The study is divided into several stages: sample collection, isolation using Nitrate Minerals Salts (NMS) medium, ability testing using Muller Hilton Agar (MHA) medium, characterization, Gram staining, and biochemical testing. The results revealed that 8 isolates have potential as bioremediation agents for soil contaminated with profenofos. In the ability test against the pesticide, the antibacterial inhibition of profenofos was categorized into four levels: weak, moderate, strong, and very strong. The results showed that the isolate with the code BIPC 8 had the highest clear zone diameter of 32.95 mm, indicating a very strong ability. Out of the 8 isolates, 7 were categorized as strong and 1 as very strong, showing potential to reduce profenofos residues in the soil. The identified genera of these isolates include *Nitrosococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, and *Rhodococcus*. In conclusion, indigenous bacteria are capable of degrading profenofos pesticide.

Keywords: Bioremediation; Indigenous Bacteria; Pesticide Degradation; Profenofos; Contaminated Soil.

Abstrak. Bakteri indigenous adalah mikroorganisme yang secara alami hidup dan beradaptasi di lingkungan tertentu, menjadikannya unik untuk daerah tersebut. Dalam bioremediasi, bakteri ini memiliki peran penting karena kemampuannya untuk mendegradasi berbagai kontaminan lingkungan, seperti pestisida *profenofos* yang tertinggal dalam tanah. Kemampuan ini menjadikan bakteri indigenous sebagai agen yang efektif dan murah dalam mengatasi masalah pencemaran lingkungan, sehingga penting untuk penelitian dalam upaya pemulihan lahan pertanian. Tujuan penelitian ini yaitu mengisolasi serta mengidentifikasi suatu bakteri indigenous pada tanah yang terpapar pestisida *profenofos* dan dianalisis secara deskriptif. Penelitian ini dibagi atas beberapa tahapan yaitu pengambilan sampel, isolasi menggunakan media *Nitrate Minerals Salts* (NMS), uji kemampuan menggunakan media *Muller Hilton Agar* (MHA), karakterisasi, pewarnaan gram, dan uji biokimia. Hasil penelitian didapatkan bahwa 8 isolat berpotensi sebagai agen bioremediasi pada tanah yang tercemar pestisida *profenofos*. Pada uji kemampuan terhadap 8 isolat, daya hambat pada antibakteri terhadap *profenofos* dikategorikan ke dalam empat tingkatan: lemah, sedang, kuat, dan sangat kuat. Hasil uji menunjukkan bahwa isolat dengan kode BIPC 8 memiliki diameter zona bening tertinggi sebesar 32,95 mm, yang menunjukkan dalam kategori daya sangat kuat. Dari 8 isolat yang menunjukkan 7 isolat kategori kuat dan 1 isolat kategori sangat kuat yang berpotensi menurunkan residu *profenofos* pada tanah. Teridentifikasi genus dari 8 isolat tersebut bergenus *Nitrosococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Rhodococcus*. Kesimpulan dari penelitian ini bahwa bakteri indigenous mampu mendegradasi pestisida *profenofos*.

Kata kunci: Bakteri Indigenous; Bioremediasi; Degradasi Pestisida; *Profenofos*; Tanah Tercemar.

1. LATAR BELAKANG

Pemakaian pestisida di bidang pertanian sangat efektif, relative sederhana dan cepat, tetapi dapat menyebabkan pencemaran lingkungan, ketika tidak diiringi dengan penggunaan yang benar (Sri, 2022). Pestisida dimaksudkan untuk menghancurkan, mengusir, dan mengurangi hama, tetapi malah menjadi boomerang pada lingkungan karena pestisida merupakan senyawa kimia yang dapat membawa dampak buruk bagi kesehatan manusia dan lingkungan, sehingga kontaminasi pestisida menjadi masalah yang perlu dipantau secara aktif

untuk memastikan keamanannya (Ari, 2021; Donley *et al.*, 2022; Phopin *et al.*, 2020). Disamping itu, penggunaan pestisida dapat mencemari tanah, air dan udara, yang dapat merusak ekosistems lainnya, termasuk hama dan penyakit, punahnya predator dalam ekosistem, hilangnya plasma nutfah dan resistennya organisme pengganggu tanaman (Sri, 2022).

Pestisida (insektisida, herbisida, fungisida, bakterisida, dan rodentisida) adalah senyawa kimia pengendali hama (Donley *et al.*, 2022; Souisa *et al.*, 2020). Klasifikasi pestisida dapat berdasarkan toksisitas, cara kerja, komposisi kimia, atau metode aplikasi, namun yang paling umum adalah berdasarkan komposisi kimia karena berkaitan erat dengan aktivitas, degradasi, struktur, dan toksisitasnya (Ore *et al.*, 2023). Berdasarkan komposisi kimianya, pestisida digolongkan menjadi organoklorin, organofosfat, piretroid, dan karbamat (Rahmiah *et al.*, 2021). Senyawa organofosfat mudah terurai di alam dan pada konsentrasi rendah menghambat enzim kolinesterase, sehingga sering diaplikasikan di pertanian (Afriyanto, 2008). Salah satu organofosfat adalah *profenofos* (turunan asam fosforik) yang digunakan pada hama tomat dan cabai, dengan batas maksimum residu (BMR) 0,05 ppm pada sayuran, 0,10 ppm pada air, dan 0,05 ppm pada tanah (Benu *et al.*, 2019; Hidayati, 2019).

Di Desa Tumpatan Nibung, Deli serdang produksi hortikultur cabai merah belum terbebas dari penggunaan pestisida kimia sebagaimana hasil wawancara narasumber telah menggunakan lebih dari 10 tahun pestisida jenis *profenofos* untuk membasi hama. Berdasarkan data BPS luas panen berdasarkan (hektar) mengalami penurunan dimana pada tahun 2018 dari 457 ton/ha menjadi 357 ton/ha pada tahun 2021. persentase luas panen (ha) mengalami penurunan 21,87% hal ini disebabkan oleh faktor cuaca, kondisi lahan, pestisida, bibit, dan serangan hama (Rita, 2022). Beberapa penelitian menyebutkan bahwa menyebabkan kerusakan tanah baik dari fisika, kimia, maupun biologi tanah ialah pestisida hal ini karena 20% dari pestisida tepat sasaran, dan 80% pestisida yang diaplikasikan jatuh mengenai tanah (Setiyo *et al.*, 2011). Tanah yang terkontaminasi dapat dikenali dari penurunan tingkat kesuburan, yang disebabkan oleh beberapa faktor, termasuk hilangnya atau musnahnya bakteri asli tanah, seperti bakteri indigenous yang terlibat pada perbaikan tanah, sehingga proses pembusukan bahan organik terhambat (Benu *et al.*, 2020; Supriatna *et al.*, 2021).

Penumpukan residu pestisida di tanah mengubah mikroflora, seperti menghambat fiksasi nitrogen oleh *Azospirillum*, *Azotobacter*, dan *Rhizobium*, serta bakteri pelarut fosfat dan selulotik, sehingga berdampak pada produktivitas tanah jangka panjang (Akhdiya *et al.*, 2018). Untuk mengatasinya, diperlukan remediasi menggunakan bakteri indigenous, yaitu isolat alami dari media yang akan diuraikan, yang ramah lingkungan, efisien, murah, serta dapat

diaplikasikan di lapangan maupun laboratorium (Puspitasari et al., 2016). Penelitian sebelumnya mengidentifikasi *Bacillus badius*, *B. alvei*, dan *B. stearothermophilus* (Pratiwi et al., 2022), serta *Pseudomonas* sp., *Comamonas terrigena*, dan *Stenotrophomonas maltophilia* (Akhdiya et al., 2018) sebagai pendegradasi *profenofos*. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kemampuan dan jenis bakteri indigenous pendegradasi *profenofos* di tanah pertanian.

2. KAJIAN TEORITIS

Pestisida

Pestisida adalah zat kimia alami atau sintetis untuk mengendalikan hama, gulma, dan penyakit tanaman guna meningkatkan hasil panen (Sharma et al., 2019). Berdasarkan Permentan No. 107/2014, pestisida mencakup berbagai sasaran dan diklasifikasikan menurut kelarutan, adsorpsi, persistensi, dan volatilitas (Fishel, 2020). Jenisnya meliputi insektisida, herbisida, fungisida, bakterisida, dan rodentisida (Firshein, 2010), sedangkan golongan kimianya adalah organoklorin, organofosfat, piretroid, dan karbamat (Rahmiah et al., 2021). Organofosfat paling banyak digunakan, meski beracun, karena cepat terurai (± 2 minggu), larut dalam air, tidak bioakumulasi, dan menghambat enzim asetilkolinesterase (Daely et al., 2020; Dhamayanti et al., 2018).

Profenofos [$C_{11}H_{15}BrClO_3PS$] adalah organofosfat yang banyak dipakai pada tomat dan cabai merah (Paker et al., 2023; Hidayati, 2019), dengan batas maksimum residu 0,05 ppm pada sayuran, 0,10 ppm pada air, dan 0,05 ppm pada tanah (Benu et al., 2019). Senyawa ini mudah terdegradasi melalui hidrolisis, fotolisis, dan mikroba dengan paruh waktu 7–17 hari (Wahyuni et al., 2019), namun residunya tetap mencemari tanah karena penggunaan berkelanjutan dan kurangnya pengawasan (Airlangga et al., 2021). Kontaminasi *profenofos* dapat menguap, terbawa air hujan, meresap ke tanah, dan mencemari air tanah, yang pada akhirnya mengurangi keanekaragaman bakteri tanah dan mengganggu kesuburan lahan pertanian (Pera, 2018; Pratiwi et al., 2022).

Al-Qur'an QS. Al-A'raf ayat 58 menyatakan tanah baik akan menumbuhkan tanaman subur, sedangkan tanah buruk hanya menghasilkan tanaman merana (Departemen Agama RI, 2009), yang sejalan dengan ilmu biologi bahwa kesuburan tanah mendukung pertumbuhan tanaman (Zuhaida et al., 2018). Konservasi tanah merupakan penerapan ajaran ini, sementara pertumbuhan bakteri dipengaruhi lingkungan dengan waktu generasi sekitar 20 menit (Efendi et al., 2013).

Tanah

Tanah sebagai media tumbuh tanaman memerlukan kondisi sehat, subur, bebas logam berat, serta fisik-kimia mendukung (Devitanti et al., 2019; Puspitasari et al., 2016). Komposisinya terdiri atas partikel anorganik, organik, air, dan udara (Mpapa, 2016), dengan unsur hara C, P, K, N yang vital bagi siklus biokimia dan produktivitas (Shen et al., 2022). Ketersediaan hara dipengaruhi pH tanah, yang mengatur kelarutan Mn, Cu, Zn, dan Fe (Siswanto, 2019), serta memengaruhi struktur komunitas mikroba dan keanekaragaman tumbuhan melalui bahan induk, aktivitas mikroba, dan faktor antropogenik (Zhou et al., 2020).

Bioremediasi

Bioremediasi adalah proses detoksifikasi polutan menggunakan mikroorganisme, tumbuhan, atau biokatalisator untuk mengubah senyawa berbahaya menjadi tidak mengganggu lingkungan (Puspitasari et al., 2016), yang melibatkan bakteri, jamur, alga, dan tanaman dalam menurunkan, menghilangkan, atau mendetoksifikasi polutan (Handayani et al., 2022). Degradasi pestisida terdiri dari tiga jenis: degradasi mikroba, degradasi kimia di tanah, dan fotodegradasi (Tudi et al., 2021; Bansal, 2011; Wei et al., 2018). Metode bioremediasi seperti bioaugmentasi dapat mempercepat biodegradasi (Keman, 2022; Patmawati, 2022), dan paparan pestisida dilaporkan meningkatkan keanekaragaman bakteri dibanding jamur dalam sistem biopurifikasi (Bergsveinson et al., 2019).

Bakteri Indigenous

Bakteri indigenous tanah dimanfaatkan sebagai agen bioremediasi karena mampu menggunakan residu pestisida sebagai sumber karbon (Apriliya et al., 2020), namun konsentrasi polutan tinggi dapat menghambat pertumbuhannya, sehingga diperlukan pendekatan seperti biostimulasi, biosparging, dan bioaugmentasi (Ratnaningsih et al., 2020). Koloni pendegradasi yang umum ditemukan seperti *Bacillus* sp. dan *Pseudomonas* sp. (Asri et al., 2019) berperan penting dalam mengoptimalkan degradasi pestisida (Karanasios et al., 2012). Bakteri umumnya hidup di rizosfer hingga kedalaman 20 cm, dengan keberadaan sangat dipengaruhi bahan organik tanah (Saraswati et al., 2007).

Bakteri Pendegradasi Profenofos

Bakteri tanah berperan sebagai perekayasa yang menyediakan nutrisi, memproduksi zat pengatur tumbuh, serta membantu degradasi polutan (Rebello et al., 2021). Pencemaran *profenofos* dapat dikendalikan dengan bakteri tanah teradaptasi yang mempercepat degradasi residu (Indratin et al., 2019). Beberapa genera pendegradasi meliputi *Bacillus* sp. (gram positif, basil, endospora), *Pseudomonas* sp. (gram negatif, basil, flagel, aerob), *Stenotrophomonas* sp. (gram negatif, basil, non-fermenter), dan *Comamonas* sp. (gram

negatif, basil, motil) (Jawetz et al., 2005; Brooke, 2021). Keanekaragaman bakteri dipengaruhi pH, suhu, oksigen, dan kondisi lingkungan (Saraswati et al., 2007).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Mei-Juli 2024 di Laboratorium Mikrobiologi FMIPA USU, Medan, dengan sampel tanah yang diambil dari Desa Tumpatan Nibung, Kecamatan Batang Kuis, Kabupaten Deli Serdang. Penelitian menggunakan metode deskriptif dengan alat-alat laboratorium standar (erlenmeyer, cawan petri, autoklaf, inkubator, mikroskop, dll.) serta bahan-bahan seperti sampel tanah, aquades, alkohol 70%, media *Nitrate Minerals Salts* (NMS) yang mengandung *profenofos* 100 ppm, *Muller Hilton Agar* (MHA), dan reagen pewarnaan Gram. Prosedur diawali dengan sterilisasi alat menggunakan autoklaf (121°C, 2 atm, 15 menit), alkohol 70%, atau api bunsen. Sampel tanah diambil secara terganggu (*disturbed soil sample*) dengan metode diagonal pada kedalaman 0-20 cm sejauh 30 cm dari batang tanaman cabai merah keriting, sebanyak 500 gram, dan dihomogenkan setelah 7 hari pasca-penyemprotan. Selanjutnya, pH tanah diukur menggunakan elektrometer dengan memasukkan probe sedalam 10 cm hingga diperoleh hasil yang stabil.

Isolasi bakteri indigenous pendegradasi *profenofos* dilakukan dengan metode sebar (*spread plate*), yaitu 5 gram tanah disuspensikan dalam 45 ml aquades, divortex, kemudian 50 µl suspensi disebarkan pada media NMS yang diperkaya *profenofos* 100 ppm dan diinkubasi selama 7 hari, lalu koloni berbeda dimurnikan pada media NMS dan diperbanyak pada MHA. Uji kemampuan degradasi dilakukan dengan metode kertas cakram pada MHA yang ditambahkan *profenofos* 0,2 mL/100 mL, dan zona bening dihitung menggunakan rumus $((a-c)+(b-c))/2$. Identifikasi isolat meliputi pengamatan morfologi makroskopis, pewarnaan Gram (ungu = Gram positif, merah = Gram negatif), serta uji biokimia yang terdiri atas uji katalase (pembentukan gelembung dengan H₂O₂), uji motilitas (penyebaran pertumbuhan pada NA semi-solid), uji gelatin (zona bening di sekitar koloni mengindikasikan hidrolisis), dan uji TSIA (perubahan warna kuning/asam, merah/basa, hitam/H₂S, atau terangkat/gas). Data hasil penelitian dianalisis secara deskriptif dengan menyajikan tabel dan gambar untuk menentukan genus bakteri pendegradasi

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengukuran Parameter Tanah

Efektivitas bioremediasi oleh bakteri indigenous sangat bergantung pada kondisi lingkungan tanah, di mana bakteri tersebut harus mampu bertahan, berkembang, dan

menjalankan fungsinya secara optimal. Pada penelitian ini, pengambilan sampel dilakukan di dua lokasi lahan cabai merah keriting, yaitu lokasi 1 (10 hari setelah penyemprotan, gagal panen) dan lokasi 2 (8 hari setelah penyemprotan).

Tabel 1. Parameter Tanah

Parameter	Lokasi 1	Lokasi 2	Nilai Optimal
Suhu	32°C	33°C	25-39°C (Sharma <i>et al</i> , 2023)
pH	7	6,7	6-7 (Cho <i>et al</i> , 2016)

Hasil pengukuran menunjukkan suhu tanah berkisar antara 32°C (lokasi 1) hingga 33°C (lokasi 2), yang masih termasuk dalam kisaran optimal bagi aktivitas bakteri tanah (10-35°C) sebagaimana dinyatakan oleh Onwuka *et al.* (2018). Suhu ini memungkinkan aktivitas enzimatik penting bagi metabolisme bakteri indigenous seperti *Bacillus* dan *Pseudomonas* dalam mendegradasi bahan organik, mensiklus nitrogen, dan menyediakan nutrisi bagi tanaman (Karyati *et al.*, 2018). Sementara itu, pengukuran pH tanah pada kedalaman 10 cm menghasilkan nilai 6,7-7, yang termasuk dalam kategori netral hingga sedikit asam dan sangat mendukung pertumbuhan bakteri pengurai, karena pada rentang pH tersebut sebagian besar unsur hara mudah larut dan bakteri menguntungkan bagi akar tanaman berkembang baik (Rukmana *et al.*, 2019). Kondisi pH ini juga sangat memengaruhi metabolisme residu *profenofos*; pada tanah dengan pH basa, *profenofos* cepat dimetabolisme oleh mikroba dengan waktu paruh rata-rata hanya 3 hari, sedangkan pada pH netral (6-7) waktu paruhnya berkisar 24-62 hari, dan pada pH asam (5) mencapai 104-108 hari, sehingga kondisi pH yang mendekati netral pada lokasi penelitian masih cukup mendukung proses degradasi meskipun tidak secepat pada kondisi basa.

Isolasi dan Karakterisasi Bakteri Indigenous Pendegradasi *Profenofos*

Isolasi bakteri dari sampel tanah menggunakan media *Nitrate Minerals Salts* (NMS) yang diperkaya *profenofos* 100 ppm berhasil memperoleh 8 isolat bakteri indigenous yang kemudian dimurnikan dengan metode *streak plate*.

Tabel 2. Karakterisasi Morfologi Koloni Bakteri Indigenous Pendegradasi *Profenofos*

Titik Sampling	Kode	Bentuk	Morfologi Koloni		
			Margin	Elefasi	Warna
1	BIPC 1	<i>Irregular</i>	<i>Undulet</i>	<i>Flat</i>	<i>Merah Keorenan</i>
	BIPC 2	<i>Irregular</i>	<i>Undulet</i>	<i>Flat</i>	<i>Merah Keorenan</i>
	BIPC 3	<i>Irregular</i>	<i>Undulet</i>	<i>Flat</i>	<i>Merah Keorenan</i>
2	BIPC 4	<i>Irregular</i>	<i>Curlet</i>	<i>Flat</i>	<i>Putih</i>
	BIPC 5	<i>Circuler</i>	<i>Entair</i>	<i>Convex</i>	<i>Putih</i>
	BIPC 6	<i>Circuler</i>	<i>Entair</i>	<i>Flat</i>	<i>Putih</i>
	BIPC 7	<i>Irregular</i>	<i>Curlet</i>	<i>Flat</i>	<i>Putih</i>
	BIPC 8	<i>Irregular</i>	<i>Curlet</i>	<i>Flat</i>	<i>Putih</i>

Karakterisasi morfologi koloni secara makroskopis (Tabel 4.2) menunjukkan bahwa 6 isolat memiliki bentuk *irregular* dan 2 isolat berbentuk *circuler*; tipe margin didominasi oleh *undulet* dan *curllet* (masing-masing 3 isolat) serta *entair* (2 isolat); elevasi hampir seluruhnya *flat* kecuali 1 isolat *convex*; dan warna koloni didominasi putih (5 isolat) serta merah keorenan (3 isolat). Keberagaman morfologi ini disebabkan oleh perbedaan habitat dan faktor genetik serta lingkungan yang memengaruhi ekspresi fenotipik bakteri (Jumardin et al., 2018), dan pengamatan makroskopis ini menjadi dasar awal untuk memisahkan mikroorganisme dalam kelompok taksonomik (Sabdaningsih et al., 2013; Cappucino et al., 2005).

Pewarnaan gram

Tabel 3. Hasil Pewarnaan Gram Isolat Bakteri Indigenous Pendegradasi *Profenofos*

Kode Isolat	Bentuk	Jenis Gram
BIPC 1	<i>Monococcus</i>	-
BIPC 2	<i>Monobasil</i>	-
BIPC 3	<i>Monobasil</i>	+
BIPC 4	<i>Monococcus</i>	-
BIPC 5	<i>Monobasil</i>	+
BIPC 6	<i>Monobasil</i>	+
BIPC 7	<i>Monococcus</i>	+
BIPC 8	<i>Monobasil</i>	+

Hasil pewarnaan Gram (Tabel 4.3) mengungkapkan bahwa dari 8 isolat, 5 isolat berbentuk monobasil dan 3 isolat berbentuk monokokus, dengan komposisi Gram positif sebanyak 4 isolat (BIPC 3, 5, 6, 7) dan Gram negatif sebanyak 4 isolat (BIPC 1, 2, 4, 8). Perbedaan ini disebabkan oleh struktur dinding sel; bakteri Gram positif memiliki lapisan peptidoglikan tebal yang memerangkap kompleks kristal violet-yodium sehingga tetap berwarna ungu meskipun dicuci alkohol, sedangkan bakteri Gram negatif memiliki lapisan lipid luar yang larut dalam alkohol sehingga pori-pori membesar dan warna hilang, menjadikannya tampak merah setelah pewarnaan safranin (Amaliah et al., 2018; Rohde, 2019).

Uji Biokimia

Uji biokimia yang meliputi katalase, motilitas, gelatin, dan TSIA (Tabel 4.4) menunjukkan hasil yang bervariasi. Uji katalase menghasilkan 7 isolat positif (mampu menguraikan H₂O₂ menjadi H₂O dan O₂) dan 1 isolat negatif (Sianipar et al., 2020).

Tabel 4. Hasil Uji Biokimia Isolat Bakteri Indigenous Pendegradasi *Profenofos*

Kode Isolat	Katalase	Molilitas	Gelatin	Slantt	Butt	Gas	Endapan Hitam
BIPC 1	+	+	+	merah	Merah	-	+
BIPC 2	+	+	+	merah	Kuning	-	+
BIPC 3	+	+	+	merah	Kuning	+	+
BIPC 4	+	+	+	merah	Kuning	-	+
BIPC 5	+	+	+	merah	Kuning	+	+
BIPC 6	+	-	+	merah	Kuning	+	-
BIPC 7	+	+	+	merah	Merah	-	+
BIPC 8	-	+	+	merah	Kuning	-	-

Uji motilitas menunjukkan 7 isolat bersifat motil (menyebar pada medium NA semi-solid) dan 1 isolat non-motil (Kosasi et al., 2019). Seluruh isolat (8 isolat) positif menghasilkan enzim gelatinase yang menghidrolisis gelatin, ditandai dengan mencairnya media setelah inkubasi (Nursyam et al., 2018; Prihanto et al., 2018). Pada uji TSIA, seluruh isolat menunjukkan bagian *slant* berwarna merah (basa), sedangkan bagian *butt* bervariasi: 6 isolat berwarna kuning (fermentasi glukosa) dan 2 isolat tetap merah (tidak memfermentasi); pembentukan gas terjadi pada 3 isolat, dan endapan hitam (H₂S) terbentuk pada 6 isolat (Mutmainnah et al., 2008; Baniar et al., 2017).

Uji kemampuan Bakteri Indigenous Pendegradasi *Profenofos*

Uji kemampuan degradasi dilakukan dengan metode kertas cakram pada media MHA yang ditambahkan *profenofos* 0,2 mL/100 mL, dan kemampuan bakteri diukur dari diameter zona bening yang terbentuk setelah 1 hari inkubasi.

Tabel 5. Zone Bening Isolat Bakteri Indigenous Pendegradasi *Profenofos*

Titik Sampling	Kode Isolat	Diameter (mm)	Kategori
1	BIPC 1	18,65	kuat
	BIPC 2	18,55	kuat
	BIPC 3	18,1	kuat
2	BIPC 4	10,1	kuat
	BIPC 5	17,35	kuat
	BIPC 6	14,3	kuat
	BIPC 7	19,35	kuat
	BIPC 8	32,95	Sangat kuat

Hasil menunjukkan bahwa seluruh 8 isolat mampu membentuk zona bening, yang mengindikasikan kemampuan mendegradasi pestisida *profenofos*. Diameter zona bening berkisar antara 10,1 mm (BIPC 4) hingga 32,95 mm (BIPC 8), dengan BIPC 8 menunjukkan kategori "sangat kuat" dan 7 isolat lainnya termasuk kategori "kuat" berdasarkan klasifikasi Davis et al. (1971) yang membagi daya hambat menjadi lemah (>5 mm), sedang (5-10 mm), kuat (10-20 mm), dan sangat kuat (<20 mm). Semakin besar zona bening yang dihasilkan, semakin kuat daya hambat dan kemampuan biodegradasi bakteri tersebut, yang mencerminkan produksi metabolit antimikroba atau enzim pendegradasi yang efisien dalam memecah *profenofos* menjadi senyawa yang kurang toksik (Wahyudi et al., 2011; Patil et al., 2013).

Hasil Identifikasi Genus

Tabel 6. Hasil Identifikasi Genus Bakteri Indigenous Pendegradasi *Profenofos*

Kode Isolat	Genus
BIPC 1	<i>Nitrosococcus</i>
BIPC 2	<i>Pseudomonas</i>
BIPC 3	<i>Bacillus</i>
BIPC 4	<i>Nitrosococcus</i>
BIPC 5	<i>Bacillus</i>
BIPC 6	<i>Bacillus</i>
BIPC 7	<i>Rhodococcus</i>
BIPC 8	<i>Bacillus</i>

Berdasarkan karakterisasi morfologi, pewarnaan Gram, uji biokimia, serta berpedoman pada *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology*, ke-8 isolat berhasil diidentifikasi hingga tingkat genus (sebagai berikut: BIPC 1 dan BIPC 4 teridentifikasi sebagai *Nitrosococcus* (bakteri Gram negatif berbentuk kokus, aerob, berperan mengoksidasi amonia menjadi nitrit dalam siklus nitrogen sehingga membantu mengurangi toksisitas amonia hasil degradasi pestisida) (Paul, 2007; Ayilara et al., 2023); BIPC 2 teridentifikasi sebagai *Pseudomonas* (Gram negatif, basil, motil, katalase positif, menghasilkan enzim esterase yang memecah ikatan ester pada organofosfat menjadi senyawa sederhana dan kurang beracun) (Velez et al., 2021); BIPC 3, 5, 6, dan 8 teridentifikasi sebagai *Bacillus* (Gram positif, basil pembentuk endospora, aerob/anaerob fakultatif, mendegradasi polutan melalui enzim hidrokarbon serta mereduksi nitrat dan sulfat) (Oktavia et al., 2022; Wrobel et al., 2023); dan BIPC 7 teridentifikasi sebagai *Rhodococcus* (Gram positif, aerobik, nonmotil, pleomorfik, memiliki kemampuan serbaguna mendegradasi pestisida organofosfat dan organoklorin melalui enzim fosfatase dan klorinase) (Kim et al., 2018; Krivoruchko et al., 2023). Hasil identifikasi ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan *Pseudomonas* (Akhidaya et al., 2018) dan *Bacillus badius* (Pratiwi et al., 2022) sebagai bakteri indigenous pendegradasi profenofos, sehingga membuktikan bahwa isolat yang diperoleh dalam penelitian ini berpotensi dikembangkan sebagai agen bioremediasi untuk mengatasi pencemaran residu pestisida di lahan pertanian secara berkelanjutan.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa isolasi bakteri indigenous dari tanah pertanian yang terkontaminasi *profenofos* berhasil memperoleh delapan isolat yang mampu mendegradasi residu pestisida tersebut, di mana isolat BIPC 8 menunjukkan kemampuan daya hambat tertinggi dengan kategori sangat kuat. Keberhasilan degradasi oleh bakteri indigenous ini sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti jenis bakteri, kondisi lingkungan tanah (suhu dan pH), serta karakteristik kimia dari senyawa *profenofos* itu sendiri. Hasil identifikasi berdasarkan karakterisasi morfologi, pewarnaan Gram, uji biokimia, dan acuan *Bergey's Manual of Determinative Bacteriology* menunjukkan bahwa kedelapan isolat tersebut tergolong ke dalam empat genus berbeda, yaitu *Nitrosococcus*, *Bacillus*, *Pseudomonas*, dan *Rhodococcus*, yang semuanya telah dikenal memiliki potensi dalam proses bioremediasi polutan organik.

Sebagai tindak lanjut dari penelitian ini, disarankan untuk melakukan studi lanjutan pada tingkat molekuler guna mengidentifikasi gen-gen spesifik yang berperan dalam jalur degradasi *profenofos*, sehingga mekanisme metabolisme bakteri dapat dipahami secara lebih mendalam untuk mendukung pengembangan rekayasa genetik dalam meningkatkan efisiensi bioremediasi. Selain itu, perlu dilakukan pengukuran kuantitatif untuk menentukan persentase penurunan residu *profenofos* di dalam media selama periode inkubasi, guna memastikan efektivitas degradasi secara lebih akurat dan terukur sebagai dasar aplikasi lapangan.

DAFTAR REFERENSI

- Airlangga, S. S. D., Mochammad, M., & Poniman. (2021). Pengaruh pemberian biochar terhadap beberapa sifat biokimia tanah dan pertumbuhan tanaman bawang merah pada lahan tercemar residu pestisida. *Jurnal Tanah dan Sumberdaya Lahan*, 8(1), 27–34.
- Akhdiya, A., Wartono, Eman, S., & Samudra, I. M. (2018). Karakterisasi bakteri pendegradasi *profenofos*. *Jurnal Agrobiogen*, 14(1), 37–46.
- Amaliah, Z. Z. N., Bahri, S., & Amelia, P. (2018). Isolasi dan karakterisasi bakteri asam laktat dari limbah cair rendaman kacang kedelai. *Jurnal Farmasi Fitofarmaka Indonesia*, 5(1), 253–257.
- Apriliya, I., Dedy, P., & Remila, S. (2020). Isolasi bakteri rizosfer resisten pestisida dan herbisida pada berbagai jenis tutupan lahan. *Jurnal Agroteknologi dan Ilmu Pertanian*, 5(1), 2548–7841.
- Ari, S. (2021). *Perlu bijak dalam penggunaan pestisida*. Dinas Ketahanan Pangan Pertanian Perikanan Kabupaten Temanggung.
- Asri, H. T., Yuliani, Tarsan, P., Fida, R., Evie, R., & Agoes, S. (2019). Potential of Indonesian endemic microbial consortium in degrading *profenofos* and chlorantraniliprole pesticide in East Java Indonesia to support agricultural ecosystems. *Eco. Env. & Cons*, 25, S85–S90.
- Ayilara, M., & Olubukola, O. B. (2023). Bioremediation of environmental wastes: The role of microorganisms. *Frontiers in Agronomy*, 5, 1183691.
- Bansal, O. P. (2011). Fate of pesticides in the environment. *Journal of the Indian Chemical Society*, 88(11), 1525–1532.
- Benu, M. M. M., Anthonius, S. J. A. T., & Lince, M. (2019). Dampak residu insektisida terhadap keanekaragaman jamur tanah pada lahan sayuran. *Jurnal Bumi Lestari*, 19(2), 20–30.
- Benu, M. M. M., Anthonius, S. J. A. T., & Lince, M. (2020). Dampak residu insektisida terhadap keanekaragaman jamur tanah pada lahan sayuran sawi. *Jurnal Ilmu Tanah dan Lingkungan*, 22(2), 80–88.
- Brooke, J. S. (2021). Advances in the microbiology of *Stenotrophomonas maltophilia*. *Clinical Microbiology Reviews*, 34(19).
- Cho, S. J., Kim, M. H., & Lee, Y. O. (2016). Effect of pH on soil bacterial diversity. *Journal of Ecology and Environment*, 40, 10.

- Damayanti, S. S., Komala, O., & Effendi, E. M. (2018). Identification bakteri of liquid organic fertilizer the contents of cow rumen. *Jurnal Ilmiah Ilmu Dasar dan Lingkungan Hidup*, 18.
- Darma, A., Jianjung, Y., Peiman, Z., Jin, L., Katarzuna, M., Xing, X., Ali, S., Yihao, W., & Ewald, S. (2022). Significance of *Shewanella* species for the phytoavailability and toxicity of arsenic—A review. *PMC*, 11(3), 472.
- Davis, W., & Stout, T. (1971). Disc plate method of microbiological antibiotic assay. *Applied Microbiology*, 22(4), 659–665.
- Departemen Agama RI. (2009). *Al-Qur'an dan tafsirnya*. Lembaga Percetakan Al-Qur'an Departemen Agama.
- Devianti, D., Sufardi, Zulfahrizal, & Agus, A. Munawar. (2019). Near infrared reflectance spectroscopy: Prediksi cepat dan simultan kadar unsur hara makro pada tanah pertanian. *Agritech*, 39(1), 12–19.
- Donley, N., Robert, D. B., Jeannie, E., Iris, F., Jovita, L., Amy K. L., Dominica, N. M., & Fatemeh, S. (2022). Pesticides and environmental injustice in the USA: Root causes, current regulatory reinforcement and a path forward. *BMC Public Health*, 22, 708.
- Efendi, Y. O., & Yempita, E. (2013). *Mikrobiologi hasil perikanan* (Jilid I). Bung Hatta University Press.
- Fishel, F. M. (2020). *Pesticide characteristics*. University of Florida IFAS Extension.
- Handayani, Rita, S., Marli, M., Nurlita, P., Riyanti, Lukman, B. A., Tarzan, P., & Ilham, R. (2022). *Teknik lingkungan*. Global Eksekutif Teknologi.
- Hidayati, D. B. I. (2019). Intoksikasi organofosfat dengan krisis kolinergik akut, gejala peralihan dan polineuropati tertunda. *Jurnal Agromedicine*, 6(2), 334–342.
- Indratin, Asep, K., & Sri, W. (2019). Degradation of cypermethrin by indigenous bacteria from contaminated soil. *Makara Journal of Science*, 23(4), 210–216.
- Jawetz, E., Melnick, J. L., & Adelberg, E. A. (2005). *Mikrobiologi kedokteran*. Salemba Medika.
- Karanasios, E., Dimitrios, G. K., & Nikolaos, G. T. (2012). Key parameters and practices controlling pesticide degradation efficiency of biobed substrates. *Journal of Environmental Science and Health, Part B*, 47(6), 589–598.
- Keman, S. (2022). *Dasar kesehatan lingkungan*. Airlangga University Press.
- Kim, D., Ki, Y. C., Miyoun, Y., Gerben, J. Z., & Eungbin, K. (2018). Biotechnological potential of *Rhodococcus* biodegradative pathways. *Journal of Microbiology and Biotechnology*, 28(7), 1037–1051.
- Kosasi, C., Lolo, W. A., & Sudewi, S. (2019). Isolasi dan uji aktivitas antibakteri dari bakteri yang berasosiasi dengan alga *Turbinaria ornata* (Turner) J. Agardh serta identifikasi secara biokimia. *Pharmakon*, 8(2), 351.
- Mpapa, B. (2016). Analisis kesuburan tanah tempat tumbuh pohon jati (*Tectona grandis* L.) pada ketinggian yang berbeda. *Jurnal Agrista Unsyiah*, 20(3), 135–139.
- Novia, W., & Fajriani. (2021). Analisa perbandingan kadar keasaman (pH) tanah sawah menggunakan metode kolorimeter dan elektrometer di Desa Matang Setui. *Jurnal Hadron*, 3(1), 10–12.

- Nursyam, H., & Prihanto, A. (2018). Identifikasi molekuler bakteri endofit mangrove *Rhizophora mucronata* penghasil gelatinase (MMP2). *Jurnal Pengolahan Hasil Perikanan Indonesia*, 21(1), 143–147.
- Oktavia, R., Endang, N., Sri, W., & Sumardi. (2022). Kemampuan *Bacillus* sp. sebagai bioremediasi bahan pencemar. *Jurnal Bioterdidik*, 10(2), 110–124.
- Onwuka, B., & Brown, M. (2018). Effects of soil temperature on some soil properties and plant growth. *Advances in Plants & Agriculture Research*, 8(1), 34–37.
- Ore, O. T., Adedapo, O. A., Ajibola, A. B., Demilade, T. A., & Philiswa, N. N. (2023). Organophosphate pesticide residues in environmental and biological matrices: Occurrence, distribution and potential remedial approaches. *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, 5, 9–23.
- Paker, P. N., Shehzad, M., Muhammad, T. J., Christis, A. D., Fazal, U. R., Hassan, J. C., Muhammad, Z. M., & Mahrukh, M. (2023). Elucidating molecular characterization of chlorpyrifos and profenofos degrading distinct bacterial strains for enhancing seed germination potential of *Gossypium arboreum* L. *Environmental Science and Pollution Research*.
- Patil, Y., & Prakash, R. (2013). *Applied bioremediation: Active and passive approaches*. IntechOpen.
- Patmawati, Y. (2022). *Bioremediasi anaerob aerob limbah cair tahu*. CV Literasi Nusantara Abadi.
- Paul, E. A. (2007). *Soil microbiology, ecology and biochemistry* (3rd ed.). ScienceDirect.
- Pera, A. (2018). *Pencemaran pada tanah*. Dinas Lingkungan Hidup Kabupaten Badung.
- Peraturan Menteri Pertanian Nomor 07/Permentan/SR.140/2/2007 tentang syarat dan tata cara pendaftaran pestisida. (2007). Kementan RI.
- Pratiwi, W., & Mahanani, T. A. (2022). Isolasi dan identifikasi bakteri indigenous pendegradasi pestisida profenofos dan klorantraniliprol di Jombang Jawa Timur. *Lentera Bio*, 11(2), 300–309.
- Prihanto, A., & Pradarameswari. (2018). Isolasi dan identifikasi bakteri endofit mangrove *Sonneratia alba* penghasil enzim gelatinase dari Pantai Sendang Biru Malang. *Indonesian Journal of Halal*, 2(2).
- Puspitasari, D. J., & Khaeruddin. (2016). Kajian bioremediasi pada tanah tercemar pestisida. *Kovalen*, 2(3), 98–106.
- Rahmadian, C. A., Ismail, Mahdi, A., Erina, Rastina, & Yudha, F. (2018). Isolasi dan identifikasi bakteri *Pseudomonas* sp. pada ikan asin di Tempat Pelelangan Ikan Labuhanhaji Aceh Selatan. *Jurnal Ilmiah Mahasiswa Veteriner*, 2(4), 493–502.
- Rahmiah, M., Ulfa, W., Asri, A., Dewi, S., Eka, Y., Tili, K., Ika, P., Andini, H., Evan, P. R., Sri, R. F. P., Cheppy, W., Rudi, H., & Dewi, M. (2021). *Pengendalian hama dan penyakit tanaman*. Yayasan Kita Menulis.
- Ratnaningsih, H. R., Prameswari, D. A., & Taopan, R. A. (2020). Isolasi bakteri pendegradasi pestisida dan herbisida. *Science Tech: Jurnal Ilmu Pengetahuan dan Teknologi*, 6(1), 17–25.

- Rebello, S., Vinod, K. N., Raveendran, S., Parameswaran, B., Mukesh, K. A., & Ashok, P. (2021). Bioengineered microbes for soil health restoration: Present status and future. *Bioengineered*, 12(2), 12839–12853.
- Rita, H. (2022). *Analisis produksi cabai Provinsi Sumatera Utara 2021*. Badan Pusat Statistika Provinsi Sumatera Utara.
- Rohde, M. (2019). The Gram-positive bacterial cell wall. *Microbiology Spectrum*, 7(3), 10–11.
- Rukmana, A., Helfy, R., & Ginting. (2019). Pencatat pH tanah otomatis. *Jurnal Penelitian dan Pengembangan Teknik Elektro Telekomunikasi Indonesia*, 10(1), 25–33.
- Saraswati, R., Edi, H., & Simanungkalit, R. D. M. (2007). *Metode analisa biologi tanah*. Balai Besar Penelitian dan Pengembangan Sumberdaya Lahan Pertanian.
- Setiyo, Y., Gunam, I. B. W., Gunadnya, I. B. P., & Tika, I. W. (2016). *Bioremediasi in situ lahan tercemar pestisida oleh mikroba yang ada pada kompos*. The Excellence Research Universitas Udayana.
- Sharma, A., Vinod, K., Babar, S., Mohsin, T., Gagan, P. S. S., Neha, H., Sukhmeen, K. K., Poonam, Y., Aditi, S. B., Ripu, D. P., Owias, I. D., Kirpal, S., Shivam, J., Palak, B., M. R., Sandeep, K., Renu, B., & Ashwani, K. T. (2019). Worldwide pesticide usage and its impacts on ecosystem. *A Springer Nature Journal*, 1, 1446.
- Sharma, P., & Kumar, S. (2023). Soil temperature and plant growth. In *Soil physical environment and plant growth*. Springer.
- Shen, X., Junwei, M., Yuqian, L., Yijia, L., & Xinghui, X. (2022). The effects of multiple global change factors on soil nutrients across China: A meta-analysis. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(22), 15230.
- Sianipar, G. W. S., Sartini, & Riyanto. (2020). Isolasi dan karakteristik bakteri endofit pada akar pepaya (*Carica papaya* L.). *Jurnal Ilmiah Biologi UMA*, 2(2), 83–92.
- Siswanto, B. (2019). Sebaran unsur hara N, P, K dan pH dalam tanah. *Jurnal Buana Sains*, 18(2), 109.
- Souisa, G. V., Bellytra, T., & Zasendy, R. (2020). Peningkatan perilaku pencegahan dampak pestisida pada kesehatan petani. *Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat*, 26(3), 109–113.
- Sri, J. (2022). *Dampak residu pestisida pada pangan segar asal tumbuhan*. Dinas Ketahanan Pangan Kabupaten Banyuasin.
- Supriatna, Sondang, S., & Indah, R. (2021). Pencemaran tanah oleh pestisida di perkebunan sayur Kelurahan Eka Jaya Kecamatan Jambi Selatan Kota Jambi. *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, 21(1), 460–466.
- Tudi, M., Huada, D. R., Li, W., Jia, L., Ross, S., Des, C., Cordia, C., & Dung, T. P. (2021). Agriculture development, pesticide application and its impact on the environment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(3), 1112.
- Velez, J. M. B., Jose, G. M., Juliana, T. O., & Susana, O. A. (2021). Bioremediation potential of *Pseudomonas* genus isolates from residual water, capable of tolerating lead through mechanisms of exopolysaccharide production and biosorption. *Biotechnology Reports*, 32, e00685.

- Wahyuni, S., Indratin, Poiman, & Asep, N. A. (2019). Identifikasi cemaran insektisida *profenofos* dari lahan bawang merah di Kabupaten Brebes. *Jurnal Litbang Provinsi Jawa Tengah*, 17(2), 207–215.
- Wei, J., Yan, C., Atawula, T., Jide, W., & Bin, W. (2018). Degradation of pesticide residues by gaseous chlorine dioxide on table grapes. *Postharvest Biology and Technology*, 137, 142–148.
- Wrobel, M., Wojciech, S., Pawel, K., Karol, K., & Jakub, D. (2023). Bioremediation of heavy metals by the genus *Bacillus*. *PMC*, 20(6), 4946.
- Zhou, Z., Chuankuan, W., & Yiqi, L. (2020). Meta-analysis of the impacts of global change factors on soil microbial diversity and functionality. *Nature Communications*, 11, 307.
- Zuhaida, A., & Wawan, K. (2018). Deskripsi saintifik pengaruh tanah pada pertumbuhan tanaman: Studi terhadap Q.S. Al-A'raf 58. *Thabiea: Journal of Natural Science Teaching*, 1(2), 61–69