

STUDI BIODEGRADASI LIMBAH CAIR KELAPA SAWIT: IDENTIFIKASI DAN UJI KEMAMPUAN BAKTERI INDIGENOUS DOMINAN DALAM MENDEGRADASI LEMAK

Jamalika Bunga Nur Siammukaromah^{1*}, Noor Hujjatusnaini¹, Nurul Septiana¹

¹Program Studi Tadris Biologi, Fakultas Tarbiyah dan Ilmu Keguruan, IAIN Palangka Raya, Indonesia
Correspondence E-mail: bunganur@yahoo.com

Abstrak

Perkebunan kelapa sawit adalah komoditas ekspor bidang pertanian terbesar di Indonesia yang mengolah limbahnya sendiri. LCPKS mengandung senyawa organik tidak ramah lingkungan sehingga harus diolah dengan benar agar keberadaannya tidak merugikan lingkungan dan makhluk hidup lain. Penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi ragam mikroorganisme di dalam LCPKS dan memanfaatkan bahan organik TKKS sebagai suplementasi alami bakteri dalam teknik bioremediasi sederhana. Metode yang digunakan adalah eksperimen dalam skala laboratorium dengan mengkarakterisasi bakteri indigen di dalam LCPKS kemudian mengukur laju degradasi dan pertumbuhannya setelah disuplementasi dengan TKKS. Hasil penelitian menunjukkan bahwa terdapat 3 koloni bakteri dominan yang memiliki daya lipolitik koloni bakteri dapat ditingkatkan dengan suplementasi bahan organik TKKS, dimana hasil analisis menggunakan *One Way Anova (Tukey HSD)* menunjukkan perbedaan signifikan K3 dibandingkan dengan K3 dan K5 dengan p-value 0,026 dan 0,030.

Kata Kunci: Bakteri Lipolitik, Suplementasi, Bioremediasi

Abstract

Oil palm plantations are the largest agricultural export commodity in Indonesia that processes its own waste. LCPKS contains organic compounds that are not environmentally friendly so it must be processed properly so that its existence does not harm the environment and other living things. This research aims to explore the variety of microorganisms in LCPKS and utilize TKKS organic material as a natural supplementation of bacteria in simple bioremediation techniques. The method used was laboratory-scale experimentation by characterizing indigenous bacteria in LCPKS and measuring their degradation and growth rates after supplementation with TKKS. The results showed that there are 3 dominant bacterial colonies that have lipolytic power of bacterial colonies can be increased by supplementation of TKKS organic material, where the results of analysis using One Way Anova (Tukey HSD) showed significant differences in K3 compared to K3 and K5 with a p-value of 0.026 and 0.030.

Keyword: Lipolytic Bacteria, Supplementation, Bioremediation

PENDAHULUAN

Kelapa sawit merupakan komoditas ekspor terbesar dalam sektor pertanian di Indonesia berbagai kegunaan seperti bahan baku industri pangan minyak goreng (Supijatno, 2015; Sari dkk., 2023). Menurut data dari Kementerian Koordinator Bidang Perekonomian RI, Indonesia merupakan produsen utama minyak kelapa sawit di dunia. Besarnya permintaan terhadap produk olahan minyak sawit menyebabkan industri ini berkembang pesat dengan adanya pabrik pengolahan yang menghasilkan *Crude Palm Kernel Oil (CPKO)* dan *Crude Palm Oil (CPO)*. Namun, pengolahan buah kelapa sawit dalam skala industri juga menghasilkan limbah dalam bentuk padat, cair dan gas. Salah satu limbah utama yang dihasilkan adalah Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (LCPKS) atau *Palm Oil Mill Effluent (POME)*, adalah menyebabkan pencemaran lingkungan jika tidak dikelola dengan baik.

LCPKS mengandung kadar organik yang tinggi, termasuk senyawa minyak dan lemak yang dapat mencemari lingkungan. Menurut Mulia dkk (2021), LCPKS memiliki *Chemical Oxygen Demand (COD)* rata-rata sebesar 21.280 mg/L, *Biochemical Oxygen Demand (BOD)* sebesar 34.720 mg/L, pH antara 3,5-4, serta kadar minyak dan lemak mencapai 3.075 mg/L. Jika limbah ini dibuang langsung ke perairan tanpa daur yang tepat, menyebabkan pengendapan senyawa organik yang mengakibatkan penurunan kadar oksigen terlarut, kekeruhan air, serta munculnya bau menyengat (Azizah, 2022). Dampak ini tidak hanya mencemari lingkungan sekitar pabrik tetapi juga mengganggu keseimbangan ekosistem

perairan. Oleh karena itu, diperlukan strategi yang efektif untuk mendegradasi senyawa organik dalam LCPKS, termasuk minyak dan lemak.

Salah satu metode yang berpotensi ramah lingkungan dalam pengelolaan LCPKS adalah teknik bioremediasi menggunakan mikroorganisme indigenous. Mikroorganisme indigenous adalah mikroba yang secara alami terdapat dalam lingkungan tertentu dan mampu mendegradasi senyawa organik kompleks, termasuk lemak. Penelitian yang dilakukan oleh Prasadnya (2023), menemukan 16 isolat bakteri lipolitik yang dapat hidup di tanah perkebunan kelapa sawit, yang mengindikasikan bahwa lingkungan tersebut kaya akan senyawa lemak atau minyak. Selain itu, penelitian Putri dkk (2023), menunjukkan bahwa penambahan bahan organik berupa tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dapat mempercepat pertumbuhan dan aktivitas bakteri lipolitik dalam proses degradasi lemak.

Teknik bioremediasi dengan melibatkan mikroorganisme juga diteliti oleh Kesuma dkk (2024), yang menggunakan *Trichoderma* sp. sebagai agen biodegradator alami untuk menurunkan kadar BOD, COD dan minyak di dalam LCPKS. Hal ini membuktikan bahwa banyak mikroorganisme yang hidup di bumi dapat dimanfaatkan sebagai agen biodegradator limbah tercemar, baik secara alami maupun di rekayasa. Penelitian serupa juga dilakukan oleh Elvitriana dkk (2017), yang memanfaatkan mikro alga hijau sebagai agen bioremediasi yang menyerap dan mengurai zat pencemar di dalam limbah cair.

Beberapa upaya telah dilakukan untuk mengurangi dampak LCPKS di Pabrik Kahayan Utara (PKU), Kebun Kahayan Hulu, yang dikelola oleh PT. *Archipelago Timur Abadi* (ATA). Namun, upaya tersebut masih berfokus pada penurunan kadar BOD dan COD tanpa mempertimbangkan potensi biodegradator alami yang terlibat dalam proses degradasi. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi bakteri indigenous dominan dalam LCPKS serta mengevaluasi kemampuannya dalam mendegradasi lemak. Selain itu, penelitian ini juga akan mengeksplorasi efektivitas suplementasi TKKS sebagai sumber bahan organik dalam meningkatkan aktivitas bioremediasi bakteri lipolitik indigenous. Prasadnya (2023), dalam penelitiannya tentang “Potensi Isolat Bakteri Lipolitik dalam Pengendalian *Ganoderma boninense* Pat. Penyebab Busuk Pangkal Batang Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.)” ditemukan 16 isolat bakteri lipolitik yang dapat hidup di tanah perkebunan kelapa sawit, yang berarti tanah tersebut mengandung lemak atau minyak. Upaya yang dapat dilakukan untuk mengembalikan kondisi tanah perkebunan kelapa sawit adalah dengan menimbun tanah dengan tandan kosong kelapa sawit (TKKS) (Putri dkk., 2023). Dapat diasumsikan bahwa perkembangbiakan bakteri lipolitik dan prosesnya dalam mereduksi lemak di dalam tanah perkebunan kelapa sawit bisa dipercepat dengan adanya penambahan bahan organik berupa TKKS. Maka dari itu, peneliti akan memanfaatkan suplementasi bahan organik TKKS untuk mempercepat perkembangbiakan dan proses reduksi bakteri lipolitik indigenous pada LCPKS.

Penelitian ini bertujuan untuk memvalidasi temuan sebelumnya oleh Prasadnya (2023), yang menyatakan bahwa aplikasi Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) dapat mempercepat laju pertumbuhan serta proses reduksi bakteri lipolitik indigenous. Selain itu, penelitian ini akan mengeksplorasi karakterisasi mikroorganisme pendegradasi yang terdapat dalam Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit (LCPKS) dan mengevaluasi efektivitas TKKS sebagai sumber bahan organik untuk meningkatkan aktivitas bioremediasi. Target penelitian dalam mengkarakterisasi dan menguji efektivitas bakteri indigenous dalam mendegradasi lemak pada LCPKS, diharapkan temuan penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan metode pengolahan limbah yang lebih berkelanjutan. Hasil penelitian ini juga diharapkan dapat mengoptimalkan pemanfaatan mikroorganisme indigenous sebagai agen bioremediasi, sehingga dampak negatif LCPKS terhadap lingkungan dapat diminimalkan.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk karakterisasi bakteri lipolitik serta penerapannya dalam bioremediasi limbah cair kelapa sawit. Sampel limbah diambil dari kolam instalasi pengolahan air limbah (IPAL) di PKU, PT. ATA Kebun Kahayan Hulu menggunakan teknik pengambilan aseptik dengan botol steril pada kedalaman ± 30 cm sebanyak 7 titik dari total keliling kolam IPAL *secondary pound* 2. Seluruh proses isolasi, karakterisasi, dan uji bioremediasi dilakukan di Laboratorium Terpadu IAIN Palangka Raya.

Tahapan Penelitian

1. Observasi dan Karakterisasi Bakteri

Pada tahap awal, dilakukan observasi terhadap kondisi kolam IPAL yang terdiri dari 10 kolam, di mana 7 kolam berfungsi aktif dan 3 kolam sebagai kolam penampungan akhir. Setiap kolam memiliki fungsi spesifik dalam pengolahan limbah, sebagaimana tercantum dalam tabel 1.

Tabel 1. Jenis kolam IPAL dan fungsinya

Kolam IPAL	Fungsi
Kolam 1 & 2 (<i>Cooling Pond</i>)	Pendinginan limbah cair kelapa sawit (LCPKS) hingga suhu 40°C
Kolam 3 (<i>Acidification</i>)	Proses pengasaman dan pembiakan bakteri anaerob
Kolam 4 (<i>Secondary Pond 1</i>)	Penguraian senyawa kompleks menjadi lebih sederhana
Kolam 5 (<i>Secondary Pond 2</i>)	Penguraian senyawa sederhana menjadi senyawa terlarut
Kolam 6 (<i>Aerobic Pond</i>)	Penambahan oksigen untuk menurunkan kadar BOD menjadi <100 ppm
Kolam 7-10 (<i>Anaerobic Pond</i>)	Penyaluran hasil olahan limbah ke lahan perkebunan sebagai pupuk organik

Penanganan limbah di IPAL ini menunjukkan bahwa pengelolaan LCPKS telah dilakukan secara sistematis, sesuai dengan prinsip pengolahan limbah yang dianjurkan (Ilmannafian dkk., 2020). Pengambilan sampel limbah hanya dilakukan pada kolam *Secondary pond 2* guna mempertahankan kesegaran sampel dan dengan kadar mikroorganisme aktif, sehingga proses isolasi dapat dilakukan dengan lebih akurat.

2. Isolasi dan Karakterisasi Bakteri

Isolasi bakteri dilakukan dengan teknik pengenceran serial (10^{-1} hingga 10^{-6}), kemudian ditumbuhkan pada media *Nutrient Agar* (NA). Koloni dominan yang tumbuh dipilih dan diuji aktivitas enzim lipase melalui uji hidrolisis minyak dengan menggunakan media *Nutrient Agar Lemak* (NAL). Metode ini memanfaatkan lemak/minyak untuk pengujian aktivitas enzim lipase dengan mengamati lebar zona pertumbuhan bakteri di atas lemak/minyak (Rizki, 2017). Karakterisasi dan identifikasi bakteri dilakukan dengan mengamati parameter morfologi koloni, meliputi warna, bentuk, tepi, elevansi, kepekatan, serta tingkat kilap koloni (Utami, 2015).

3. Uji Bioremediasi

Untuk menguji efektivitas bakteri lipolitik dalam bioremediasi, dipilih 3 koloni dominan untuk dilakukan suplementasi tandan kosong kelapa sawit (TKKS) ke dalam kultur bakteri lipolitik dengan konsentrasi 0,1%, 0,5% dan 1%. Kultur diinkubasi selama 3 hari untuk memungkinkan bakteri memanfaatkan TKKS sebagai sumber karbon dan energi dalam proses degradasi lemak.

4. Analisis Data

Setelah masa inkubasi selama 3 hari, jumlah koloni bakteri lipolitik dihitung menggunakan metode *Most Probable Number* (MPN) guna mengevaluasi tingkat pertumbuhan dan aktivitas bakteri (Utami, 2015). Data yang diperoleh dianalisis secara statistik dengan bantuan perangkat lunak SPSS menggunakan uji *One Way ANOVA* untuk membandingkan efektivitas bioremediasi antar perlakuan dengan kontrol. Lalu dilakukan uji lanjut Tukey HSD untuk melihat perbedaan secara signifikan dari masing-masing koloni dominan. Analisis ini bertujuan untuk menentukan konsentrasi TKKS yang paling optimal dalam meningkatkan aktivitas bakteri lipolitik.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil karakterisasi bakteri yang ditemukan pada kolam IPAL (*secondary pond 2*) menunjukkan adanya keberagaman mikroorganisme yang berperan dalam proses bioremediasi. Dari 7 titik pengambilan sampel, diperoleh 18 jenis koloni bakteri dengan karakteristik morfologi yang berbeda. Keberadaan bakteri-bakteri ini memiliki implikasi ekologis dan fungsional yang signifikan dalam sistem pengolahan limbah cair (Tabel 2).

Tabel 2. Data Hasil Karakterisasi Bakteri pada LCPKS

No.	Koloni	Jumlah Koloni	Ciri Morfologi	
1.	Koloni 1 <i>Micrococcus</i> sp.	26	Warna Koloni	: Putih Kekuningan
			Bentuk Koloni	: Bundar tepian kerang
			Tepi Koloni	: Bercabang
			Elevansi	: Timbul
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Cukup Pekat
2.	Koloni 2 <i>Staphylococcus aureus</i>	1	Warna Koloni	: Putih Kekuningan
			Bentuk Koloni	: Bundar Tepian Kerucut
			Tepi Koloni	: Licin
			Elevansi	: Seperti Tombol
			Mengkilat/Suram	: Suram
			Kepekatan	: Cukup Pekat
3.	Koloni 3 <i>Streptomyces</i> sp.	90	Warna Koloni	: Putih Kekuningan
			Bentuk Koloni	: Tidak Beraturan
			Tepi Koloni	: Berlekuk
			Elevansi	: Seperti Tombol
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Pekat
4.	Koloni 4 <i>Enterobacter</i> sp.	177	Warna Koloni	: Putih Kekuningan
			Bentuk Koloni	: Tak Beraturan
			Tepi Koloni	: Tak Beraturan
			Elevansi	: Seperti Tombol
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Tidak Pekat
5.	Koloni 5 <i>Nocardia</i> sp.	125	Warna Koloni	: Putih Kekuningan
			Bentuk Koloni	: Bundar Tepian kerang
			Tepi Koloni	: Bercabang
			Elevansi	: Timbul
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Pekat
6.	Koloni 6 <i>Staphylococcus aureus</i>	70	Warna Koloni	: Putih Kuning
			Bentuk Koloni	: Bundar Tepian Kerang
			Tepi Koloni	: Berlekuk
			Elevansi	: Timbul
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Cukup Pekat
7.	Koloni 7 <i>Streptomyces</i> sp.	3	Warna Koloni	: Putih Kekuningan
			Bentuk Koloni	: Filiform
			Tepi Koloni	: Seperti Woll
			Elevansi	: Berbukit-bukit
			Mengkilat/Suram	: Suram
			Kepekatan	: Tidak Pekat

Sumber : Hasil penelitian

No.	Koloni	Jumlah Koloni	Ciri Morfologi	
8.	Koloni 8 <i>Pseudomonas</i> sp.	1	Warna Koloni	: Putih Bening
			Bentuk Koloni	: Bundar Tepian kerang
			Tepi Koloni	: Berlekuk
			Elevansi	: Berbukit-bukit
			Mengkilat/Suram	: Suram

No.	Koloni	Jumlah Koloni	Ciri Morfologi	
			Kepekatan	: Tidak Pekat
9.	Koloni 9 <i>Bacillus</i> sp.	2	Warna Koloni	: Putih
			Bentuk Koloni	: Tidak Beraturan
			Tepi Koloni	: Berlekuk
			Elevansi	: Datar
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Tidak Pekat
10.	Koloni 10 <i>Bacillus</i> sp.	1	Warna Koloni	: Putih Kekuningan
			Bentuk Koloni	: Berbentuk L
			Tepi Koloni	: Berombak
			Elevansi	: Berbukit-bukit
			Mengkilat/Suram	: Suram
			Kepekatan	: Pekat
11.	Koloni 11 <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1	Warna Koloni	: Kuning, Hijau
			Bentuk Koloni	: Bundar Tepian Kerang
			Tepi Koloni	: Bercabang
			Elevansi	: Berbukit-bukit
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Cukup Pekat
12.	Koloni 12 <i>Staphylococcus aureus</i>	1	Warna Koloni	: Putih Kekuningan
			Bentuk Koloni	: Bundar Tepian Kerang
			Tepi Koloni	: Tak Beraturan
			Elevansi	: Timbul
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Pekat
13.	Koloni 13 <i>Lactobacillus</i> sp.	8	Warna Koloni	: Putih
			Bentuk Koloni	: Bundar Tepian Kerucut
			Tepi Koloni	: Berombak
			Elevansi	: Timbul
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Cukup Pekat
14.	Koloni 14 <i>Streptococcus</i> sp.	2	Warna Koloni	: Kuning (putih)
			Bentuk Koloni	: Bundar Tepian Kerucut
			Tepi Koloni	: Berombak
			Elevansi	: Timbul
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Pekat
15.	Koloni 15 <i>Staphylococcus aureus</i>	3	Warna Koloni	: Kuning
			Bentuk Koloni	: Bundar Tepian Kerucut
			Tepi Koloni	: Licin
			Elevansi	: Timbul
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Tidak Pekat
16.	Koloni 16 <i>Rhodotorula</i> sp.	6	Warna Koloni	: Merah Muda
			Bentuk Koloni	: Bundar
			Tepi Koloni	: Licin
			Elevansi	: Seperti Tombol
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Pekat
17.	Koloni 17	4	Warna Koloni	: Putih

No.	Koloni	Jumlah Koloni	Ciri Morfologi	
	<i>Streptococcus</i> sp.		Bentuk Koloni	: Bundar Tepian Kerucut
			Tepi Koloni	: Berombak
			Elevansi	: Timbul
			Mengkilat/Suram	: Mengkilat
			Kepekatan	: Pekat
18.	Koloni 18 <i>Acinetobacter</i> sp.	2	Warna Koloni	: Putih
			Bentuk Koloni	: Kompleks
			Tepi Koloni	: Bercabang
			Elevansi	: Datar
			Mengkilat/Suram	: Mengkilap
			Kepekatan	: Cukup Pekat

Sumber : Hasil penelitian

Tahapan penelitian selanjutnya adalah menguji daya lipolitik bakteri dominan untuk memastikan bahwa bakteri yang ditemukan merupakan bakteri lipolitik, dengan menilai keterkaitan antara penambahan TKKS sebagai induktor yang mempercepat proses degradasi dan peningkatan aktivitas enzim lipase yang diamati melalui zona pertumbuhan bakteri pada medium NAL. Data hasil pengujian daya lipolitik bakteri dominan dapat dilihat pada tabel 3.

Tabel 3. Data Uji Daya Lipolitik Bakteri

Kode Koloni	Konsentrasi	Kode Koloni dalam NAL	Lebar Zona Pertumbuhan		
			H1	H2	H3
K3	0,1%	a	1,0	1,4	1,6
		b	0,2	0,8	1,6
	0,5%	a	0,2	0,9	1,0
		a	0,9	1,0	5,0
K4	0,1%	a	2,9	5,0	7,0
		b	1,0	3,1	5,3
		c	1,9	2,7	2,9
	0,5%	a	5,0	5,9	6,3
		b	0,9	1,7	3,3
		c	1,0	2,5	3,9
	1%	a	1,0	1,9	4,2
		b	1,5	2,1	4,2
		c	0,2	1,0	1,5
	0,1%	a	2,9	5,6	6,0
K5	0,5%	a	0,4	1,2	2
		b	2,2	3,1	3,2
	1%	a	2,0	4,9	6,9
		b	1,9	4,2	4,8
		c	0,5	1,3	1,7

Sumber : Hasil penelitian

Pengujian daya lipolitik bakteri dilakukan dengan mengamati zona pertumbuhan bakteri di atas medium NAL selama 72 jam.



Sumber : Hasil penelitian

Gambar 1. Zona Pertumbuhan kode koloni K4 di atas minyak/lemak setelah 72 jam

Aktivitas bakteri dalam mendegradasi senyawa organik di dalam LCPKS dapat dipercepat dengan memanfaatkan bahan organik seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai suplementasi. Pengaruh suplementasi bahan organik terhadap aktivitas bakteri dapat diketahui dengan melakukan pengujian tambahan. Data hasil uji suplementasi dapat dilihat pada tabel 4 berikut.

Tabel 4. Pengaruh Suplementasi TKKS terhadap Laju Pertumbuhan Bakteri Lipolitik

	Seri A	Seri B	Seri C	MPN/ 100 ml	Jumlah sel /15 ml
K3 Kontrol	3	0	0	0,23	3,45
0,1%	3	2	3	2,90	43,5
Koloni 3					
0,5%	2	2	2	0,35	5,25
1%	1	3	0	0,16	2,4
K4 Kontrol	2	1	1	0,20	3
0,1%	2	3	2	0,44	6,6
Koloni 4					
0,5%	3	1	2	1,20	18
1%	1	2	3	0,24	3,6
K5 Kontrol	2	0	2	0,20	3
0,1%	1	3	2	0,24	3,6
Koloni 5					
0,5%	2	2	3	0,42	6,3
1%	3	2	3	2,90	43,5

Sumber : Hasil penelitian

Data hasil pengamatan dianalisis menggunakan teknik analisis *One Way Anova*, dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data statistik analisis hasil uji ANOVA

ANOVA					
zona bening					
	Sum of Squares	df	Mean Square	F	Sig.
Between Groups	124.453	18	6.914	3.538	.001
Within Groups	74.260	38	1.954		
Total	198.713	56			

Sumber : Hasil penelitian

Teknik analisis di lanjutkan dengan Uji Lanjut Tukey HSD untuk menganalisis perbedaan antar koloni secara lebih spesifik.

Tabel 6. Data hasil Uji Lanjut Tukey HSD

Multiple Comparisons						
Dependent Variable: zona bening						
Tukey HSD						
(I) koloni	(J) koloni	Mean Difference (I-J)	Std. Error	Sig.	95% Confidence Interval	
					Lower Bound	Upper Bound
koloni 3	koloni 4	-1.6593*	.6182	.026	-3.149	-.169
	koloni 5	-1.7444*	.6641	.030	-3.345	-.144
koloni 4	koloni 3	1.6593*	.6182	.026	.169	3.149
	koloni 5	-.0852	.5422	.986	-1.392	1.222
koloni 5	koloni 3	1.7444*	.6641	.030	.144	3.345
	koloni 4	.0852	.5422	.986	-1.222	1.392

*. The mean difference is significant at the 0.05 level.

Sumber : Hasil penelitian

Hasil karakterisasi bakteri yang ditemukan pada kolam IPAL (*secondary pond 2*) menunjukkan keberagaman mikroorganisme yang berperan dalam proses bioremediasi. Data hasil karakterisasi bakteri pada Tabel 2 menunjukkan bahwa dari 7 titik pengambilan sampel di bagian permukaan kolam penampungan limbah IPAL nomor 5 (*secondary pond 2*) seluas 2.125 m², diperoleh 18 jenis koloni bakteri dengan karakteristik morfologi yang berbeda. Tiga jenis koloni dengan jumlah terbanyak adalah Koloni 4 (*Enterobacter* sp.) sebanyak 177 koloni, Koloni 5 (*Nocardia* sp.) sebanyak 125 koloni, dan Koloni 3 (*Streptomyces* sp.) sebanyak 90 koloni. Keberadaan bakteri-bakteri ini memiliki implikasi ekologis dan fungsional yang signifikan dalam sistem pengolahan limbah cair.

Ketiga bakteri yang dominan diduga memiliki peran penting dalam proses bioremediasi. *Enterobacter* sp. diketahui memiliki kemampuan untuk melakukan fermentasi anaerob dan menghasilkan enzim yang membantu memecah senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana (Hartanti & Talakua, 2023). *Nocardia* sp. merupakan bakteri lipolitik yang memiliki kemampuan untuk menghasilkan enzim lipase yang menghidrolisis lemak menjadi asam lemak dan gliserol (Oktavia & Wibowo, 2017). Adapun *Streptomyces* sp. dikenal sebagai pembuat berbagai enzim hidrolitik, seperti *protease* dan *lipase*, yang membantu memecah bahan organik kompleks di lingkungan yang tinggi kadar nutrisinya (Sonya dkk., 2015). Disimpulkan bahwa proses bioremediasi ini terjadi melalui kerja sama di mana *Enterobacter* sp. menguraikan senyawa organik kompleks, dan diikuti oleh aktivitas enzimatik dari *Nocardia* sp. serta *Streptomyces* sp. dalam memecah lemak dan protein. Aktivitas ketiga bakteri ini mempercepat proses degradasi senyawa organik pada limbah, sehingga kandungan bahan organik dalam kolam IPAL dapat berkurang.

Tahapan penelitian selanjutnya adalah menguji daya lipolitik bakteri dominan untuk memastikan bahwa bakteri yang ditemukan merupakan bakteri lipolitik. Pengujian ini bertujuan untuk memastikan bahwa bakteri yang ditemukan benar-benar memiliki kemampuan untuk mendegradasi lemak melalui proses enzimatik sehingga berperan dalam proses bioremediasi LCPKS yang mengandung lemak. Daya lipolitik bakteri dapat diukur dengan membiakkan bakteri di atas medium *Nutrient Agar Lemak* (NAL). Hasil positif ditandai dengan adanya zona bening yang timbul di tepi koloni bakteri. Metode ini telah digunakan dalam penelitian sebelumnya yaitu oleh Rizki (2017), yang menyeleksi bakteri lipolitik terisolasi dari berbagai sumber alami.

Data hasil uji daya lipolitik bakteri pada Tabel 3 menunjukkan adanya peningkatan diameter zona bening di setiap koloni yang tersuplementasi TKKS dengan konsentrasi 0,1%, 0,5% dan 1% dalam jangka waktu 3x24 jam (72 jam). Hal ini berarti koloni 3, koloni 4 dan koloni 5 terbukti aktif secara lipolitik dan mampu memecah lemak dengan baik. Temuan ini konsisten dengan penelitian Elyza dkk (2016), yang menyatakan bahwa aktivitas lipase pada bakteri dapat menurunkan kadar lemak di dalam limbah sawit. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa terjadi proses metabolisme bakteri dalam medium NAL yang ditandai dengan tumbuhnya koloni bakteri di atas butiran minyak.

Pada Gambar 1 terlihat butiran minyak di atas medium *Nutrient Agar* ditumbuhi oleh koloni bakteri. Hasil pengamatan 24 jam pertama, koloni hanya tumbuh di sekitar butiran minyak menandakan bahwa bakteri diasumsikan sedang dalam fase adaptasi. Pada pengamatan 24 jam kedua, koloni bakteri mulai tumbuh di atas butiran minyak yang menandakan bahwa bakteri mampu menghidrolisis lemak menjadi

asam lemak sebagai sumber energi. Pada pengamatan 24 jam ketiga, koloni yang tumbuh di atas butiran minyak meluas, menandakan bahwa bakteri secara aktif memecah lemak dan hasil hidrolisis menjadi cukup untuk menunjang pertumbuhan koloni. Hasil ini sesuai dengan penelitian Khairani & Manalu (2023), yang menyatakan bahwa bakteri lipolitik menghasilkan enzim lipase yang mampu menghidrolisis minyak, membentuk zona bening di sekitar koloni.

Aktivitas bakteri dalam mendegradasi senyawa organik di dalam LCPKS dapat dipercepat dengan memanfaatkan bahan organik seperti tandan kosong kelapa sawit (TKKS) sebagai suplementasi. Pengaruh suplementasi bahan organik terhadap aktivitas bakteri dapat diketahui dengan melakukan pengujian tambahan. Berdasarkan data perolehan *Most Probable Number* (MPN) pada tabel 4, jumlah koloni bakteri tersuplementasi TKKS mengalami peningkatan dibandingkan dengan variabel kontrol. Pada K3, pertumbuhan koloni bakteri tertinggi terjadi pada konsentrasi TKKS 0,1% dengan jumlah sebesar 43,5 koloni/15 mL. Pada K4, pertumbuhan koloni bakteri tertinggi terjadi pada konsentrasi TKKS 0,5% dengan jumlah sebesar 18 koloni/15 mL. Pada K5, pertumbuhan koloni bakteri tertinggi terjadi pada konsentrasi TKKS 1% dengan jumlah sebesar 43,5 koloni/15 mL.

Hal ini menunjukkan bahwa ketersediaan nutrisi yang mendukung pertumbuhan bakteri lipolitik meningkat dengan adanya suplementasi TKKS. Meningkatnya jumlah koloni bakteri pada berbagai konsentrasi TKKS menunjukkan bahwa TKKS sebagai sumber bahan organik yang mampu meningkatkan aktivitas metabolisme bakteri di dalam LCPKS. Penelitian sebelumnya menyebutkan, kompos TKKS mengandung bakteri selulolitik. Sehingga pemberian kompos TKKS mampu mempercepat pembentukan bahan organik, sehingga menyediakan nutrisi tambahan bagi mikroorganisme lain, termasuk bakteri lipolitik (Gusmawartati & Ardinsyah, 2022). Dengan demikian, suplementasi TKKS dapat meningkatkan pertumbuhan bakteri lipolitik, yang berperan penting dalam proses bioremediasi limbah cair kelapa sawit.

Data pengujian daya lipolitik bakteri dianalisis menggunakan teknik data *One Way Anova* setelah dipastikan bahwa data terdistribusi normal. Syarat signifikansi *One Way Anova* adalah ketika *p-value* lebih kecil dari pada 0,05 ($p < 0,05$). Hasil uji *One Way Anova* menunjukkan bahwa lebar zona bening yang muncul pada setiap koloni bakteri berbeda secara signifikan, dibuktikan dengan nilai signifikansi 0,01 lebih kecil dari pada α (0,05) ($0,01 < 0,05$). Hasil uji lanjut menggunakan *Tukey HSD* menunjukkan bahwa kemampuan degradasi koloni 3 berbeda signifikan dibandingkan dengan koloni 4 ($p = 0,026$) dan koloni 5 ($p = 0,030$). Hal ini menunjukkan bahwa koloni 3 memiliki efektivitas degradasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan koloni 4 dan 5.

Enterobacter sp. merupakan bakteri yang mampu melakukan fermentasi anaerob serta menghasilkan berbagai enzim yang membantu dalam pemecahan senyawa organik kompleks menjadi senyawa yang lebih sederhana (Hartanti & Talakua, 2023). Kemampuannya dalam mendegradasi bahan organik menjadikan bakteri ini berperan penting dalam proses stabilisasi limbah cair. Selain itu, beberapa spesies *Enterobacter* diketahui memiliki aktivitas nitrogenase, yang dapat berkontribusi pada proses fiksasi nitrogen dalam lingkungan perairan (Guo dkk., 2020).

Nocardia sp. dikenal sebagai bakteri lipolitik yang dapat menghasilkan enzim lipase untuk menghidrolisis lemak menjadi asam lemak dan gliserol (Oktavia & Wibowo, 2017). Dalam sistem pengolahan limbah cair, keberadaan bakteri ini sangat penting karena limbah industri sering mengandung lemak dan minyak yang sulit terurai secara alami. Kemampuan *Nocardia* sp. dalam mendegradasi senyawa lipid menjadikannya salah satu mikroorganisme kunci dalam bioremediasi lingkungan yang tercemar lemak dan minyak.

Streptomyces sp. merupakan kelompok bakteri yang dikenal luas sebagai penghasil berbagai enzim hidrolitik, seperti protease, lipase dan selulase (Baskaran & Muthukumarasamy, 2017). Enzim-enzim ini memiliki peran dalam pemecahan bahan organik kompleks menjadi bentuk yang lebih sederhana sehingga dapat lebih mudah diuraikan oleh mikroorganisme lain dalam rantai bioremediasi. Selain itu, beberapa spesies *Streptomyces* memiliki aktivitas antimikroba yang dapat menghambat pertumbuhan bakteri patogen dalam sistem pengolahan limbah (Putri dkk., 2021).

Selain tiga bakteri dominan tersebut, hasil karakterisasi juga menunjukkan adanya beberapa jenis bakteri lain seperti *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., dan *Acinetobacter* sp. Keberadaan berbagai jenis bakteri ini menunjukkan bahwa kolam IPAL memiliki komunitas mikroba

yang kompleks, dimana masing-masing spesies memiliki peran spesifik dalam penguraian senyawa organik maupun detoksifikasi limbah.

Penelitian ini sejalan dengan studi yang dilakukan oleh (Kardena dkk., 2020), yang mengevaluasi penggunaan mikroba terimobilisasi untuk menurunkan kadar organik dan amonia dalam limbah cair domestik. Dalam penelitian ini, jumlah koloni *Nocardia* sp. paling banyak, yang menunjukkan bahwa kondisi lingkungan spesifik pada kolam IPAL ini mungkin lebih mendukung pertumbuhan bakteri lipolitik. Selain itu, penelitian oleh Almira (2022), juga menunjukkan bahwa keberagaman mikroba dalam sistem IPAL dapat bervariasi tergantung faktor lingkungan yang tercemar dan jenis limbah yang masuk ke dalam sistem pengolahan limbah.

Aspek relevansi hasil penelitian terhadap regulasi lingkungan bahwa keberadaan bakteri bioremediasi seperti *Enterobacter* sp., *Nocardia* sp., dan *Streptomyces* sp. dalam sistem IPAL menunjukkan bahwa proses pengolahan limbah di fasilitas ini telah berjalan secara biologis. Hal ini mendukung kebijakan pengelolaan limbah yang diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan No. 5 tahun 2021, yang mengharuskan sistem IPAL memiliki mekanisme bioremediasi yang efektif untuk mengurangi pencemaran. Selain itu, hasil penelitian ini juga dapat menjadi dasar bagi optimalisasi sistem pengolahan limbah dengan meningkatkan populasi bakteri tertentu untuk mempercepat degradasi polutan organik.

Berdasarkan hasil karakterisasi ini, dapat disimpulkan bahwa keberadaan bakteri indigenous pada kolam IPAL berperan penting dalam meningkatkan efisiensi pengolahan limbah (Ritonga, 2024). Identifikasi lebih lanjut melalui analisis biokimia dan molekuler diperlukan untuk mengonfirmasi spesies bakteri secara lebih akurat serta mengeksplorasi potensi aplikasi mereka dalam bioteknologi lingkungan. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk memahami interaksi antar mikroorganisme dalam ekosistem ini serta bagaimana kondisi lingkungan dapat dioptimalkan untuk meningkatkan efektivitas bioremediasi oleh mikroorganisme yang telah teridentifikasi.

KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mengidentifikasi tiga bakteri dominan kode koloni K4, K5, dan K3 dalam bioremediasi LCPKS, dengan jumlah koloni terbanyak masing-masing 177, 125, dan 90 koloni. Suplementasi TKKS meningkatkan pertumbuhan bakteri, dengan jumlah koloni tertinggi pada konsentrasi TKKS 0,1% (43,5 koloni/15 ml). Aktivitas lipolitik pada koloni bakteri menunjukkan adanya peningkatan diameter zona bening, yang mengindikasikan degradasi lemak. Uji statistik Lanjutan (*Tukey HSD*) *One Way Anova* menunjukkan perbedaan signifikan pada K3 dibandingkan dengan K4 ($p = 0,026$) dan K5 ($p = 0,030$). Temuan ini mendukung pengembangan bioremediasi berkelanjutan menggunakan mikroorganisme indigenous dan TKKS.

DAFTAR PUSTAKA

- Almira C. E. (2022). *Kajian Keragaman Dan Karakteristik Bakteri Patogen Dominan Pada Ipal Komunal di Kabupaten Sleman*. Universitas Islam Indonesia.
- Azizah, Nur. L., & Syafiuddin, A. (2022). Review Tentang: Efektivitas Pengolahan Air Limbah yang Ada di Indonesia. *Jurnal Sosial Sains*, 2(8), 907–920. <https://doi.org/10.36418/jurnalsosains.v2i8.453>
- Baskaran, B., & Muthukumarasamy, A. (2017). Isolation, characterisation and enzymatic activity of *Streptomyces* sp. and its pH control during fermentation process. *IET Systems Biology*, 11(4), 114–118. <https://doi.org/10.1049/iet-syb.2016.0048>
- Elvitriana, Munir, E., Delvian, & Wahyuningsih, H. (2017). Degradasi zat organik pada limbah cair industri kelapa sawit oleh mikroalga hijau. *Jurnal Serambi Engineering*, 1(2), 85–91. <https://ojs.serambimekkah.ac.id/jse/article/view/497>
- Elyza, F., Gofar, N., & Munawar, M. (2016). Identifikasi Dan Uji Potensi Bakteri Lipolitik Dari Limbah Sbe (Spent Bleaching Earth) Sebagai Agen Bioremediasi. *Jurnal Ilmu Lingkungan*, 13(1), 12. <https://doi.org/10.14710/jil.13.1.12-18>

- Guo, D.-J., Singh, R. K., Singh, P., Li, D.-P., Sharma, A., Xing, Y.-X., Song, X.-P., Yang, L.-T., & Li, Y.-R. (2020). Complete Genome Sequence of *Enterobacter roggenkampii* ED5, a Nitrogen Fixing Plant Growth Promoting Endophytic Bacterium with Biocontrol and Stress Tolerance Properties, Isolated from Sugarcane Root. *Frontiers in Microbiology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.580081>
- Gusmawartati, & Ardinsyah, R. (2022). Dosis Kompos Tandan Kosong Kelapa Sawit (TKKS) Ber-Bakteri Selulolitik terhadap Pertumbuhan Jagung (*Zea mays* L.) di Tanah Ultisol. *Jurnal Ilmu Tanah Dan Lingkungan*, 24(2), 74–78. <https://doi.org/10.29244/jitl.24.2.74-78>
- Hartanti, N. U & Talakua. M. (2023). *Modul Dasar-Dasar Mikrobiologi Akuatik*. Universitas Pancasakti Tegal.
- Ilmannafian, A. G., Lestari, E., & Khairunisa, F. (2020). Pengolahan Limbah Cair Pabrik Kelapa Sawit dengan Metode Filtrasi dan Fitoremediasi Menggunakan Tanaman Eceng Gondok (*Eichhornia Crassipes*). *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 21(2), 244–253. <https://doi.org/10.29122/jtl.v21i2.4012>
- Kardena, E., Prabowo, H. G., & Helmy, Q. (2020). Imobilisasi Kultur Campuran Mikroba Dan Karakteristik Aktifitasnya Dalam Menurunkan Organik Dan Amoniak Pada Limbah Cair Domestik. *Jurnal Teknik Lingkungan*, 26(1), 73–86. <https://doi.org/10.5614/j.tl.2020.26.1.5>
- Kesuma, L. R., Mayasari, U., & Nasution, R. A. (2024). Potensi *Trichoderma* sp. sebagai Agen Bioremediasi Limbah Cair Kelapa Sawit. *Spizaetus: Jurnal Biologi Dan Pendidikan Biologi*, 5(2), 238. <https://doi.org/10.55241/spibio.v5i2.419>
- Khairani, K. & Manalu, K. (2023). Isolasi dan Identifikasi Bakteri Lipolitik dari Limbah Cair Kelapa Sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.). *BIOEDUSAINS: Jurnal Pendidikan Biologi Dan Sains*, 6(1), 1–13. <https://doi.org/10.31539/bioedusains.v6i1.5285>
- Mulia R., P., Giyanto, G., & Barus, S. (2021). Karakteristik Kandungan Unsur N, P Dan K Limbah Cair Kelapa Sawit Kolam Anaerob Dengan Kontak Kuantitas Bentonit. *Jurnal Agrium*, 18(2). <https://doi.org/10.29103/agrium.v18i2.5326>
- Oktavia, D. A., & Wibowo, S. (2017). Penapisan dan Identifikasi Bakteri Lipolitik yang Diisolasi dari Air Limbah Pengolahan Surimi dan Pengalengan Rajungan. *Jurnal Pascapanen Dan Bioteknologi Kelautan Dan Perikanan*, 11(2), 147. <https://doi.org/10.15578/jpbkp.v11i2.262>
- Prasadnya. S.A. (2023). Potensi Isolat Bakteri Lipolitik Dalam Pengendalian *Ganoderma Boninense* Pat. Penyebab Busuk Pangkal Batang Kelapa Sawit (*Elaeis Guineensis* Jacq.). *Skripsi*.
- Putri, R. J., Kawuri, R., Darmadi, A. A. K., & Narayani, I. (2021). Potential of *Streptomyces* sp. in preventing the in vitro growth of *Colletotrichum acutatum*, the causative agent of infection in *Capsicum annum* L. *Jurnal Biologi Udayana*, 25(2), 197. <https://doi.org/10.24843/JBIOUNUD.2021.v25.i02.p12>
- Putri, M.A., Afriwana, S.D., Pulungan, S. H & Hasibuan. A. (2023). Analisis Pemanfaatan Limbah Tandan Kosong Kelapa Sawit Sebagai Pupuk bagi Masyarakat Simandiangan Kab. Labuhanbatu Selatan. *Journal of Health and Medical Research*, 3(3), 408–412.
- Ritonga, Y. S. (2024). *Reduksi Amonia Pada Air Kolam Ikan Lele Dengan Menggunakan Ekoenzim Dan Saccharomyces Cerevisiae* (Doctoral dissertation, UIN Sumatera Utara Medan).
- Rizki, M. Y. (2017). Identifikasi dan uji kemampuan hidrolisis lemak pada bakteri lipolitik yang diisolasi dari wadi. *Skripsi*.
- Sari, N., Cipta, H., & Lubis, R. S. (2023). Analisis pengendalian persediaan kelapa sawit sebagai bahan baku minyak dengan metode continous review system. *PYTHAGORAS: Jurnal Program Studi Pendidikan Matematika*, 12(1), 27–35. <https://doi.org/10.33373/pythagoras.v12i1.4913>
- Sonya, M. H., Altalhi, A. D., El-Zahrani, G. S. B., Sadik, A. S. (2015). Enzymatic Activities of some *Streptomyces* Isolated from Soil at Taif Region. *Nternational Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 4(2), 19–32.
- Supijatno, S. (2015). Waste Management of Palm Oil (*Elaeis guineensis* Jacq.) in Oil Palm Plantation, Riau. In *Bul. Agrohorti* (Vol. 3, Issue 2).
- Utami S. Hastuti. (2015). *Penuntun Praktikum Mikrobiologi untuk Program S2 Biologi* (pertama). UMM press.