

EFEKTIVITAS BAKTERI INDIGEN DALAM BIOREMEDIASI LIMBAH CAIR TAHU UNTUK PENGEMBANGAN PANDUAN PRAKTIKUM PERUBAHAN LINGKUNGAN KELAS X/FASE E

Sindika Anggela Wulandari¹ Muhfahroyin Muhfahroyin² Agus Sujarwanta³

^{1,2,3} Program Pascasarjana Pendidikan Biologi Universitas Muhammadiyah Metro

¹ sindikaanggela20@gmail.com, ² muhfahroyin@yahoo.com, ³ agussujarwanta5@gmail.com

Abstrak: Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menguji efektivitas bakteri indigen dalam proses bioremediasi limbah tahu serta mengembangkan panduan praktikum perubahan lingkungan berdasarkan hasil tersebut. Metode yang digunakan adalah metode eksperimental dengan rancangan acak lengkap (RAL) yang terdiri dari 4 perlakuan, yaitu variasi konsentrasi pumakkal sebagai sumber bakteri indigen. Parameter yang diuji meliputi BOD (*Biochemical Oxygen Demand*), COD (*Chemical Oxygen Demand*), TSS (*Total Suspended Solids*), dan pH. Analisis data yang digunakan yaitu uji *One Way Anova* dan uji lanjut Duncan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bakteri indigen memberikan pengaruh signifikan terhadap penurunan kadar BOD, COD, TSS, serta peningkatan pH. Nilai uji hipotesis menunjukkan signifikansi 0,000 pada seluruh parameter, yang menandakan bahwa perlakuan berpengaruh nyata. Perlakuan P4, dengan konsentrasi pumakkal 7%, terbukti paling efektif dengan hasil BOD sebesar 126,34 mg/L, COD 151,89 mg/L, TSS 359,17 ppm, dan pH 5,97. Selain itu, pengembangan panduan praktikum juga telah divalidasi oleh ahli media, ahli materi dan ahli bahasa. Hasil validasi menunjukkan bahwa panduan praktikum dinilai sangat baik dengan nilai rata-rata 94% dari ahli media, 88% dari ahli materi dan 90% dari ahli bahasa, sehingga panduan ini dapat dikatakan valid dan layak digunakan dalam kegiatan praktikum perubahan lingkungan di sekolah.

Kata kunci: bakteri indigen, bioremediasi, limbah tahu, panduan praktikum, perubahan lingkungan

Abstrack: *The aim of this study is to test the effectiveness of indigenous bacteria in the bioremediation process of tofu wastewater and to develop a practicum guidebooks for environmental change topics based on the results. The method used is an experimental method with a completely randomized design (CRD) consisting of four treatments, namely variations in pumakkal concentration as a source of indigenous bacteria. The parameters tested include BOD (Biochemical Oxygen Demand), COD (Chemical Oxygen Demand), TSS (Total Suspended Solids), and pH. The data analysis employed includes One Way Anova and Duncan's multiple range test. The results of the study indicate that the use of indigenous bacteria has a significant effect on reducing BOD, COD, and TSS levels, as well as increasing pH. Hypothesis testing results show a significance value of 0.000 for all parameters, indicating that the treatments have a significant effect. Treatment P4, with a 7% pumakkal concentration, was found to be the most effective, resulting in BOD levels of 126.34 mg/L, COD levels of 151.89 mg/L, TSS levels of 359.17 ppm, and a pH of 5.97. Furthermore, the development of the practical guide has also been validated by media and material experts. The validation results show that the practical guide is rated as excellent, with an average score of 94% from media experts and 88% from material experts, making it valid and suitable for use in environmental change practicum activities in schools.*

Key word: *indigenous bacteria, bioremediation, tofu wastewater, practical guide, environmental changes*

How to Cite

Wulandari, S.A., Muhfahroyin, Sujarwanta, A. (2024). Efektivitas Bakteri Indigen Dalam Bioremediasi Limbah Cair Tahu Untuk Pengembangan Panduan Praktikum Perubahan Lingkungan Kelas X/Fase E. *Biolova* 7 (1). 10-28.

Tahu adalah produk makanan yang terbuat dari kedelai dan sering dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia sebagai salah satu sumber protein (Dewi et al., 2023). Tahu juga merupakan satu bahan makanan yang banyak digemari oleh masyarakat Indonesia dari baik dari kalangan bawah, menengah, hingga kalangan atas (Pribadi, 2021). Konsumsi tahu di Indonesia pada tahun 2021 mencapai 7,86kg/kapita dan diperkirakan akan mengalami peningkatan menjadi 7,95 kg/kapita pada tahun 2023 (Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian & Sekretariat Jenderal Kementerian Pertanian, 2021).

Tingginya jumlah konsumsi tahu di Indonesia tentunya juga akan berbanding lurus dengan produksi yang dilakukan. Proses pembuatan tahu menghasilkan limbah cair yang jika tidak dikelola dengan baik, dapat menyebabkan pencemaran lingkungan (Nadya et al., 2020). Limbah cair tahu umumnya mengandung COD sebesar 7.500-14.000 mg/L, TSS sebesar 638-660 mg/L dan Nitrat (NO₃) sebesar 3,5-4,0 mg/L (Nur et al., 2020). Limbah cair yang mengandung bahan organik dalam jumlah tinggi, jika tidak dikelola dengan baik, dapat menimbulkan berbagai masalah lingkungan yang serius. Pencemaran air adalah salah satu dampak utama yang terjadi akibat pembuangan limbah ini, yang dapat menyebabkan kerusakan ekosistem akuatik dan mengancam kesehatan manusia. Dampak negatif lainnya dari limbah cair yang tidak terkelola adalah munculnya bau tidak sedap yang dapat mengganggu kenyamanan masyarakat sekitar. Selain itu kadar NO₃ yang melebihi 0,2mg/L dapat memicu terjadinya eutrofikasi yang ditandai dengan pertumbuhan alga secara pesat (*blooming algae*) (Nur et al., 2020). Berdasarkan Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku

Mutu Air Limbah telah mengatur baku mutu air limbah hasil pembuatan tahu yaitu BOD sebesar 150 mg/L, COD 300 mg/L, TSS 200 mg/L dan pH sebesar 6-9.

Untuk mengatasi permasalahan yang disebabkan oleh limbah tahu maka diperlukan suatu solusi pengolahan yang mudah dilakukan serta murah sehingga tidak membebani ongkos para pengrajin tahu yang umumnya industri kecil. Penggunaan bakteri indigen yang berasal dari pumakkal merupakan salah satu solusi yang dapat diambil dalam pengolahan limbah cair tahu. Bakteri indigen, atau bakteri indigen, merujuk pada bakteri yang diisolasi dari lingkungan alami tertentu dan hidup secara alamiah di lingkungan tersebut (Ariadi et al., 2022a). Bakteri indigen memiliki potensi dalam berbagai aplikasi, seperti dalam mendegradasi senyawa fisika kimia limbah (Ariadi et al., 2022a).

Bakteri *indigen* dapat mendegradasi limbah cair karena bakteri ini memiliki kemampuan untuk beradaptasi pada lingkungan tertentu dan bersaing dengan bakteri nonendogen (Novianty et al., 2020). Bakteri indigen juga memiliki potensi dalam mendegradasi senyawa fisika kimia limbah, seperti pada limbah cair batik dan tekstil (Ariadi et al., 2022b). Selain itu, bakteri indigen memiliki kemampuan untuk mendegradasi senyawa hidrokarbon untuk keperluan metabolismenya dan sudah teradaptasi dengan berbagai faktor lingkungan di habitat asalnya (Novianty et al., 2020). Kemampuan adaptasi dan kemampuan mendegradasi senyawa fisika kimia ini membuat bakteri indigen menjadi agen bioremediasi yang efektif pada limbah cair (Yanti et al., 2019). Hal ini menunjukkan bahwa bakteri indigen juga dapat berperan dalam mendegradasi limbah cair yang berasal dari industri rumahan, salah satunya

seperti limbah cair tahu (Asril et al., 2019).

Dengan demikian, bakteri indigen memiliki peran yang penting dalam mendegradasi limbah cair tahu karena kemampuan adaptasinya pada lingkungan tertentu, kemampuan mendegradasi senyawa fisika kimia, dan kemampuannya dalam mempengaruhi komposisi mikroba dalam suatu lingkungan. Penelitian yang dilakukan oleh (Ariadi et al., 2022a) menyatakan bahwa bakteri indigen berpengaruh nyata terhadap penurunan parameter pH pada limbah batik yaitu pH dari 6,6 menjadi 6,3. Hasil penelitian juga menunjukkan adanya penurunan parameter kimia air yang meliputi BOD dari 8,49 mg/L menjadi 7,52 mg/L, COD dari 5,52 mg/L menjadi 4,40 mg/L, TSS dari 272 mg/L menjadi 187 mg/L, bahan organik dari 110 mg/L menjadi 91 mg/L dan peningkatan kapasitas oksigen terlarut dari 2,28 mg/L menjadi 3,40 mg/L.

Pencemaran lingkungan yang disebabkan oleh aktivitas manusia seperti industri pembuatan tahu yang tidak mengolah limbahnya dengan baik tentunya akan mengakibatkan dampak negatif serta terjadinya perubahan lingkungan. Untuk itu, pemahaman terkait perubahan lingkungan yang diakibatkan oleh pencemaran tentunya harus dimiliki oleh semua masyarakat terutama para pelajar. Dalam mempelajari masalah pencemaran lingkungan peserta didik tidak hanya dituntut untuk menguasai pemahaman konsep saja akan tetapi juga diperlukan adanya keterampilan proses sehingga peserta didik tidak hanya memahami mengenai konsep pencemaran lingkungan melainkan juga dapat mengatasi permasalahan yang ditimbulkan akibat pencemaran lingkungan melalui kegiatan penyelidikan atau praktikum. Seperti yang tertuang dalam Capaian

Pembelajaran Biologi Fase E pada elemen Pemahaman Biologi Pada akhir fase E, peserta didik memiliki kemampuan menciptakan solusi atas permasalahan-permasalahan berdasarkan isu lokal, nasional atau global terkait perubahan lingkungan. Sedangkan pada elemen keterampilan proses poin 3 dikatakan peserta didik merencanakan penyelidikan ilmiah dan melakukan langkah-langkah operasional berdasarkan referensi yang benar untuk menjawab pertanyaan. Peserta didik melakukan pengukuran atau membandingkan variabel terikat dengan menggunakan alat yang sesuai serta memperhatikan kaidah ilmiah.

METODE

Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimen dengan desain Rancang Acak Lengkap (RAL) dengan tiga perlakuan dan empat kali pengulangan sebagai berikut:

P1 = 0% Pumakkal

P2 = 3% Pumakkal

P3 = 5% Pumakkal

P4 = 7% Pumakkal

Prosedur Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan tahap persiapan, yang melibatkan penyiapan alat dan bahan yang diperlukan untuk pelaksanaan penelitian. Tahap kedua adalah tahap pelaksanaan penelitian, di mana kegiatan penelitian akan dilakukan sesuai dengan rencana yang telah ditetapkan yaitu 1 liter limbah cair tahu di masukan ke dalam bak percobaan, kemudian diberi starter bakteri indigen yang berasal dari pumakkal sesuai dengan perlakuan yang telah ditetapkan yaitu P1 (0% pumakkal), P2 (3% pumakkal), P3 (5% pumakkal) dan P4 sebanyak 7% pumakkal. Pengambilan data pH, BOD, COD, TSS, setelah perlakuan dilakukan pada hari ke-10.

Teknik Analisis Data

Uji hipotesis dilakukan dengan menggunakan statistik parametrik yaing didahului dengan uji prasyarat analisis (Normalitas & Homogenitas) dan selanjutnya uji hipotesis dilakukan dengan *One Wey Anova* dan uji lanjut Duncan.

Validasi Panduan Praktikum

Validasi buku panduan praktikum perubahan lingkungan dilakukan oleh tiga orang ahli yaitu ahli materi, ahli media dan ahli bahasa. Validasi materi yaitu pernyataan mengenai kelayakan materi perubahan lingkungan pada kelas X/Fase E yang di susun dalam buku panduan praktikum. Sedangkan untuk validasi desain berisi pernyataan kelayakan buku panduan praktikum yang dibuat. Validasi bahasa berisi tentang penggunaan bahasa yang sesuai dengan kaidah bahasa Indonesia. Validasi ahli dilakukan dengan menggunakan angket skala linkerd. Kriteria validasi panduan praktikum yaitu sebagai berikut:

$$\text{Nilai Validitas} = \frac{\text{Skor yang diperoleh}}{\text{Skor Maksimal}} \times 100\%$$

Hasil validasi materi dan media kemudian dikategorikan kevalidannya melalui kriteria sebagai berikut:

Tabel 1 Kriteria Kevalidan Panduan Praktikum

Nilai (%)	Kategori
0-20	Sangat Tidak Baik (STB)
21-40	Tidak Baik (TB)
41-60	Cukup Baik (CB)
61-80	Baik (B)
81-100	Sangat Baik (SB)

Sumber: (Rz et al., 2022)

HASIL

Hasil Uji Kadar BOD, COD, TSS dan pH

Penelitian ini dilakukan dengan mengamati tiga patameter yang meliputi BOD, COD, TSS dan pH. Data hasil penelitian disajikan pada tabel berikut:

Tabel 2 Data Hasil Penelitian

Perlakuan	BOD	COD	TSS	pH
P1	225.81	408.44	586.67	4.42
P2	189.52	347.56	458.33	5.02
P3	141.13	220.00	398.33	5.58
P4	126.34	151.89	359.17	5.97

Data hasil penelitian yang ditampilkan pada Tabel 2 memperlihatkan pengaruh berbagai konsentrasi pumakal terhadap beberapa parameter kualitas air limbah cair tahu, yaitu *Biochemical Oxygen Demand* (BOD), *Chemical Oxygen Demand* (COD), *Total Suspended Solids* (TSS), dan pH.

P1 (0% pumakal, kontrol) menunjukkan nilai BOD sebesar 225.81 mg/L, COD sebesar 408.44 mg/L, TSS sebesar 586.67 ppm, dan pH 4.42. perlakuan P2 (3% pumakal) menunjukkan adanya penurunan kadar BOD menjadi 189.52 mg/L, COD turun menjadi 347.56 mg/L, TSS berkurang menjadi 458.33 ppm, dan pH meningkat ke 5.02. Ini menunjukkan bahwa penambahan pumakal 3% sudah mulai mengurangi tingkat pencemaran air. Perlakuan P3 (5% pumakal) menunjukkan penurunan kadar BOD lebih lanjut menjadi 141.13 mg/L, COD menjadi 220.00 mg/L, TSS menurun hingga 398.33 ppm, dan pH meningkat menjadi 5.58. Perlakuan ini menunjukkan bahwa 5% pumakal lebih efektif dibandingkan P2. perlakuan P4 (7% pumakal) menunjukkan bahwa kadar BOD mencapai titik terendah yaitu sebesar 126.34 mg/L, COD menjadi 151.89 mg/L, TSS berkurang menjadi 359.17 ppm, dan pH meningkat hingga 5.97. Ini menunjukkan bahwa penambahan pumakal 7% memberikan hasil terbaik dalam menurunkan pencemaran air. Secara umum, peningkatan konsentrasi pumakal berbanding lurus dengan penurunan nilai BOD, COD, dan TSS, serta peningkatan pH.

Hasil Uji Prasyarat Analisis

Sebelum melakukan analisis statistik parametrik, langkah penting yang perlu dilakukan adalah uji prasyarat analisis, yang mencakup uji normalitas dan uji homogenitas. Uji normalitas bertujuan untuk menentukan apakah data yang diperoleh memiliki distribusi normal, yang merupakan salah satu syarat dalam penerapan uji statistik parametrik. Sementara itu, uji homogenitas bertujuan memastikan bahwa data memiliki varians yang seragam atau setara di antara kelompok perlakuan, sehingga hasil analisis dapat dianggap valid. Dalam penelitian ini, uji normalitas dan homogenitas dilakukan untuk setiap kelompok perlakuan untuk memeriksa distribusi data pada parameter BOD, COD, TSS, dan pH. Berikut adalah hasil dari uji normalitas dan homogenitas yang telah dilakukan.

Tabel 3 Hasil Uji Normalitas

Perlakuan	BOD	COD	TSS	pH	Keterangan
P1	0.200	0.200	0.200	0.167	Normal
P2	0.200	0.200	0.200	0.140	Normal
P3	0.200	0.155	0.200	0.200	Normal
P4	0.200	0.200	0.200	0.117	Normal

Berdasarkan hasil uji normalitas menunjukkan nilai signifikansi pada masing-masing parameter (BOD, COD, TSS, dan pH) pada setiap perlakuan menunjukkan nilai signifikansi $>0,05$ sehingga dapat disimpulkan bahwa data berdistribusi normal.

Tabel 4 Hasil Uji Homogenitas

Parameter	Nilai Sig	Keterangan
BOD	0.112	Homogen
COD	0.348	Homogen
TSS	0.066	Homogen
pH	0.760	Homogen

Berdasarkan hasil uji homogenitas menunjukkan nilai signifikansi pada masing-masing parameter (BOD, COD, TSS, dan pH) pada setiap perlakuan menunjukkan nilai signifikansi $>0,05$ sehingga dapat disimpulkan bahwa data memiliki variasi yang sama atau homogen.

Hasil Uji Hipotesis

Untuk menguji hipotesis dalam penelitian ini, digunakan analisis statistik *One Way Anova*. Analisis ini digunakan untuk mengetahui apakah terdapat perbedaan yang signifikan antara rata-rata beberapa kelompok perlakuan, dalam hal ini kelompok perlakuan dengan konsentrasi pumakal yang berbeda terhadap parameter kualitas limbah cair tahu (BOD, COD, TSS, dan pH). *One Way Anova* dipilih karena penelitian ini melibatkan satu variabel bebas (konsentrasi pumakal) dengan beberapa tingkatan perlakuan (P1, P2, P3, dan P4). Berikut adalah hasil dari uji hipotesis yang telah dilakukan:

Tabel 5 Hasil Uji Hipotesis (*One Way Anova*)

Parameter	Nilai Sig	Keterangan
BOD	0.000	Berpengaruh
COD	0.000	Berpengaruh
TSS	0.000	Berpengaruh
pH	0.000	Berpengaruh

Berdasarkan hasil uji hipotesis menggunakan *One Way ANOVA*, didapatkan nilai signifikansi untuk setiap parameter (BOD, COD, TSS, dan pH) seperti yang disajikan dalam tabel 4.5. Seluruh parameter memiliki nilai signifikansi sebesar 0.000, yang berarti lebih kecil dari nilai batas signifikansi 0.05. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang signifikan antar kelompok perlakuan pada semua parameter yang diuji. Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa variasi konsentrasi pumakal dalam proses

bioremediasi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap semua parameter kualitas air limbah (BOD, COD, TSS, dan pH). Hal ini membuktikan bahwa penggunaan bakteri indigen efektif dalam meningkatkan kualitas air limbah tahu.

Tabel 5 Hasil Uji Lanjut (Duncan)

Perlakuan	BOD	COD	TSS	pH
P1	225.81a	408.44a	586.67a	4.42a
P2	189.52b	347.56b	458.33b	5.02b
P3	141.13c	220.00c	398.33c	5.58c
P4	126.34d	151.89d	359.17d	5.97d

Keterangan: Angka-Angka yang diikuti oleh huruf yang sama artinya tidak berbeda signifikan.

Berdasarkan hasil uji *Duncan* pada perlakuan BOD, COD, TSS, dan pH menunjukkan bahwa setiap perlakuan berbeda secara signifikan satu sama lain pada setiap parameter.

Hasil Validasi Panduan Praktikum

Tabel 6 Hasil Validasi Ahli Media

Aspek Penilaian	Validator		Nilai Total	Presentase	Kriteria
	I	II			
Desain Cover	29	29	58	91	SB
Desain Isi	19	20	39	98	SB
Rata-Rata	24	24.5	48.5	94	SB

Hasil validasi oleh ahli media terhadap buku panduan praktikum menunjukkan bahwa secara keseluruhan, aspek desain cover dan desain isi dinilai sangat baik. Pada aspek desain cover, kedua validator memberikan nilai total sebesar 58 dengan persentase mencapai 91%, yang menunjukkan bahwa desain cover buku panduan dianggap sangat baik oleh para ahli. Pada aspek desain isi, total nilai yang diberikan adalah 39 dengan persentase 98%, menunjukkan bahwa tampilan dan struktur isi buku juga dinilai sangat baik. Secara keseluruhan, rata-rata penilaian kedua validator adalah 94%, dengan nilai rata-rata 48,5, yang mengindikasikan bahwa buku panduan ini memiliki kualitas media yang sangat baik.

Tabel 7 Hasil Validasi Ahli Materi

Aspek Penilaian	Validator		Nilai Total	Presentase	Kriteria
	I	II			
Kelayakan Materi	15	14	29	91%	SB
Konstruksi	11	11	22	92%	SB
Penyajian	7	8	15	94%	SB
Kepraktisan	10	11	21	88%	SB
Kebahasaan	6	6	12	75%	B
Rata-rata	9.8	10	19.8	88%	SB

Hasil validasi oleh ahli materi terhadap buku panduan praktikum menunjukkan bahwa secara umum buku ini dinilai sangat baik pada berbagai aspek penilaian. Pada aspek kelayakan materi, kedua validator memberikan total nilai 29 dengan persentase 91%, yang menandakan bahwa materi yang disajikan dalam buku sangat baik dan layak digunakan. Aspek konstruksi mendapatkan nilai total 22 dengan persentase 92%, menunjukkan bahwa struktur dan penyusunan materi juga sangat baik. Aspek penyajian mendapatkan total nilai 15 dengan persentase 94%, yang berarti materi disajikan dengan sangat baik. Pada aspek kepraktisan, buku ini memperoleh total nilai 21 dengan persentase 88%, menunjukkan bahwa buku ini sangat praktis untuk digunakan. Namun, pada aspek kebahasaan, buku ini mendapat nilai total 12 dengan persentase 75%, yang berada pada kategori baik, meskipun un masih ada ruang untuk perbaikan. Secara keseluruhan, rata-rata penilaian validator adalah 88%, dengan nilai rata-rata 19,8, yang mengindikasikan bahwa buku panduan ini secara umum dinilai sangat baik oleh para ahli materi.

Tabel 8 Hasil Validasi Ahli Materi

Aspek Penilaian	Validator		Nilai Total	Presentase	Kriteria
	I	II			
Kejelasan Bahasa	12	10	22	92%	SB
Kesesuaian Bahasa	11	12	23	96%	SB

Ejaan dan tanda Baca	9	9	18	75%	SB
Keterbacaan	11	12	23	96%	SB
Rata-rata	10.7 5	10.7 5	21. 5	90%	SB

Berdasarkan hasil validasi dari dua ahli bahasa, aspek Kejelasan Bahasa memperoleh nilai total 22 dengan persentase 92%, yang dikategorikan sebagai "Sangat Baik". Hal ini menunjukkan bahwa bahasa yang digunakan dalam materi sudah jelas dan mudah dipahami oleh pembaca. Pada aspek Kesesuaian Istilah, nilai total yang diperoleh adalah 23, dengan persentase 96%, yang juga termasuk kategori "Sangat Baik". Ini menunjukkan bahwa istilah yang digunakan dalam materi sesuai dengan konteks dan mudah dipahami. Aspek Kebahasaan yang meliputi ejaan dan tanda baca memperoleh nilai total 18 dengan persentase 75%, yang masih dalam kategori "Sangat Baik", meskipun terdapat ruang untuk sedikit perbaikan dalam hal ejaan dan tanda baca. Aspek Keterbacaan mendapatkan nilai total 23 dengan persentase 96%, yang berarti materi sangat mudah dibaca dan dipahami. Secara keseluruhan, rata-rata penilaian dari kedua validator adalah 90%, dengan rata-rata nilai sebesar 21,5, yang menunjukkan bahwa kualitas kebahasaan materi ini termasuk dalam kategori "Sangat Baik".

PEMBAHASAN

1. *Biochemical Oxygen Demand (BOD)*

Biochemical Oxygen Demand (BOD) adalah ukuran jumlah oksigen yang diperlukan oleh mikroorganisme untuk menguraikan bahan organik dalam air selama periode tertentu. BOD sering digunakan sebagai indikator tingkat pencemaran organik dalam air, di mana nilai BOD yang tinggi menunjukkan adanya konsentrasi bahan organik yang

tinggi yang dapat terurai oleh mikroorganisme. Dengan kata lain, semakin tinggi nilai BOD, semakin banyak oksigen yang dibutuhkan untuk proses dekomposisi, yang menunjukkan bahwa air tersebut mengandung lebih banyak polutan biodegradabel (Vigiak et al., 2019).

Tingginya kadar BOD pada perairan dapat menimbulkan berbagai permasalahan bagi lingkungan seperti dapat menyebabkan penurunan kadar oksigen terlarut (DO) dalam badan air. Hal ini terjadi karena mikroorganisme yang menguraikan bahan organik menggunakan oksigen yang tersedia, sehingga mengurangi jumlah oksigen yang dapat digunakan oleh organisme akuatik lainnya, seperti ikan dan invertebrata (Vigiak et al., 2019). Penurunan kadar DO dapat menyebabkan stres pada organisme akuatik dan bahkan kematian massal, yang berkontribusi pada penurunan keanekaragaman hayati (Tsilo et al., 2022).

Selain itu, kondisi anaerobik dapat terbentuk akibat tingginya BOD, yang dapat menyebabkan pembentukan senyawa berbahaya seperti gas metana dan hidrogen sulfida. Gas-gas ini tidak hanya berbahaya bagi kehidupan akuatik, tetapi juga dapat menyebabkan bau yang tidak sedap dan mencemari udara di sekitar badan air tersebut (Tsilo et al., 2022). Selain itu, akumulasi bahan organik yang tidak terurai dapat menyebabkan eutrofikasi, di mana peningkatan nutrisi, terutama nitrogen dan fosfor, menyebabkan pertumbuhan alga yang berlebihan. Pertumbuhan alga ini dapat menghalangi sinar matahari dan mengganggu fotosintesis, serta saat alga mati dan terurai, proses ini akan lebih lanjut mengurangi kadar oksigen dalam air (Wen et al., 2017).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bakteri indigen dalam proses bioremediasi limbah cair

tahu menunjukkan kadar BOD terendah terjadi pada perlakuan P4 dengan pemberian 7% Pumakkal sebagai sumber bakteri indigen dengan kadar BOD sebesar 126,34 mg/L dan selanjutnya diikuti oleh perlakuan P3 sebesar 141,13 mg/L, P2 sebesar 189,52 mg/L, dan pada perlakuan P1 (kontrol) tanpa pemberian Pumakkal menunjukkan kadar BOD paling tinggi yaitu sebesar 225,81 mg/L.

Penggunaan Pumakkal sebagai sumber bakteri indigen pada konsentrasi 5% sudah menunjukkan efektivitasnya dalam menurunkan kadar BOD dengan hasil terbaik ditunjukkan oleh perlakuan P4 penggunaan 7% Pumakkal dan telah hasil ini telah sesuai dengan baku mutu yang telah ditetapkan oleh Menteri Lingkungan Hidup melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah yang Menyatakan Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Atau Kegiatan Pengolahan Kedelai (Tahu) pada parameter BOD sebesar 150 mg/L. Sedangkan pada perlakuan P1 (0% Pumakkal) dan P2 (3% Pumakkal) tidak efektif hal ini dikarenakan kadar BOD masih melampaui baku mutu yang telah ditetapkan. Rendahnya kadar BOD pada P4 dan P5 berbanding lurus dengan semakin banyaknya jumlah Pumakkal yang digunakan hal ini juga terjadi pada perlakuan P1 dan P2 dengan jumlah penggunaan Pumakkal yang lebih sedikit menunjukkan kurangnya efektivitas dalam menurunkan jumlah polutan pada air limbah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan bakteri indigen efektif dalam merunkan kadar BOD pada limbah cair tahu. Hal ini juga selaras dengan hasil uji hipotesis yang menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,000 yang artinya terdapat pengaruh nyata penggunaan bakteri indigen

terhadap penurunan kadar BOD pada limbah cair tahu. Hasil uji *Duncan* juga menyatakan bahwa perlakuan yang berbeda mempengaruhi kadar BOD, dengan perlakuan P1 menghasilkan nilai BOD tertinggi dan perlakuan P4 menghasilkan nilai terendah.

Penurunan kadar BOD pada perlakuan P2, P3, dan P4 disebabkan oleh proses biodegradasi yang dilakukan oleh beberapa jenis bakteri seperti *Acinobacter* sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Aczotobacter* sp., bakteri lipolitik, dan bakteri protolitik. *Acinetobacter* sp. dan *Pseudomonas* sp. dikenal sebagai bakteri yang efektif dalam menguraikan senyawa organik kompleks. Bakteri ini dapat memanfaatkan bahan organik sebagai sumber energi dan karbon, yang pada gilirannya mengurangi kadar BOD dalam limbah cair. Penelitian yang dilakukan oleh (Banin et al., 2021) menunjukkan bahwa *Acinetobacter baumannii*, mampu mengurangi BOD dalam limbah cair industri dengan menguraikan senyawa organik yang ada. *Pseudomonas* sp. juga berperan dalam proses biodegradasi, di mana bakteri ini dapat menguraikan senyawa beracun dan mengubahnya menjadi bentuk yang lebih sederhana yang lebih mudah dikelola oleh mikroorganisme lain (Banin et al., 2021).

Bacillus sp. bekerja dengan cara memproduksi enzim yang dapat menghidrolisis lemak dan protein dalam limbah cair tahu. Enzim lipolitik yang dihasilkan oleh *Bacillus* sp. dapat menguraikan lipid menjadi asam lemak dan gliserol, sedangkan enzim proteolitik menguraikan protein menjadi asam amino. Proses ini tidak hanya menurunkan BOD tetapi juga meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi mikroorganisme lain yang berperan dalam proses pengolahan limbah. Selain itu, *Bacillus* sp. juga dapat berfungsi dalam meningkatkan kualitas air dengan mengurangi senyawa

berbahaya yang dapat mempengaruhi kehidupan akuatik (Banin et al., 2021).

Azotobacter sp. berkontribusi dalam membantu proses pengolahan limbah dengan mengurangi kadar amonia, yang sering kali berkontribusi pada peningkatan BOD. Bakteri ini juga dapat berfungsi dalam meningkatkan aktivitas mikroorganisme lain yang terlibat dalam proses biodegradasi (Astuti & Rosemalia, 2022).

2. Chemical Oxygen Demand (COD)

Chemical Oxygen Demand (COD) adalah parameter penting dalam pengukuran kualitas air yang menunjukkan jumlah oksigen yang diperlukan untuk mengoksidasi bahan organik dalam air. COD sering digunakan sebagai indikator pencemaran air, karena semakin tinggi nilai COD, semakin banyak bahan organik yang terlarut dalam air, yang dapat berasal dari limbah industri, limbah domestik, dan aktivitas pertanian (Destiarti, 2018; F. Nur et al., 2020). Dalam konteks pengolahan limbah, pengurangan COD menjadi salah satu tujuan utama untuk memenuhi standar baku mutu air yang ditetapkan oleh pemerintah, seperti yang diatur dalam Peraturan Menteri Lingkungan Hidup No.5 Tahun 2014 (Destiarti, 2018).

Dampak negatif dari tingginya nilai COD terhadap lingkungan sangat signifikan. Limbah dengan COD tinggi dapat menyebabkan penurunan kualitas air, yang berdampak pada kehidupan akuatik. Organisme perairan, seperti ikan dan mikroba, memerlukan oksigen terlarut untuk bertahan hidup. Ketika COD meningkat, oksigen terlarut dalam air berkurang, menyebabkan stres atau kematian pada organisme tersebut (Herman et al., 2023; Hutabarat et al., 2022). Selain itu, limbah yang mengandung COD tinggi dapat menciptakan kondisi anaerobik, yang

berpotensi menghasilkan gas berbahaya seperti metana dan hidrogen sulfida, yang dapat mencemari udara dan menyebabkan masalah kesehatan bagi manusia (Dinar Pramestie et al., 2023).

Hasil penelitian menunjukkan bahwa uji laboratorium terhadap kadar *Chemical Oxygen Demand* (COD) limbah cair tahu pada perlakuan P1 menunjukkan rata-rata kadar COD tertinggi yaitu sebesar 408.44 mg/L, sedangkan pada perlakuan P2, P3, dan P4 dengan pemberian pumakkal sebagai sumber bakteri indigen menunjukkan adanya penurunan kadar COD sebagaimana yang ditampilkan pada Tabel 4.1 dan 4.2.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pada perlakuan P4 dengan pemberian 7% Pumakkal memperlihatkan hasil terbaik yaitu dengan kadar COD sebesar 151.84 mg/L. Yang selanjutnya diikuti oleh perlakuan P3 dengan kadar COD sebesar 220 mg/L, dan P2 sebesar 347,56 mg/L. Dan P1 dengan yang menunjukkan kadar COD paling tinggi yaitu sebesar 408.44 mg/L. Hal ini menunjukkan bahwa penggunaan pumakkal efektif dalam menurunkan kadar COD limbah cair tahu.

Penggunaan Pumakkal sebagai sumber bakteri indigen pada konsentrasi 5% sudah menunjukkan efektivitasnya dalam menurunkan kadar COD dengan hasil terbaik ditunjukkan oleh perlakuan P4 penggunaan 7% Pumakkal dan telah hasil ini telah sesuai dengan baku mutu yang telah ditetapkan oleh Menteri Lingkungan Hidup melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah yang Menyatakan Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Atau Kegiatan Pengolahan Kedelai (Tahu) pada parameter COD sebesar 300 mg/L. Sedangkan pada perlakuan P1 (0% Pumakkal) dan P2 (3% Pumakkal) tidak efektif hal ini dikarenakan kadar COD masih

melampaui baku mutu yang telah ditetapkan. Rendahnya kadar COD pada P4 dan P5 berbanding lurus dengan semakin banyaknya jumlah Pumakkal yang digunakan hal ini juga terjadi pada perlakuan P1 dan P2 dengan jumlah penggunaan Pumakkal yang lebih sedikit menunjukkan kurangnya efektivitas dalam menurunkan jumlah polutan pada air limbah.

Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan bakteri indigen efektif dalam merunkan kadar COD pada limbah cair tahu. Hal ini juga selaras dengan hasil uji hipotesis yang menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,000 yang artinya terdapat pengaruh nyata penggunaan bakteri indigen terhadap penurunan kadar COD pada limbah cair tahu. Hasil uji *Duncan* juga menyatakan bahwa perlakuan yang berbeda mempengaruhi kadar COD, dengan perlakuan P1 menghasilkan nilai COD tertinggi dan perlakuan P4 menghasilkan nilai terendah.

Penurunan kadar COD pada limbah cair tahu disebabkan oleh bakteri indigen yang terdapat pada Pumakkal. Pumakkal mengandung berbagai jenis mikroorganisme diantaranya yaitu *Acinobacter* sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., *Azotobacter* sp., bakteri penambat N, bakteri pelarut P, bakteri lipolitik, dan bakteri protolitik.

Acinetobacter sp. dikenal sebagai bakteri yang efektif dalam mengurangi kadar COD, terutama dalam limbah industri. *Acinetobacter* sp. dapat mengakumulasi logam berat dan mengurangi konsentrasi senyawa organik dalam limbah cair, sehingga berkontribusi pada penurunan COD Selain itu, *Pseudomonas* sp. juga memiliki kemampuan untuk menguraikan senyawa organik kompleks dan berfungsi sebagai bakteri pelarut fosfat, yang membantu dalam meningkatkan kualitas air dengan mengurangi beban organik (Banin et al., 2021).

Bacillus sp. dan *Azotobacter* sp. berperan dalam proses bioremediasi dengan memanfaatkan enzim-enzim yang dihasilkan untuk menghidrolisis senyawa organik. *Bacillus* sp. dapat memproduksi enzim lipolitik yang menguraikan lemak menjadi asam lemak dan gliserol, sedangkan *Azotobacter* sp. berfungsi dalam penambahan nitrogen, yang dapat meningkatkan kesuburan tanah dan kualitas air (Khairani & Manalu, 2023; Oktavia & Wibowo, 2017). Penelitian menunjukkan bahwa konsorsium bakteri yang melibatkan *Bacillus* dan *Pseudomonas* dapat meningkatkan efisiensi pengolahan limbah dengan sinergi dalam penguraian bahan organik (Banin et al., 2021).

Bakteri lipolitik dan proteolitik juga berkontribusi signifikan dalam menurunkan kadar COD. Bakteri lipolitik, seperti yang diisolasi dari limbah cair kelapa sawit, mampu menghidrolisis lipid menjadi senyawa yang lebih sederhana, sehingga mengurangi beban COD (Khairani, 2023; Oktavia & Wibowo, 2017). Sementara itu, bakteri proteolitik berfungsi untuk menguraikan protein menjadi asam amino, yang juga berkontribusi pada penurunan COD dalam limbah yang kaya akan protein, seperti limbah dari industri pengolahan ikan (Choirunnisa et al., 2018).

3. Total Suspended Solids (TSS)

Total Suspended Solids (TSS) adalah parameter yang mengukur jumlah partikel padat yang terjebak dalam air, yang tidak dapat disaring melalui filter dengan ukuran pori 0,45 mikron. TSS mencakup berbagai jenis material, termasuk lumpur, pasir, dan mikroorganisme, yang dapat berasal dari berbagai sumber, seperti erosi tanah, limbah industri, dan limbah domestik (Akhrianti et al., 2023). TSS sering digunakan sebagai indikator kualitas air, di mana nilai tinggi

menunjukkan adanya pencemaran yang dapat mempengaruhi ekosistem akuatik.

Dampak negatif dari kadar TSS yang tinggi dalam air limbah sangat signifikan bagi lingkungan. Pertama, tingginya TSS dapat menyebabkan penurunan kualitas air dengan mengurangi transparansi. Partikel-partikel padat yang terlarut dalam air menghalangi penetrasi cahaya, yang sangat penting bagi fotosintesis organisme akuatik seperti fitoplankton dan vegetasi akuatik yang terbenam. Penurunan fotosintesis dapat mengganggu rantai makanan akuatik dan mengurangi produksi oksigen dalam air, yang pada gilirannya dapat mempengaruhi kehidupan ikan dan organisme lainnya (DeLuca et al., 2018).

Selain itu, TSS yang tinggi dapat menyebabkan sedimentasi yang berlebihan di dasar badan air, yang dapat mengubah habitat alami bagi organisme. Sedimentasi ini dapat mengubur tempat tinggal organisme, mengurangi keanekaragaman hayati, dan mengganggu proses ekologi yang penting (Muchanga & Sichingabula, 2021) Selain itu, partikel-partikel yang terlarut sering kali membawa polutan berbahaya, seperti logam berat dan pestisida, yang dapat terakumulasi dalam rantai makanan dan berdampak negatif pada kesehatan manusia dan hewan (Moeini et al., 2021).

Tingginya kadar Total Suspended Solids (TSS) pada limbah cair industri tahu disebabkan oleh beberapa faktor yang berkaitan dengan proses produksi tahu itu sendiri. Limbah cair yang dihasilkan dari industri tahu mengandung berbagai zat organik dan padatan tersuspensi yang berasal dari bahan baku dan proses pengolahan.

Pertama, limbah cair tahu mengandung bahan organik yang tinggi, termasuk protein, karbohidrat, dan lemak (Pradana et al., 2018).

Ketika kedelai, yang merupakan bahan baku utama, diproses untuk membuat tahu, banyak partikel halus yang terlepas ke dalam air, yang berkontribusi pada peningkatan kadar TSS. Selain itu, proses pencucian dan perebusan kedelai juga menghasilkan limbah cair yang kaya akan padatan tersuspensi (Restuaji & Oktavia, 2020; Subuharni et al., 2023).

Kedua, proses produksi tahu yang melibatkan penyaringan dan pengendapan juga menghasilkan limbah padat yang dapat meningkatkan kadar TSS dalam limbah cair. Limbah padat ini sering kali tidak sepenuhnya terpisah dari limbah cair, sehingga menyebabkan konsentrasi TSS yang tinggi (Ruhmawati et al., 2017). Selain itu, limbah cair yang dihasilkan dari proses ini sering kali tidak diolah dengan baik sebelum dibuang, sehingga meningkatkan risiko pencemaran lingkungan (Pangestu et al., 2021).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pada perlakuan P1 tanpa pemberian Pumakkal pada limbah cair tahu menunjukkan kadar TSS yang sangat tinggi yaitu mencapai 586,67 ppm sedangkan pada perlakuan dengan pemberian Pumakkal menunjukkan adanya penurunan kadar TSS seperti pada P2 dengan kadar TSS sebesar 458,33 ppm, P3 sebesar 398,33 dan hasil terendah ditunjukkan oleh perlakuan p4 dengan kadar TSS sebesar 359,17 ppm.

Pada parameter TSS belum sesuai dengan baku mutu akan tetapi telah mendekati baku mutu yang telah ditetapkan oleh Menteri Lingkungan Hidup melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014 Tentang Baku Mutu Air Limbah Menyaratkan Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Atau Kegiatan Pengolahan Kedelai (Tahu) pada parameter TSS sebesar 200 mg/L. Masih tingginya kadar TSS disebabkan

karena banyaknya suspensi atau partikel yang terdapat limbah cair tahu sehingga bakteri indigen tidak dapat menguraikannya secara maksimal.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan Pumakkal dalam proses bioremediasi limbah cair tahu efektif menurunkan kadar TSS hal ini juga sesuai dengan hasil uji hipotesis yang menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,000 yang artinya terdapat pengaruh nyata penggunaan Pumakkal terhadap penurunan Kadar TSS. Hasil uji *Duncan* juga menyatakan bahwa perlakuan yang berbeda memberikan efek yang nyata pada nilai TSS. Perlakuan P1 menghasilkan nilai TSS tertinggi, sedangkan P4 menghasilkan nilai terendah.

Penurunan kadar TSS pada limbah cair tahu disebabkan karena adanya bakteri indigen pada Pumakkal seperti *Acinetobacter* sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., dan *Azotobacter* sp. memiliki peran penting dalam menurunkan kadar Total Suspended Solids (TSS) pada limbah cair tahu. Proses pengolahan limbah cair dengan menggunakan bakteri ini melibatkan berbagai mekanisme yang berkontribusi pada penurunan TSS, yang merupakan indikator pencemaran organik dalam air.

Acinetobacter sp. dan *Pseudomonas* sp. Kedua jenis bakteri ini dikenal sebagai mikroorganisme yang mampu menguraikan senyawa organik kompleks dalam limbah cair. *Pseudomonas* sp. telah terbukti efektif dalam mengurangi TSS pada limbah cair, termasuk limbah dari industri bir dan tahu (Oljira et al., 2018). Mekanisme yang digunakan oleh *Pseudomonas* sp. meliputi produksi enzim yang dapat memecah partikel-partikel padat menjadi bentuk yang lebih sederhana, sehingga memudahkan penguraian oleh mikroorganisme lain. *Acinetobacter* sp. juga berfungsi dengan cara yang

sama, dimana mereka dapat mengakumulasi dan menguraikan bahan organik yang menyumbat sistem pengolahan limbah (Anggraeni et al., 2014).

Bacillus sp. berfungsi dengan memproduksi enzim lipolitik dan proteolitik yang dapat menghidrolisis lemak dan protein dalam limbah cair tahu. Proses ini tidak hanya mengurangi TSS tetapi juga meningkatkan ketersediaan nutrisi bagi mikroorganisme lain yang berperan dalam proses biodegradasi. *Bacillus* sp. dapat membantu dalam mengurangi jumlah partikel padat dengan menguraikan lemak dan protein menjadi asam lemak dan asam amino, yang lebih mudah dikelola oleh mikroorganisme lain (Retno Ken R, 2019).

Azotobacter sp. berkontribusi dalam proses pengolahan limbah dengan mengurangi kadar amonia dan senyawa nitrogen lain yang sering kali berkontribusi pada peningkatan TSS. Dengan mengurangi senyawa nitrogen, *Azotobacter* sp. juga membantu dalam mengurangi pertumbuhan mikroorganisme yang dapat menyebabkan peningkatan TSS.

Bakteri lipolitik berfungsi untuk menguraikan lemak menjadi asam lemak dan gliserol, sedangkan bakteri proteolitik menguraikan protein menjadi asam amino. Kedua jenis bakteri ini sangat penting dalam menurunkan kadar TSS pada limbah cair tahu yang kaya akan lemak dan protein. Dengan menghidrolisis senyawa-senyawa ini, bakteri lipolitik dan proteolitik membantu mengurangi jumlah partikel padat yang tersuspensi dalam air (Sopiah et al., 2022).

4. Keasaman (pH)

pH adalah ukuran konsentrasi ion hidrogen dalam suatu larutan, yang menunjukkan sifat asam atau basa dari larutan tersebut. Skala pH berkisar dari

0 hingga 14, di mana pH 7 dianggap netral, pH di bawah 7 menunjukkan sifat asam, dan pH di atas 7 menunjukkan sifat basa. Dalam konteks perairan, pH sangat penting karena dapat mempengaruhi berbagai aspek ekosistem akuatik, termasuk kelangsungan hidup organisme, reaksi kimia dalam air, dan ketersediaan nutrisi (Mantayborbir et al., 2023; Rahmanto et al., 2020).

Ketika pH air terlalu rendah (asam), dapat menyebabkan stres pada organisme akuatik, mengurangi kelangsungan hidup ikan, dan mempengaruhi proses biogeokimia di dalam ekosistem. Misalnya, pH rendah dapat meningkatkan kelarutan logam berat, yang berpotensi beracun bagi kehidupan akuatik (Mantayborbir et al., 2023). Sebaliknya, pH yang terlalu tinggi (basa) dapat mengganggu keseimbangan ion dalam tubuh organisme, mengurangi ketersediaan nutrisi, dan mempengaruhi pertumbuhan phytoplankton yang merupakan dasar rantai makanan di ekosistem perairan (Rahmanto et al., 2020).

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pada perlakuan P1 tanpa pemberian Pumakkal pada limbah cair tahu menunjukkan nilai pH yang cukup rendah atau dalam kategori asam yaitu sebesar 4,42 sedangkan pada perlakuan dengan pemberian Pumakkal menunjukkan adanya peningkatan nilai pH kearah netral seperti pada P2 dengan nilai pH sebesar 5,02, P3 sebesar 5,58 dan hasil terbaik ditunjukkan oleh perlakuan P4 dengan nilai pH rata-rata sebesar 5,97.

Penggunaan Pada parameter pH belum sesuai dengan baku mutu akan tetapi telah mendekati baku mutu yang telah ditetapkan oleh Menteri Lingkungan Hidup melalui Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2014

Tentang Baku Mutu Air Limbah Menyaratkan Baku Mutu Air Limbah Bagi Usaha Atau Kegiatan Pengolahan Kedelai (Tahu) pada parameter pH sebesar 6-9.

Hasil ini menunjukkan bahwa penggunaan Pumakkal dalam proses bioremediasi limbah cair tahu efektif dalam menetralkan pH air, hal ini juga sesuai dengan hasil uji hipotesis yang menunjukkan nilai signifikansi sebesar 0,000 yang artinya terdapat pengaruh nyata penggunaan Pumakkal terhadap perbaikan nilai pH. Hasil uji Duncan menyatakan bahwa perlakuan P1 menghasilkan nilai pH terendah, sedangkan P4 menghasilkan nilai tertinggi.

Penurunan nilai pH pada limbah cair tahu disebabkan karena adanya aktivitas bakteri indigen yang bersumber dari Pumakkal seperti *Acinetobacter* sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., dan *Azotobacter* sp.

Acinetobacter sp., *Pseudomonas* sp., *Bacillus* sp., dan *Azotobacter* sp. merupakan mikroorganisme yang memiliki peran penting dalam pengolahan limbah cair tahu, terutama dalam memperbaiki nilai pH dan kualitas air limbah tersebut. Limbah cair tahu sering kali memiliki pH yang rendah akibat dari proses produksi yang menghasilkan asam organik. Oleh karena itu, penggunaan mikroorganisme ini dapat membantu dalam menetralkan pH dan mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan.

Acinetobacter sp. mikroorganisme ini dikenal memiliki kemampuan untuk mendegradasi senyawa organik kompleks dalam limbah cair. *Acinetobacter* sp. dapat berfungsi sebagai agen bioremediasi dengan memanfaatkan senyawa organik sebagai sumber karbon, yang pada gilirannya dapat meningkatkan pH melalui proses dekomposisi yang menghasilkan produk-produk basa. Penelitian yang dilakukan oleh (Retno

Ken R, 2019) menunjukkan bahwa *Acinetobacter* sp. dapat beradaptasi dengan baik dalam lingkungan limbah cair, sehingga meningkatkan efisiensi pengolahan limbah.

Pseudomonas sp. memiliki kemampuan untuk menguraikan berbagai senyawa organik dan berperan dalam proses nitrifikasi, yang dapat meningkatkan pH limbah cair. Proses ini melibatkan konversi amonia menjadi nitrat, yang tidak hanya membantu dalam menetralkan pH tetapi juga mengurangi toksisitas limbah. Selain itu, *Pseudomonas* sp. juga dapat memproduksi senyawa yang bersifat basa selama metabolisme, yang berkontribusi pada peningkatan pH oleh (Retno Ken R, 2019).

Bacillus sp. dikenal sebagai bakteri penghasil enzim yang dapat memecah protein dan senyawa organik lainnya dalam limbah cair. Proses ini tidak hanya mengurangi kandungan BOD (*Biochemical Oxygen Demand*) tetapi juga dapat menghasilkan senyawa basa yang membantu menetralkan pH (Retno Ken R, 2019). *Bacillus* sp. juga berperan dalam proses fermentasi yang dapat menghasilkan asam organik, tetapi dalam kondisi tertentu, mereka dapat beradaptasi untuk menghasilkan produk yang lebih netral atau basa.

Azotobacter sp. mikroorganisme ini berfungsi sebagai pengikat nitrogen dan dapat meningkatkan kesuburan tanah serta kualitas air. *Azotobacter* sp. dapat berkontribusi pada peningkatan pH melalui proses fiksasi nitrogen yang menghasilkan senyawa basa. Selain itu, *Azotobacter* sp. juga dapat menguraikan senyawa organik dalam limbah cair, yang berkontribusi pada penurunan kadar asam dan peningkatan pH.

5. Pengembangan Pandauan Praktikum

Hasil penelitian ini tentunya akan memberikan kontribusi terhadap

bidang pengolahan limbah khususnya pengolahan limbah cair selain memiliki kontribusi dalam bidang pengolahan limbah penelitian ini juga memberikan kontribusi pada bidang pendidikan hal ini dikarenakan penelitian ini merupakan salah satu penerapan bioteknologi sederhana yang memanfaatkan mikroorganisme dalam pengolahan limbah cair tahu. Rangkaian proses penelitian ini tidak hanya menonjolkan pemahaman konsep semata melainkan juga adanya implementasi keterampilan proses yang tentunya sangat dibutuhkan oleh peserta didik sehingga hasil penelitian ini juga akan digunakan dalam penyusunan panduan praktikum bioteknologi khususnya dalam pada materi perubahan lingkungan.

Hasil penelitian ini dapat memberikan kontribusi pada bidang pendidikan khususnya pada jenjang SMA untuk Fase E pada materi Bioteknologi. Metode penelitian yang digunakan terkait bioremediasi relevan dengan materi perubahan lingkungan dengan Capaian Pembelajaran (CP) pada elemen Keterampilan Proses poin 3 Merencanakan dan Melakukan Penyelidikan “Peserta didik merencanakan penyelidikan ilmiah dan melakukan langkah-langkah operasional berdasarkan referensi yang benar untuk menjawab pertanyaan. Peserta didik melakukan pengukuran atau membandingkan variabel terikat dengan menggunakan alat yang sesuai serta memperhatikan kaidah ilmiah”. Luaran dari penelitian ini yaitu buku panduan praktikum perubahan lingkungan Bioremediasi limbah cair tahu.

Panduan praktikum yang telah divalidasi oleh 2 orang ahli materi dan 2 orang ahli media mendapatkan masukan diantaranya yaitu pada bagian cover sebaiknya dituliskan jenjang kelas Kelas X/Fase E ini juga

disesuaikan dengan istilah yang digunakan dalam kurikulum merdeka. Selain pada sisi desain cover masukan juga diberikan untuk isi yaitu materi yang disajikan perlu ditambahkan serta memperbaiki kalimat-kalimat yang typo.

Validasi panduan praktikum perubahan lingkungan yang dilakukan oleh ahli media (Tabel 4.10) dan ahli materi (Tabel 4.11). Hasil validasi yang telah dilakukan oleh ahli media pada aspek desain cover sebesar 91% dan desain isi sebesar 98% dengan nilai rata-rata sebesar 94%% sehingga masuk kedalam kriteria sangat baik, dengan demikian artinya panduan praktikum yang disusun valid dan dapat digunakan sebagai panduan praktikum Perubahan Lingkungan kelas X hal ini sesuai dengan pernyataan dari (Purba et al., 2023; Rz et al., 2022b) yang mengatakan bahwa validasi media dengan rentang nilai sebesar 84-100% tergolong dalam kriteria tinggi.

Validasi materi yang telah dilakukan oleh 2 orang ahli materi meliputi aspek kelayakan materi dengan nilai sebesar 91%, konstruksi 92%, penyajian sebesar 94%, kebahasaan 75% dan kepraktisan sebesar 75% dengan nilai rata-rata sebesar 88%, dengan demikian artinya panduan praktikum pada aspek materi yang disusun valid dan dapat digunakan sebagai panduan praktikum hal ini sesuai dengan pernyataan dari (Purba et al., 2023; Rz et al., 2022b) yang mengatakan bahwa validasi media dengan rentang nilai sebesar 84-100% tergolong dalam kriteria tinggi.

Berdasarkan hasil validasi dari dua ahli bahasa, aspek Kejelasan Bahasa memperoleh nilai total 22 dengan persentase 92%, yang dikategorikan sebagai "Sangat Baik". Hal ini menunjukkan bahwa bahasa yang digunakan dalam materi sudah jelas dan mudah dipahami oleh

pembaca. Pada aspek Kesesuaian Istilah, nilai total yang diperoleh adalah 23, dengan persentase 96%, yang juga termasuk kategori "Sangat Baik". Ini menunjukkan bahwa istilah yang digunakan dalam materi sesuai dengan konteks dan mudah dipahami. Aspek Kebahasaan yang meliputi ejaan dan tanda baca memperoleh nilai total 18 dengan persentase 75%, yang masih dalam kategori "Sangat Baik", meskipun terdapat ruang untuk sedikit perbaikan dalam hal ejaan dan tanda baca. Aspek Keterbacaan mendapatkan nilai total 23 dengan persentase 96%, yang berarti materi sangat mudah dibaca dan dipahami. Secara keseluruhan, rata-rata penilaian dari kedua validator adalah 90%, dengan rata-rata nilai sebesar 21,5, yang menunjukkan bahwa kualitas kebahasaan materi ini termasuk dalam kategori "Sangat Baik".

Hasil validasi yang telah dilakukan oleh ahli media, ahli materi dan ahli bahasa menyatakan bahwa panduan praktikum perubahan lingkungan yang disusun valid dengan kriteria sangat baik sehingga dikatakan bahwa panduan praktikum tersebut telah layak dan dapat digunakan oleh peserta didik dalam melaksanakan praktikum perubahan lingkungan. Panduan praktikum ini dinyatakan layak dengan kriteria sangat baik dikarenakan dalam penyusunannya telah mencakup adanya judul praktikum, tujuan, materi, alat dan bahan, prosedur praktikum, tabel pengamatan, serta adanya persoalan yang disajikan agar peserta didik dapat mencapai tujuan praktikum. Dengan adanya komponen-komponen tersebut maka panduan praktikum yang telah disusun dapat digunakan oleh peserta didik dalam melakukan suatu uji coba secara nyata serta dapat menunjang kemandirian peserta didik dalam melaksanakan praktikum. Hal ini

sesuai dengan pernyataan dari (Purba et al., 2023) yang mengatakan bahwa panduan praktikum merupakan pedoman yang terdiri dari judul praktikum, tujuan, dasar teori, perlengkapan, dan persoalan yang mengarah pada tujuan dan mengikuti kaidah ilmiah.

Penggunaan panduan praktikum perubahan lingkungan tidak hanya menitik beratkan pada aspek psikomotorik saja melainkan juga dapat mencakup aspek Kognitif dan afektif, hal ini dikarenakan di dalam panduan praktikum juga berisi materi, langkah kerja serta penyelesaian laporan hasil eksperimen yang dilakukan secara bersama. Dengan demikian materi yang disajikan di dalam panduan praktikum dapat memberikan pengetahuan untuk memberikan pemahaman peserta didik terkait topik praktikum yang akan dilakukan sehingga ini dapat memberikan kontribusi pada aspek kognitif peserta didik. Sedangkan untuk aspek afektif dan psikomotorik akan muncul pada saat peserta didik melaksanakan praktikum hal ini dikarenakan kegiatan praktikum akan mengarahkan peserta didik untuk melakukan kerja ilmiah yang tentunya akan menstimulasi mereka untuk mencapai proses. Praktikum ini juga didesain untuk dikerjakan secara berkelompok sehingga akan melatih sikap peserta didik seperti bekerja sama dan dapat menghargai pendapat orang lain.

Kegiatan praktikum perubahan lingkungan selain dapat melatih kemampuan pada aspek kognitif, afektif dan psikomotorik juga dapat mencerminkan profil pelajar pancasila diantaranya yaitu gotong royong, berpikir kritis, dan kreatif. Dari aspek gotong royong akan terlihat pada saat melaksanakan praktikum yang dilakukan secara berkelompok dimana peserta didik secara bersama-sama

akan mengumpulkan alat dan bahan serta melaksanakan kerja ilmiah secara bersama. Praktikum perubahan lingkungan juga dapat melatih kemampuan berpikir kritis dan kreatif peserta didik hal ini dikarenakan peserta didik akan dilatih untuk mengolah limbah cair dengan menggunakan bakteri indigen. Di sisi lain setelah pelaksanaan praktikum peserta didik juga diminta untuk membuat laporan mengenai penyebab terjadinya perubahan pada limbah cair yang telah mengalami proses remediasi dengan bakteri indigen dengan demikian maka dapat menstimulus peserta didik untuk berpikir kritis.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa 1) Penggunaan bakteri indigen memberikan pengaruh nyata terhadap mortalitas hama walang sangit dengan hasil uji hipotesis menunjukkan nilai signifikan sebesar 0,000 pada parameter BOD, COD, TSS dan pH. 2) Konsentrasi pumakkal sebagai sumber bakteri indigen paling efektif penurunan kadar BOD, COD, TSS dan peningkatan nilai pH yaitu pada perlakuan P4 dengan konsentrasi 7% menunjukkan kadar BOD sebesar 126,34 mg/L, COD sebesar 151,89 mg/L, TSS sebesar 359,17 ppm, dan pH sebesar 5,97. 3) Hasil validasi ahli media diperoleh nilai rata-rata sebesar 94% dan validasi ahli materi memperoleh nilai rata-rata sebesar 88% sehingga dapat dikatakan bahwa panduan praktikum perubahan lingkungan valid dengan kriteria sangat baik dan dapat digunakan dalam kegiatan praktikum.

SARAN

1. Penggunaan bakteri indigen dalam proses bioremediasi limbah cair tahu terbukti efektif dalam memperbaiki kualitas limbah cair.

Penelitian ini dilakukan masih dalam skala laboratorium sehingga diperlukan penelitian lebih lanjut untuk mengetahui efektivitas penggunaan bakteri indigen sebagai agen bioremediasi dalam skala besar di industri pengolahan tahu.

2. Hasil validasi yang telah dilakukan oleh ahli media, ahli materi dan ahli bahasa menunjukkan hasil bahwa panduan praktikum memiliki kriteria sangat baik dan layak untuk digunakan dalam kegiatan praktikum perubahan lingkungan di sekolah. Akan tetapi dalam penelitian ini pengembangan panduan praktikum baru sebatas pada tahap validasi ahli sehingga perlu dilakukan uji coba secara langsung di sekolah.

DAFTAR RUJUKAN

- Anggraeni, P., Gunam, I., & Kawuri, R. (2014). Potential Bacterial Consortium to Increase the Effectiveness of Beer Wastewater Treatment. *Current World Environment*, 9(2), 312–320. <https://doi.org/10.12944/CWE.9.2.11>
- Ariadi, H., Linayati, L., & Mardiana, T. Y. (2022a). Pengaruh Bakteri Indigenous dalam Degradasi Senyawa Fisika Kimia Limbah Batik dan Tekstil. *JURNAL LITBANG KOTA PEKALONGAN*, 20(2), Article 2. <https://doi.org/10.54911/litbang.v20i2.218>
- Ariadi, H., Linayati, L., & Mardiana, T. Y. (2022b). Pengaruh Bakteri Indigenous dalam Degradasi Senyawa Fisika Kimia Limbah Batik dan Tekstil. *JURNAL LITBANG KOTA PEKALONGAN*, 20(2), Article 2. <https://doi.org/10.54911/litbang.v20i2.218>
- Asril, M., Oktaviani, I., & Leksikowati, S. (2019). Isolasi Bakteri Indigenous dari Limbah Cair Tahu dalam Mendegradasi Protein dan Melarutkan Fosfat. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 20(1). <https://doi.org/10.29122/jtl.v20i1.3132>
- Astuti, D., & Rosemalia, I. (2022). Review: Penurunan BOD (Biological Oxygen Demand) Limbah Cair Domestik dengan Fitoremediasi. *JURNAL UNITEK*, 15(1), Article 1. <https://doi.org/10.52072/unitek.v15i1.299>
- Banin, M. M., Yahya, Y., & Nursyam, H. (2021). Pengolahan limbah cair industri pembekuan ikan kaca piring (Sillago sihama) menggunakan kombinasi bakteri *Acinetobacter baumannii*, *Bacillus megaterium*, *Nitrococcus* sp. Dan *Pseudomonas putida* secara aerob. *Journal of Tropical AgriFood*, 3(1), Article 1. <https://doi.org/10.35941/jtaf.3.1.2021.6119.49-62>
- Choirunnisa, H. N., Sari, R. Y., Hastuti, U. S., & Witjoro, A. W. (2018). Identifikasi dan Uji Kemampuan Hidrolisis pada Bakteri Amilolitik dan Proteolitik yang Diisolasi dari Wadi, Makanan Khas Kalimantan Tengah. *bionature*, 18(2). <https://doi.org/10.35580/bionature.v18i2.6138>
- Dewi, P. S., Ari, I. R. D., & Meidiana, C. (2023). Proses Produksi Tahu di Desa Kalisari Kecamatan Cilongok Kabupaten Banyumas.

- Planning for Urban Region and Environment Journal (PURE)*, 12(1), Article 1.
- Khairani, K., & Manalu, K. (2023). Isolasi dan Identifikasi Bakteri Lipolitik dari Limbah Cair Kelapa Sawit (*Elaeis quineensis* Jacq.). *BIOEDUSAINS:Jurnal Pendidikan Biologi Dan Sains*, 6(1), 1–13. <https://doi.org/10.31539/bioedusains.v6i1.5285>
- Nadya, Y., Yusnawati, Y., & Handayani, N. (2020). Analisis Produksi Bersih di UKM Pengolahan Tahu di Gampong Alue Nyamok Kec. Birem Bayeun Kab. Aceh Timur. *Jurnal Teknologi*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.24853/jurtek.12.2.133-140>
- Novianty, R., Saryono, Awaluddin, A., & Pratiwi, N. W. (2020). Bakteri Indigen Pendegradasi Hidrokarbon Minyak Bumi di Kabupaten Siak Provinsi Riau. *Jurnal Teknik Kimia USU*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.32734/jtk.v9i1.3834>
- Nur, A., Komala, P. S., & D, U. A. (2020). Penyisihan Senyawa Organik pada Air Limbah Tahu Menggunakan Proses Elektrokoagulasi Pasangan Elektroda Aluminium. *Dampak*, 17(2), Article 2. <https://doi.org/10.25077/dampak.17.2.62-71.2020>
- Oktavia, D. A., & Wibowo, S. (2017). Isolasi dan Identifikasi Mikroba Lipolitik dari Limbah Cair Surimi dan Rajungan. *Jurnal Pascapanen dan Bioteknologi Kelautan dan Perikanan*, 11(2), Article 2. <https://doi.org/10.15578/jpbkp.v11i2.262>
- Oljira, T., Muleta, D., & Jida, M. (2018). Potential Applications of Some Indigenous Bacteria Isolated from Polluted Areas in the Treatment of Brewery Effluents. *Biotechnology Research International*, 2018, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2018/9745198>
- Pribadi, O. O. (2021). Analisis Komparasi Pendapatan Usaha tani Padi Sawah Sri Organik Dan Padi Sawah Konvensional Di Desa Kelayang Kecamatan Rakit Kulim Kabupaten Indragiri Hulu [Other, Universitas Islam Riau]. <https://repository.uir.ac.id/14037/>
- Purba, D. A. P. B., Siburian, J., & Kartika, W. D. (2023). Uji Kelayakan Panduan Praktikum Perkembangan Hewan Berbasis Project Based Learning Materi Analisis Spermatozoa. *Didaktis: Jurnal Pendidikan dan Ilmu Pengetahuan*, 23(1), Article 1. <https://doi.org/10.30651/didaktis.v23i1.12347>
- Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian & Sekretariat Jenderal Kementerian Pertanian. (2021). *Buletin Konsumsi Pangan*. Sekretariat Jenderal Kementerian Pertanian.
- Retno Ken R. (2019). Peranan Bakteri Indigenus dalam Degradasi Limbah Cair Pabrik Tahu. *Biota : Jurnal Ilmiah Ilmu-Ilmu Hayati*, 8–15. <https://doi.org/10.24002/biota.v4i1.2362>
- Rz, R. I., Siburian, J., & Hamidah, A. (2022a). Uji Kelayakan Panduan Praktikum Genetika Materi DNA Berbasis Inkuiri Terbimbing. *Diklabio: Jurnal*

- Pendidikan dan Pembelajaran Biologi*, 24–32. <https://doi.org/10.33369/diklabio.6.1.24-32>
- Rz, R. I., Siburian, J., & Hamidah, A. (2022b). Uji Kelayakan Panduan Praktikum Genetika Materi DNA Berbasis Inkuiri Terbimbing. *Diklabio: Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran Biologi*, 24–32. <https://doi.org/10.33369/diklabio.6.1.24-32>
- Sopiah, N., Irawati, W., & Wijaya, Y. (2022). Potensi bakteri indigen Indonesia dalam mendegradasi karbofuran. *Jurnal Biologi Udayana*, 26(1), 66. <https://doi.org/10.24843/JBIO UNUD.2022.v26.i01.p07>
- Yanti, Y., Rifai, I., Pratama, Y. A., & Harahap, M. I. (2019). Penapisan isolat rizobakteri indigenos untuk pengendalian (*Ganoderma boninense*) di pre nursery kelapa sawit (*Elaeis guineensis* Jacq.). *Jurnal AGRO*, 6(2), Article 2. <https://doi.org/10.15575/4665>