



Remediasi Kromium Heksavalen Melalui Bioaugmentasi Konsorsium Bakteri Indigenous Wilayah Tercemar Limbah Cair Sablon dengan Biostimulasi Bulu Ayam Broiler

Made Luhur Sahadeva^{1,*}, Ni Putu Ayu Oka Pratiwi², Ni Nyoman Ayu Paramitha¹, Putu Dinda Sasmitha¹, I Made Oka Riawan¹

¹Program Studi Biologi, Universitas Pendidikan Ganesha, Jalan Udayana 11, Singaraja, Bali, Indonesia

²Program Studi Kimia, Universitas Pendidikan Ganesha, Jalan Udayana 11, Singaraja, Bali, Indonesia

*email: luhur@student.undiksha.ac.id

Abstract

Hexavalent chromium or Cr (VI) is a heavy metal that is dangerous to living things if it enters the body's metabolism because of its high permeability and oxidation ability which can disrupt biological systems. Cr (VI) is found in large quantities in textile dyes in the screen printing industry. The results of washing screen printing produce Cr (VI) waste which is dangerous to the environment. The waters that are the place where the waste from washing screen printing flows become polluted and toxic due to waste that is not treated first. One way to overcome this pollution is by bioremediation. In this research, bioremediation was carried out using a consortium of indigenous bacteria with biostimulation of broiler chicken feathers. The bacterial consortium was taken from sediments of waters contaminated with Cr (VI) waste, then isolated and tested for tolerance to chromium. The bacterial consortium that is resistant to chromium was then used for bioremediation by a combination of bioaugmentation and biostimulation using broiler chicken feathers as a nutrient supply for the bacteria. This research aims to obtain a bacterial consortium with the highest effectiveness of Cr (VI) remediation through a combination of bioaugmentation and biostimulation of broiler chicken feathers. Base on results of isolation and tolerance tests show that indigenous bacteria from polluted areas have the ability to survive and grow even in conditions contaminated with chromium. However, the addition of nutrients from broiler chicken feather meal as a carbon and nitrogen source did not succeed in increasing the metabolic activity of bacteria in degrading Cr(VI). The results of the ANOVA one way test also support the conclusion that there is no significant difference in effectiveness between treatments with varying concentrations of chicken feather flour. Bacterial consortia have not been able to improve Cr (VI) remediation due to nutritional incompatibility and difficulties in decomposing nutrients in chicken feathers, as well as the possibility of antagonistic interactions between microbial strains.

Keywords: bioremediation; bioaugmentation; biostimulation

Abstrak

Kromium heksavalen atau Cr (VI) merupakan logam berat berbahaya bagi makhluk hidup bila masuk ke dalam metabolisme tubuh karena permeabilitas dan kemampuan oksidasinya tinggi yang dapat mengganggu sistem biologis. Cr (VI) banyak terkandung di dalam pewarna tekstil industri sablon. Hasil pencucian screen sablon menghasilkan limbah Cr (VI) yang berbahaya bagi lingkungan. Perairan yang menjadi tempat aliran buangan hasil pencucian screen sablon menjadi tercemar dan toksik akibat limbah yang tidak diolah terlebih dahulu. Salah satu cara menanggulangi pencemaran tersebut yakni dengan bioremediasi. Pada riset ini, bioremediasi dilakukan dengan menggunakan konsorsium bakteri indigenous dengan biostimulasi bulu ayam broiler. Konsorsium bakteri diambil dari sedimen perairan tercemar limbah Cr (VI), lalu diisolasi dan diuji toleransinya terhadap kromium. Konsorsium bakteri yang resisten terhadap kromium kemudian dipakai untuk bioremediasi dengan cara kombinasi bioaugmentasi dan biostimulasi menggunakan bulu ayam broiler sebagai suplay nutrisi bagi bakteri. Riset ini bertujuan untuk mendapatkan konsorsium bakteri dengan efektivitas tertinggi dari remediasi Cr (VI) melalui kombinasi bioaugmentasi dan biostimulasi bulu ayam broiler. Hasil isolasi dan uji toleransi menunjukkan bahwa bakteri indigenous dari wilayah tercemar memiliki kemampuan bertahan hidup dan berkembang meskipun dalam kondisi tercemar kromium. Namun, penambahan nutrisi dari tepung bulu ayam broiler sebagai sumber karbon dan nitrogen tidak berhasil meningkatkan aktivitas metabolisme bakteri dalam mendegradasi Cr (VI). Hasil uji ANOVA One Way juga mendukung

kesimpulan bahwa tidak ada perbedaan efektivitas yang signifikan antara perlakuan dengan variasi konsentrasi tepung bulu ayam. Konsorsium bakteri belum mampu meningkatkan remediasi Cr (VI) karena disebabkan oleh ketidaksesuaian nutrisi serta kesulitan penguraian nutrisi dalam bulu ayam, serta kemungkinan adanya interaksi antagonis di antara strain mikroba.

Kata-kata kunci: bioremediasi; bioaugmentasi; biostimulasi

PENDAHULUAN

Kromium merupakan unsur logam yang terdapat pada pewarna tekstil hijau (CrCl_3), kuning (PbCrO_4), jingga (K_2CrO_7), dan hitam (CuCr_2O_4 atau $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$) dalam industri penyablonan, di mana pada proses pewarnaan dan pencucian screen sablon dapat menghasilkan limbah cair yang mengandung kromium heksavalen (Safaruddin, *et al.*, 2022). Kromium heksavalen atau Cr (VI) merupakan racun bagi makhluk hidup karena permeabilitas dan kemampuan oksidasinya tinggi yang dapat mengganggu sistem biologis tubuh, serta memasuki rantai makanan yang menyebabkan akumulasi pada predator puncak, yakni manusia sebagai tingkat trofik tertinggi (Suteja, *et al.*, 2020; Kholisa, *et al.*, 2021; Yan, *et al.*, 2023). Akumulasi Cr (VI) dapat menyebabkan gangguan pada kerja sistem enzim, paru-paru, ginjal, saluran pencernaan, saluran pernapasan, mata, menyebabkan mutasi DNA, bahkan dapat menyebabkan kematian pada manusia dan makhluk hidup lainnya apabila terpapar dan terakumulasi pada tubuh dalam waktu yang lama (Suteja, *et al.*, 2020; Ukhurebor, *et al.*, 2021; Wise, *et al.*, 2022; Ake, *et al.*, 2023). Penelitian yang dilakukan di Teluk Benoa, Bali (luas 1.243 ha) dan muara sungai di sekitarnya menunjukkan adanya pencemaran kromium oleh industri tekstil dan sablon dengan jumlah konsentrasi kromium tertinggi berada pada daerah sedimen yang berkisar antara 1,0 mg/kg-1 hingga 24,6 mg/kg-1, di mana konsentrasi meningkat pada muara sungai (Sungai Mati dan Sungai Badung) yang merupakan sumber pencemaran di mana limbah dialirkan oleh industri yang berada di sekitar sungai tersebut (Suteja, *et al.*, 2020). Hingga saat ini, tidak dijumpai adanya upaya atau standar operasional prosedur pemerintah dalam mengatasi pencemaran Cr (VI) yang telah berada pada wilayah perairan, termasuk perairan tercemar Cr yang digunakan sebagai wilayah penangkapan dan budidaya perikanan bernilai ekonomi tinggi di Indonesia

Keberadaan logam berat pada ekosistem tercemar memacu respon bakteri untuk mengembangkan kemampuan toleransi dan detoksifikasi, di mana dapat terjalin interaksi dengan logam polutan sehingga mempengaruhi mobilitasnya pada lingkungan, demikian pula dengan kromium yang terjadi selama proses pertumbuhan dan metabolismenya (Sharma, *et al.*, 2021; Fashola, *et al.*, 2020; Yan, *et al.*, 2023). Bioaugmentasi pada situs tercemar merupakan metode penambahan populasi bakteri indigenous atau eksogenous pengurai polutan sehingga

mempercepat proses penguraian akibat peningkatan populasi (Kurniawan, *et al.*, 2022; Akhtar, *et al.*, 2023). Pada penelitian terdahulu, bioremediasi Cr (VI) dengan bioaugmentasi menunjukkan efektivitas degradasi sebesar 44,6% - 62,2% setelah 84 hari waktu degradasi (Yan, *et al.*, 2023). Penelitian sejenis menggunakan bakteri pereduksi sulfat juga menunjukkan hasil yang demikian, di mana terjadi reduksi Cr (VI) lebih dari 51% setelah 73 jam perlakuan (Yan, *et al.*, 2020 dalam Yan, *et al.*, 2023). Kecepatan degradasi juga dapat terjadi akibat manipulasi faktor lingkungan dengan penambahan konsentrasi nutrisi pada metode biostimulasi untuk mempercepat laju bioremediasi oleh bakteri indigenous (Sayed, *et al.*, 2021; Hatzinger & Kelsey, 2023). Keberadaan nutrisi mampu meningkatkan populasi dan kapasitas metabolisme bakteri sehingga mempercepat proses remediasi polutan oleh agen degradator yang terstimulasi. Komunitas mikroba dengan struktur populasi yang buruk dan minimnya keberadaan nutrisi pada lingkungan mengakibatkan penerapan secara tunggal dari bioaugmentasi dan biostimulasi menjadi tidak efektif (Yan, *et al.*, 2023). Penambahan populasi bakteri degradator dan pemberian nutrisi secara bersamaan merupakan metode yang dapat diterapkan guna mengoptimalkan degradasi polutan oleh bakteri. Bakteri degradator yang ditambahkan akan mendapatkan nutrisi yang cukup untuk melakukan aktivitas degradasi. Sebaliknya, nutrisi yang diberikan akan dimanfaatkan secara optimal oleh bakteri degradator dengan jumlah populasi yang tinggi.

Karbon dan nitrogen merupakan nutrisi penting yang dibutuhkan dalam pertumbuhan bakteri, di mana karbon dibutuhkan sebagai sumber energi dan nitrogen dibutuhkan untuk pembentukan serta pertumbuhan sel bakteri sebagai komponen utama pada sintesis asam amino dan materi genetik (Garcia-Tejero & Duran-Zuazo, 2023; Yan, *et al.*, 2023). Karbon dan nitrogen sebesar 46% dan 15% merupakan unsur yang dapat dijumpai pada bulu ayam broiler (Bharathi & Raj, 2021). Pada tahun 2018, Indonesia menghasilkan sebanyak 2.313.518 ton daging ayam broiler serta menghasilkan bulu sebagai limbah dengan jumlah tertinggi, di mana jumlah limbah bulu ayam yang dihasilkan akan terus meningkat seiring dengan peningkatan produksi daging ayam broiler (Fitriyanto, *et al.*, 2022). Kandungan karbon dan nitrogen yang tinggi berpotensi sebagai sumber nutrisi bagi bakteri untuk meningkatkan laju pertumbuhannya. Penerapan bulu ayam sebagai sumber nutrisi telah digunakan pada pakan ternak dan pupuk tumbuhan karena kandungan nitrogennya yang tinggi dan mudah dicerna oleh tubuh makhluk hidup. Pemanfaatan bulu ayam broiler sebagai sumber nutrisi dipilih karena kandungan nutrisi yang baik, mudah dicerna oleh makhluk hidup, serta diharapkan mampu mengurangi jumlah limbah bulu yang dihasilkan seiring dengan pemanfaatannya secara berkelanjutan dalam mengatasi pencemaran Cr (VI).

Keberadaan Cr (VI) pada perairan merupakan ancaman bagi keberlangsungan hidup makhluk hidup, sehingga dibutuhkan adanya perhatian khusus untuk memulihkannya, di mana dibutuhkan upaya degradasi yang relatif lebih aman dan murah. Upaya remediasi Cr (VI) perlu dilakukan dengan memanfaatkan biodiversitas yang tersedia dengan meningkatkan kemampuan biodegradasi melalui pemanfaatan sumber daya yang tersedia sebagai sumber nutrisi. Maka dari itu, perlu dilakukan upaya dalam menemukan potensi untuk mendegradasi polutan Cr (VI) dari limbah cair sablon dengan memanfaatkan bulu ayam broiler serta mengevaluasi efektivitas dari kombinasi bioaugmentasi konsorsium bakteri indigenous dengan biostimulasi bulu ayam broiler terhadap efektivitas degradasi polutan Cr(VI).

Tujuan dari dilakukannya pelaksanaan PKM bidang riset eksakta ini adalah menemukan efektivitas tertinggi dari remediasi Cr (VI) melalui kombinasi bioaugmentasi konsorsium bakteri indigenous wilayah tercemar limbah cair sablon dengan biostimulasi bulu ayam broiler menggunakan konsentrasi yang berbeda.

Metode

Riset mengenai upaya remediasi kromium heksavalen melalui bioaugmentasi konsorsium bakteri indigenous wilayah tercemar limbah cair sablon dengan biostimulasi bulu ayam broiler menggunakan bahan utama berupa sampel sedimen perairan Sungai Mati, Kabupaten Badung, Bali. Bahan pendukung lainnya berupa *Nutrient Agar* (NA), *Nutrient Broth* (NB), kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$), H_2SO_4 , difenilkarbazida, dan aseton. Adapun alat yang digunakan antara lain autoklaf, *laminar air flow* (LAF), neraca analitik, incubator, *bottom sampler*, pH meter, *chopper*, dan spektrofotometri UV-Visible.

Riset dilaksanakan di Laboratorium Biologi, Universitas Pendidikan Ganesha selama tiga bulan, dengan tahapan yang mencakup pengambilan sampel, isolasi bakteri, uji toleransi terhadap kromium, kombinasi bioaugmentasi dan biostimulasi konsorsium bakteri dengan variasi tepung bulu ayam broiler, serta analisis dan penarikan kesimpulan data menggunakan uji ANOVA One Way. Sampel yang digunakan berupa lapisan sedimen perairan tercemar limbah cair sablon, karena kromium paling banyak dijumpai pada lapisan tersebut (Suteja, et al. 2020). Sampel disimpan dalam jar steril dan dibungkus dengan aluminium foil, lalu dibawa menuju Laboratorium Biologi Universitas Pendidikan Ganesha untuk diolah. Dari sampel, konsorsium bakteri indigenous diisolasi dan ditumbuhkan pada media agar, lalu konsorsium bakteri yang berhasil tumbuh akan diuji toleransinya terhadap kromium.

Uji toleransi terhadap kromium dilakukan untuk menilai potensi konsorsium bakteri indigenous sebagai agen biodegradator. Uji dilakukan dengan menambahkan kalium dikromat

(K₂Cr₂O₇) sebesar 1 mg/L ke dalam media pertumbuhan, sementara media tanpa kromium digunakan sebagai kontrol. Pertama, konsorsium bakteri indigenous diencerkan dengan faktor pengenceran 10⁻⁵, kemudian ditumbuhkan pada nutrient agar dan diinkubasi pada suhu 30°C selama 24 jam. Setelah itu, jumlah CFU yang muncul dihitung untuk menentukan konsorsium bakteri yang paling toleran terhadap kromium. Konsorsium bakteri yang paling toleran kemudian digunakan pada kombinasi bioaugmentasi dan biostimulasi. Proses kombinasi melibatkan penambahan tepung bulu ayam broiler yang telah disortir, dicuci, dikeringkan, dan dihaluskan ke dalam 100 gram sampel sedimen perairan tercemar yang telah dicampur dengan 1 ml konsorsium bakteri yang sudah diencerkan dengan faktor pengenceran 10⁻³. Sampel kemudian diinkubasi pada suhu 30°C selama 21 hari dalam kondisi anaerob. Penambahan variasi tepung bulu ayam yang diberikan sebesar 0, 10, 20, 40 mg. Variasi konsentrasi nutrisi dari bulu ayam ini bertujuan untuk menentukan kondisi terbaik untuk bioremediasi.

Untuk mengetahui efektivitas bioremediasi dilakukan uji spektrofotometri UV-Visible pada sampel sebelum dan sesudah perlakuan kombinasi bioremediasi. Sampel dikonstruksi terlebih dahulu dengan cara dikeringkan lalu dihaluskan dan dikonstruksi basah menggunakan H₂SO₄ 1M. Hasil konstruksi diambil 1 ml kemudian ditambahkan 0,5 ml larutan difenilkarbazida yang dibuat dari melarutkan 50 mg 1,5-difenilkarbazida ke dalam 10 ml aseton. Setelah itu, ditambahkan 1 ml H₂SO₄ 3M dan tunggu hingga terjadi perubahan warna secara optimum, maka sampel siap diuji menggunakan spektrofotometri UV-Visible pada panjang gelombang 540 nm. Pada kurva standar, dibuat larutan kalium dikromat 0-1 ppm dengan interval 0,1 ppm dan 1-10 ppm dengan interval 1 ppm. Masing-masing larutan kalium dikromat diambil sebanyak 1 ml dan ditambahkan 0,5 ml larutan difenilkarbazida serta 1 ml larutan H₂SO₄ 3M. Setelah terjadi perubahan warna secara optimum, larutan standar siap diuji.

Keseluruhan data hasil riset dianalisis dan penafsiran data riset dengan uji ANOVA One Way dengan taraf signifikansi sebesar 0,05 untuk menguji hipotesis riset. Hasil riset kemudian disimpulkan dengan melihat nilai signifikansi dari hasil analisis data.

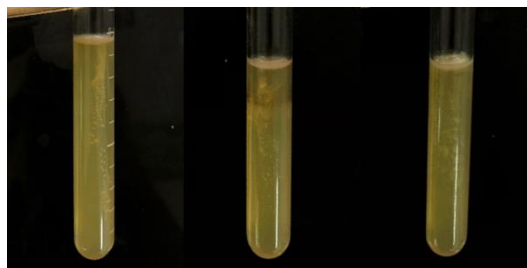
Hasil dan Pembahasan

Hasil pengambilan sampel sedimen di Sungai Mati, Kabupaten Badung, Bali menunjukkan adanya tanda-tanda pencemaran. Observasi secara visual mengungkapkan bahwa air sungai terlihat keruh, berwarna gelap dan beraroma tidak sedap. Bau yang timbul menunjukkan adanya proses dekomposisi di dalam air yang kemungkinan besar bersumber dari limbah domestik dan industri. Selain itu, banyak sampah domestik dan plastik yang ada di

dekat aliran sungai. Hasil pengukuran pH air Tukad Mati cukup rendah, yaitu di bawah 3,5 jauh dari standar kualitas air yang sehat dengan kisaran pH 6,5-8,5.

Sampel sedimen yang diambil sebanyak 11 jar dengan kapasitas 500ml. Sampel pada masing-masing jar dihomogenisasi dan diisolasi bakterinya. Hasil dari kegiatan isolasi bakteri indigenous menunjukkan bahwa konsorsium bakteri ini berhasil diperoleh dari sedimen perairan yang tercemar limbah cair industri sablon. Keberhasilan tersebut dapat dilihat dari hasil isolasi, di mana beberapa koloni bakteri berhasil tumbuh. Setelah diisolasi, konsorsium bakteri ini kemudian ditumbuhkan pada media pertumbuhan cair menggunakan nutrient broth. Hasilnya menunjukkan bahwa bakteri dapat berkembang dengan baik dalam media ini, yang mengindikasikan bahwa nutrient broth menyediakan nutrisi yang cukup untuk mendukung pertumbuhan bakteri indigenous. Hasil tersebut sesuai dengan pernyataan bahwa media kultur cair dapat memfasilitasi akses nutrisi bagi bakteri sehingga memungkinkan pembaruan nutrisi bagi bakteri (Bonnet, M., *et al.*, 2019).

Pada upaya menumbuhkan konsorsium bakteri indigenous yang dilakukan menggunakan metode spread plate tidaklah berhasil. Faktor penyebab kegagalan dikarenakan kondisi lingkungan yang kurang cocok untuk bakteri tumbuh atau ketidakmampuan bakteri untuk berkoloni di permukaan media agar. Oleh karena itu, dilakukan uji sifat anaerob dengan menumbuhkan konsorsium bakteri pada media nutrient agar menggunakan metode tusuk pada agar tabung. Hasil dari uji ini menunjukkan bahwa konsorsium bakteri indigenous dapat tumbuh dengan baik pada media nutrient agar. Hal tersebut menunjukkan bila konsorsium bakteri lebih mampu berkembang pada kondisi anaerob. Reaksi metabolisme bakteri dapat terjadi dalam lingkungan anaerobik, di mana mikroorganisme yang mampu melakukan proses tersebut adalah anaerob obligat (Hatzinger & Kelsey, 2023). Berdasarkan hasil isolasi dan uji sifat anaerob ini, dapat dipastikan bahwa perlakuan kombinasi metode remediasi dengan bioaugmentasi dan biostimulasi dapat dilakukan secara anaerob. Ini membuka peluang lebih besar untuk menggunakan konsorsium bakteri indigenous dalam upaya remediasi lingkungan yang tercemar Cr (VI) dari limbah cair industri sablon.



Gambar 1. Konsorsium Bakteri yang Ditumbuhkan Menggunakan Metode Tusuk pada Agar Tabung

Selanjutnya dilakukan uji toleransi konsorsium bakteri indigenous terhadap kromium. Hasil uji toleransi menunjukkan bahwa konsorsium bakteri indigenous yang diisolasi dari sedimen perairan tercemar limbah cair sablon mampu tumbuh pada nutrient agar yang diberikan kalium dikromat ($K_2Cr_2O_7$) dengan konsentrasi 1 mg/L (Tabel 1). Hasil uji menunjukkan jika tidak terdapat perbedaan jumlah CFU secara signifikan pada media *nutrient agar* pada kedua konsentrasi kalium dikromat yang ditambahkan (Tabel 2). Hasil ini mengindikasikan jika konsorsium bakteri indigenous yang diisolasi dari sedimen perairan tercemar limbah cair sablon memiliki daya toleransi terhadap keberadaan kromium. Hasil uji ini penting karena menunjukkan potensi penggunaan bakteri indigenous sebagai agen bioremediasi untuk mengatasi pencemaran logam berat di lingkungan, khususnya yang terkait dengan limbah cair sablon. Potensi bakteri indigenous tersebut sesuai dengan pernyataan dari (Mendes, *et al.*, 2011 dalam Ake, *et al.*, 2023) yang menyatakan bahwa bakteri memiliki kemampuan untuk menghasilkan enzim seperti peroksidase dan lakase yang memungkinkan mereka untuk mendegradasi limbah cair pewarna tekstil melalui oksidasi.

Tabel 1. Jumlah CFU Konsorsium Bakteri yang Muncul pada Media *Nutrient Agar* dalam Uji Toleransi Konsorsium

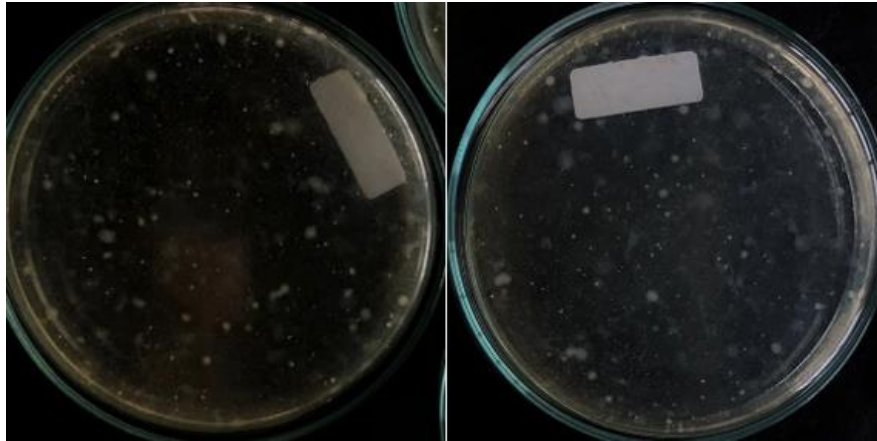
Ulangan	$K_2Cr_2O_7$ 0 mg/L	$K_2Cr_2O_7$ 1 mg/L
1	77×10^{-5} CFU	101×10^{-5} CFU
2	103×10^{-5} CFU	87×10^{-5} CFU
3	104×10^{-5} CFU	60×10^{-5} CFU
4	95×10^{-5} CFU	87×10^{-5} CFU
5	75×10^{-5} CFU	83×10^{-5} CFU
6	89×10^{-5} CFU	102×10^{-5} CFU
7	108×10^{-5} CFU	110×10^{-5} CFU
8	65×10^{-5} CFU	89×10^{-5} CFU
9	105×10^{-5} CFU	113×10^{-5} CFU
10	90×10^{-5} CFU	94×10^{-5} CFU
Rerata	$91,1 \times 10^{-5}$ CFU	$92,6 \times 10^{-5}$ CFU

Tabel 2. Hasil Uji Toleransi Konsorsium Bakteri Indigenous Menggunakan Uji *Independent Sampel T-Test*

Variabel	t	Signifikansi	Keterangan
Jumlah CFU	-0,223	0,826	Tidak Signifikan

Berdasarkan hasil analisis data menggunakan uji Independent Sample T-Test yang dilakukan, dapat diketahui jika jumlah CFU pada uji toleransi konsorsium bakteri indigenous memiliki nilai signifikansi sebesar 0,826 ($p > 0,05$), sehingga perbedaan CFU yang muncul pada media nutrient agar tidak signifikan. Dengan kata lain, konsorsium bakteri indigenous yang diujikan bersifat toleran terhadap keberadaan Cr(VI). Hasil yang diperoleh sesuai dengan Sharma (2021), yang menyatakan jika bakteri mampu mengembangkan kemampuan toleransi

terhadap keberadaan logam berat di lingkungannya. Hal tersebut juga sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Fashola, et al (2020) yang mengungkapkan bahwa bakteri indigenous yang diisolasi dari lingkungan terkontaminasi logam berat mempunyai potensi sebagai agen bioremediasi logam berat di lingkungan tersebut.



Gambar 2. CFU yang Muncul pada Media *Nutrient Agar* Termodifikasi Kalium Dikromat 0 mg/L (kiri) dan 10 mg/L (kanan)

Hasil kombinasi bioaugmentasi dan biostimulasi setelah 21 hari waktu perlakuan menunjukkan jika rerata konsentrasi kromium heksavalen yang masih terdapat pada sampel sedimen perairan tercemar limbah cair sablon tidak berbeda secara signifikan (Tabel 3).

Tabel 3. Konsentrasi Cr (VI) pada Sampel Sedimen Perairan Tercemar Limbah Cair Sablon setelah Perlakuan Kombinasi Biougmentasi dan Biostimulasi Selama 21 Hari yang Dianalisis Menggunakan Spektrofotometri UV-Visible

Variasi Bobot Tepung Bulu Ayam Broiler	Rerata konsentrasi Cr(VI)
0 mg	24,283 mg/L
10 mg	23,207 mg/L
20 mg	24,437 mg/L
40 mg	24,291 mg/L

Tabel 4. Hasil Uji Efektivitas Remediasi dengan Kombinasi Metode Bioaugmentasi dan Biostimulasi Menggunakan Uji *Anova One Way*

Variabel	F	Signifikansi	Keterangan
Konsentrasi Cr(VI)	2,929	0,054	Tidak Signifikan

Hasil uji statistika menggunakan uji ANOVA *One Way* menunjukkan jika tidak terdapat perbedaan yang signifikan pada konsentrasi Cr (VI) dalam seluruh perlakuan variasi konsentrasi tepung bulu ayam broiler yang diberikan (Tabel 4). Nilai signifikansi yang diperoleh bernilai sebesar 0,054 ($p > 0,05$) sehingga dapat diketahui jika keempat kelompok perlakuan uji dengan perbedaan konsentrasi stimulasi tepung bulu ayam broiler terhadap konsorsium bakteri indigenous dalam meremediasi Cr (VI) tidak memiliki perbedaan yang

signifikan. Maka dapat diketahui jika kombinasi bioaugmentasi dan biostimulasi dengan konsentrasi tepung bulu ayam broiler yang berbeda belum mampu meningkatkan proses remediasi Cr (VI) yang terdapat pada sampel sedimen perairan tercemar limbah cair sablon.

Konsorsium bakteri indigenous dengan penambahan nutrisi berupa tepung bulu ayam broiler belum mampu meningkatkan proses remediasi kromium heksavalen karena dapat disebabkan oleh beberapa faktor. Faktor tersebut dapat berupa ketidaksesuaian nutrisi yang terdapat dalam tepung bulu ayam broiler terhadap kebutuhan metabolisme konsorsium bakteri indigenous yang digunakan. Sumber nutrisi spesifik yang disediakan mungkin tidak optimal dalam jalur metabolisme konsorsium bakteri yang dibutuhkan dalam meremediasi Cr(VI). Hasil penelitian lain menyatakan jika glukosa mampu meningkatkan reduksi Cr (VI) pada suatu konsorsium, tetapi komposisi nutrisi yang sama pada konsorsium lain yang diujikan tidak mendukung bioremediasi yang efektif (Leonard & Mishra, 2021).

Kesulitan dalam menguraikan tepung bulu ayam broiler menjadi sumber nutrisi oleh konsorsium bakteri indigenous juga dapat menjadi penyebab tidak efektifnya hasil bioremediasi. Bulu ayam mengandung protein, nitrogen, dan karbon yang tinggi, tetapi dalam penelitian ini tidak dilakukan analisis terhadap struktur dari protein, nitrogen, dan karbon yang terdapat didalamnya sehingga kompleksitas strukturnya tidak diketahui. Bulu ayam banyak mengandung keratin sehingga menyebabkan nutrisi mereka sulit dicerna karena struktur protein yang kompleks (Andriani, *et al.*, 2024). Demikian pula dengan kandungan nitrogen dan karbon dalam bulu ayam yang sulit untuk dipecah dan dicerna karena komposisi strukturnya yang kompleks (Kormanjos, *et al.*, 2013; Adler, *et al.*, 2018).

Terdapat pula kemungkinan adanya interaksi antagonis di antara strain mikroba pada konsorsium bakteri yang digunakan. Interaksi antagonis dalam konsorsium bakteri dapat mengurangi efisiensi secara keseluruhan. Penelitian terdahulu yang telah dilaporkan memperlihatkan adanya kultur campuran dengan tingkat penghilangan kromium yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan kombinasi strain mikroba yang bersifat sinergis (Asri, *et al.*, 2023). Kompleksitas dan toksisitas Cr (VI) yang tinggi juga dapat menghambat aktivitas mikroba, di mana hal ini dapat terjadi karena dihasilkannya spesies oksigen reaktif yang mempengaruhi metabolisme mikroba (Bhunia, *et al.*, 2022). Faktor-faktor tersebut memiliki kemungkinan dalam mempengaruhi dan mengurangi efektivitas konsorsium bakteri indigenous yang diberikan stimulasi nutrisi dari tepung bulu ayam broiler untuk mendegradasi Cr (VI) pada sampel sedimen perairan tercemar limbah cair sablon dalam laboratorium.

Penutup

Berdasarkan riset yang dilaksanakan, dapat diambil kesimpulan bahwa bahwa kombinasi metode bioaugmentasi dengan konsorsium bakteri indigenous dan biostimulasi menggunakan tepung bulu ayam broiler belum mampu untuk meningkatkan degradasi kromium heksavalen (Cr(VI)) pada sedimen tercemar limbah cair sablon. Isolasi dan uji toleransi menunjukkan bahwa bakteri indigenous dari wilayah tercemar memiliki kemampuan bertahan hidup dan berkembang meskipun dalam kondisi lingkungan yang mengandung konsentrasi kromium tinggi. Namun, penambahan nutrisi dari tepung bulu ayam broiler sebagai sumber karbon dan nitrogen belum berhasil meningkatkan aktivitas metabolisme bakteri dalam mendegradasi Cr(VI). Hasil uji ANOVA *One Way* juga mendukung kesimpulan bahwa tidak ada perbedaan efektivitas yang signifikan antara perlakuan dengan variasi konsentrasi tepung bulu ayam. Belum mampunya konsorsium bakteri dalam merediasi Cr (VI) dapat disebabkan oleh ketidaksesuaian nutrisi serta kesulitan penguraian nutrisi dalam bulu ayam, serta terdapat kemungkinan adanya interaksi antagonis di antara strain mikroba. Hal tersebut menunjukkan bahwa sumber nutrisi eksternal dalam bentuk tepung bulu ayam broiler belum mampu menjadi faktor penting dalam meningkatkan efisiensi bioremediasi pada wilayah tercemar logam berat seperti Cr(VI).

Merujuk ke hasil riset, adapun saran untuk penelitian selanjutnya yakni dapat dilakukan evaluasi terhadap pengaruh waktu inkubasi yang lebih panjang untuk melihat efektivitas jangka panjang dari metode bioremediasi pada riset ini. Selain itu, studi lanjutan juga perlu dilakukan untuk mengidentifikasi spesies bakteri spesifik dalam konsorsium yang paling berperan dalam proses degradasi Cr(VI), sehingga pendekatan bioaugmentasi yang lebih terfokus dapat dikembangkan. Pendekatan holistik yang melibatkan partisipasi industri dalam pengelolaan limbah juga perlu ditingkatkan, dengan pengembangan kebijakan dan regulasi yang mendukung penggunaan teknologi ramah lingkungan seperti bioremediasi

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada semua pihak yang telah berkontribusi dan ikut mendukung pelaksanaan riset. Terimakasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia dan Universitas Pendidikan Ganesha atas kesempatan serta pendanaan yang diberikan untuk menyelesaikan riset ini. Dukungan pendanaan yang diberikan sangat mendukung pelaksanaan riset terutama dalam pembelian alat dan bahan riset. Penulis juga menyampaikan rasa terimakasih kepada dosen pendamping kami yaitu Bapak I Made Oka Riawan, S.Pd., M.Sc. yang sudah bersedia

membimbing kami, serta staf laboratorium yang memberikan bantuan teknis selama pelaksanaan riset ini. Ucapan terimakasih juga penulis ucapkan kepada pihak pengelola Sungai Mati, Badung serta peternak ayam broiler atas bantuannya dalam menyediakan bahan penelitian. Penulis harap riset ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan alam dan teknologi, khususnya dalam bidang bioremediasi dan pengelolaan limbah. Penulis juga berharap riset ini dapat menjadi bahan kajian lanjutan bagi para peneliti lain untuk terus berkarya dan menghasilkan riset yang bermanfaat bagi masyarakat luas.

Daftar Pustaka

- Adler, S. A., Slizyte, R., Honkapaa, K., Loes, A. K. 2018. In Vitro Pepsin Digestibility and Amino Acid Composition in Soluble and Residual Fractions of Hydrolyzed Chicken Feathers. *Poultry science*. 97(9): 3343-3357.
- Ake, A. H. J., Hafidi, M., & Ouhdouch, Y. 2023. Microorganisms From Tannery Wastewater: Isolation and Screening for Potential Chromium Removal. *Environmental Technology & Innovation*. 31(1): 103167-103182.
- Akhtar, S., Mohsin, A., Riaz, A., & Mohsin, F. 2023. Worldwide Efficiency of Bioremediation Techniques for Organic Pollutants in Soil: A Brief Review. *Geosfera Indonesia*. 8(1): 102-116.
- Andriani, Y., Pratama, R. I., & Hanidah, I. I. 2024. Review: Potensi Tepung Bulu Ayam untuk Pakan Ikan. *Torani: Journal of Fisheries and Marine Science*. 7(2). 171-180.
- Asri, M., Ouafi, R., Bahafid, W., Elabed, S., Koraichi, S. I., Costa, F., Tavares, T. and Ghachtouli, N. E. 2023. Chromium Removal by Newly Developed Microbial Consortia Supported on Wood Husk. *Desalination and Water Treatment*. 289(1): 80-91.
- Bharathi, S. V. & Raj, I. V. 2021. Studies on the chemical properties of broiler chicken feathers. *The Pharma Innovation Journal*. 10(7): 202-204.
- Bhunia, A., Lahiri, D., Nag, M., Upadhye, V., & Pandit, S. 2022. Bacterial Biofilm Mediated Bioremediation of Hexavalent Chromium: A Review. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology*. 43: 102397.
- Bonnet, M., Lagier, J. C., Raoult, D., & Khelaifia, S. 2019. Bacterial Culture Through Selective and Non-selective Conditions: The Evolution of Culture Media in Clinical Microbiology. *New Microbes and New Infections*. 34(C): 100622.
- Fashola, M. O., Ngole-Jeme, V. M. & Babalola, O. O. 2020. Heavy Metal Immobilization Potential of Indigenous Bacteria Isolated from Gold Mine Tailings. *International Journal of Environmental Research*. 14(1): 71-86.

- Fitriyanto, N. A., Ramadhanti, & Y., Rismiyati. 2022. Production of poultry feather hydrolysate using HCl and NaOH as a growth medium substrate for indigenous strains. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 951(1): 12064-12070.
- Garcia-Tejero, I. F. & Duran-Zuazo, V. H. 2023. *Current Applications, Approaches, and Potential Perspectives for Hemp: Crop Management, Industrial Usages, and Functional Purposes*. Edisi ke-1, Academic Press. London
- Hatzinger, P. B. & Kelsey, J. W. 2023. Biodegradation of organic contaminants. *Encyclopedia of Soils in the Environment*. 1(1): 547-557.
- Kholisa, M., Matsena, M. & Chirwa, E. M. N. 2021. Evaluation of Cr (VI) Reduction Using Indigenous Bacterial Consortium Isolated from a Municipal Wastewater Sludge: Batch and Kinetic Studies. *Catalysts*. 11(9): 1100-1114.
- Kormanjos, S. M., Filipovic, S. S., Radovic, V. A., Okanovic, D. G. and Njezic, Z. B. 2013. Influence of the Applied Pressure of Processing Upon Bioactive Components of Diets Made of Feathers. *Hemijska Industrija*. 67(1): 135-138.
- Kurniawan, S. B., Ramli, N. N., & Said, N. S. M. 2022. Practical limitations of bioaugmentation in treating heavy metal contaminated soil and role of plant growth promoting bacteria in phytoremediation as a promising alternative approach. *Heliyon*. 8(4): 8995-9009.
- Leonard, J. & Mishra, S. 2021. Optimization of Growth Conditions for Maximum Hexavalent Chromium Reduction by the Microbial Consortium Isolated from Chromite Mines. *Indian Journal of Experimental Biology*. 59(1): 867-876.
- Safaruddin, M. D., Wijayanti, F. & Oktasari, A. 2022. Analisis Kadar Logam Kromium (Cr) pada Limbah Penyablonan di Konveksi Sakinah Palembang. *Prosiding Seminar Nasional Sains dan Teknologi Terapan*. 5(1): 376-380.
- Sayed, K., Baloo, L. & Sharma, N. K. 2021. Bioremediation of Total Petroleum Hydrocarbons (TPH) by Bioaugmentation and Biostimulation in Water with Floating Oil Spill Containment Booms as Bioreactor Basin. *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 18(5): 2226-2252.
- Sharma, P. 2021. Efficiency of Bacteria and Bacterial Assisted Phytoremediation of Heavy Metals: An Update. *Bioresource Technology*. 328(1): 124835.
- Suteja, Y., Dirgayusa, I. G. N. P., & Purwiyanto, A. I. S. 2020. Chromium in Benoa Bay, Bali, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*. 153(1): 111017-111024.
- Ukhurebor, K. E., Aigbe, U. O., & Onyancha, R. B. 2021. Effect of Hexavalent Chromium on The Environment and Removal Techniques: A Review. *Journal of Environmental Management*. 280(1): 111809-111834.

Wise, J. P., Young, J. L., & Cai, J. 2022. Current understanding of hexavalent chromium [Cr(VI)] neurotoxicity and new perspectives. *Environmental International*. 158(1): 106877-106895.