

# Remediasi Cr(VI) dengan Bioaugmentasi Bakteri Indigenous Wilayah Tercemar Limbah Sablon dan Biostimulasi Bulu Ayam

Made Luhur Sahadeva<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Biologi, Jurusan Biologi dan Perikanan Kelautan, Universitas Pendidikan Ganesha, Singaraja, Indonesia

\*[luhur@student.undiksha.ac.id](mailto:luhur@student.undiksha.ac.id)

## ABSTRAK

Cr(VI) merupakan logam berat berbahaya bagi makhluk hidup bila masuk ke dalam metabolisme tubuh karena permeabilitas dan kemampuan oksidasi 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 sungai. Metode yang dapat diterapkan dalam menanggulangi pencemaran Cr(VI) pada aliran sungai akibat limbah cair industri sablon adalah dengan melakukan bioremediasi. Dalam 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 Cr(VI). Konsorsium bakteri yang resisten terhadap Cr(VI) digunakan untuk bioremediasi dengan cara kombinasi bioaugmentasi dan biostimulasi menggunakan bulu ayam broiler sebagai suplai nutrisi bagi bakteri. Riset ini bertujuan untuk mendapatkan konsentrasi stimulasi bulu ayam broiler pada konsorsium bakteri dengan efektivitas tertinggi terhadap remediasi Cr(VI) melalui kombinasi bioaugmentasi dan biostimulasi. Hasil isolasi dan uji toleransi menunjukkan bahwa bakteri *indigenous* dari wilayah tercemar memiliki kemampuan untuk 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) pada seluruh konsentrasi. 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) dapat disebabkan karena ketidaksesuaian nutrisi serta kesulitan penguraian nutrisi dalam bulu ayam, serta kemungkinan adanya interaksi antagonis diantara strain mikroba.

**Kata Kunci:** Bakteri *Indogenous*, Bioaugmentasi, Bioremediasi, Biostimulasi, Cr(VI)

## 1. PENDAHULUAN

Cr merupakan unsur logam yang terdapat pada pewarna tekstil untuk memberikan warna hijau ( $\text{CrCl}_3$ ), kuning ( $\text{PbCrO}_4$ ), jingga ( $\text{K}_2\text{CrO}_7$ ), dan hitam ( $\text{CuCr}_2\text{O}_4$  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 Cr(VI) (Safaruddin, dkk., 2022). Cr(VI) merupakan racun bagi makhluk hidup karena permeabilitas dan kemampuan oksidasinya tinggi sehingga mampu mengganggu sistem biologis tubuh, serta memasuki rantai makanan yang menyebabkan akumulasi pada predator puncak, yakni manusia sebagai tingkat trofik tertinggi (Suteja, dkk., 2020; Kholisa, dkk., 2021; Yan, dkk., 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, dkk., 2020; Ukhurebor, dkk., 2021; Wise, dkk., 2022; Ake, dkk., 2023). Penelitian yang dilakukan di Teluk Bena, Bali dengan luas 1.243 ha dan muara sungai di sekitarnya menunjukkan adanya pencemaran Cr oleh industri tekstil dan sablon dengan jumlah konsentrasi Cr tertinggi berada pada daerah sedimen yang berkisar antara  $1,0 \text{ mg/kg}^{-1}$  hingga  $24,6 \text{ mg/kg}^{-1}$ , di mana konsentrasi meningkat pada muara Sungai, yakni pada Sungai Mati dan Sungai Badung yang merupakan sumber pencemaran di mana limbah dialirkan oleh industri yang berada di sekitar sungai tersebut (Suteja, dkk., 2020). Hingga saat ini, tidak dijumpai adanya upaya atau standar operasional prosedur oleh pemerintah dalam mengatasi pencemaran Cr(VI) yang telah berada pada wilayah perairan, termasuk perairan tercemar Cr yang digunakan sebagai wilayah penangkapan dan budidaya perikanan 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 unsur logam berat Cr yang terjadi selama proses pertumbuhan dan metabolisme bakteri (Sharma, dkk., 2021; Fashola, dkk., 2020; Yan, dkk., 2023). Toleransi logam berat pada mikroorganisme dapat terjadi melalui mekanisme biosorpsi, bioleaching, dan biotransformasi yang memungkinkannya untuk memiliki kemampuan toleransi terhadap

logam berat serta mampu melakukan detoksifikasi dengan menetralkan toksisitas logam (Adhikary, dkk., 2024; Bora, dkk., 2024). Kemampuan toleransi terhadap keberadaan logam berat memungkinkan bakteri untuk tetap bertahan dalam kondisi cekaman logam berat karena kemampuan metabolisme yang dimilikinya. Mikroorganisme dengan resistensi terhadap logam berat, termasuk bakteri mampu mereduksi Cr sehingga dapat mengubahnya menjadi bentuk yang kurang beracun bagi makhluk hidup dan lingkungan (Ibrahim & Yagoub, 2023; Dahnoun, dkk., 2024; Soni & Bagaria, 2024). Kemampuan untuk mereduksi logam berat akan memberikan kemampuan bagi bakteri dalam melakukan remediasi terhadap polutan logam berat tersebut.

Bioaugmentasi pada situs tercemar merupakan metode penambahan populasi bakteri indigenous atau eksogenous pengurai polutan sehingga mampu mempercepat proses penguraian akibat peningkatan populasi (Kurniawan, dkk., 2022; Akhtar, dkk., 2023). Pada penelitian terdahulu, bioremediasi Cr(VI) dengan bioaugmentasi menunjukkan efektivitas degradasi sebesar 44,6% - 62,2% setelah 84 hari waktu degradasi (Yan, dkk., 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, dkk., 2020 dalam Yan, dkk., 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, dkk., 2021; Hatzinger & Kelsey, 2023). Biostimulasi merupakan teknik bioremediasi yang dilakukan dengan menyediakan atau memasok nutrisi serta mengoptimalkan kondisi lingkungan guna merangsang aktivitas dan pertumbuhan konsorsium mikroorganisme asli pada lingkungan tercemar (Decesaro, dkk., 2021; Ali, dkk., 2023; Dai, dkk., 2024). 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, dkk., 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, dkk., 2023). Karbon dan nitrogen sebesar 46% dan 15% merupakan unsur yang dapat dijumpai pada bulu ayam broiler (Bharathi & Raj, 2021). Bulu ayam memiliki kandungan yang kaya akan keratin yang merupakan protein kaya nitrogen (Mohammed, dkk., 2022). 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, dkk., 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 bagi 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 relatif 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 riset ini adalah untuk 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.

## 2. KAJIAN PUSTAKA

## 2.1 Sifat Toksisitas dan Reduksi Cr (VI)

Cr(VI) tergolong sebagai unsur logam berbahaya karena kelarutan dan pergerakannya yang tinggi, memiliki permeabilitas yang cepat, dan kemampuan oksidasi yang tinggi, sehingga dapat larut ke dalam air tanah dan tidak mengalami perubahan dalam periode waktu yang lama, serta memberikan efek yang berbahaya bagi sistem biologis tubuh (Kholisa, dkk., 2021; Dabhade, dkk., 2021). Cr(VI) yang masuk ke dalam tubuh manusia dapat menyebabkan kerusakan multi organ, seperti mempengaruhi fungsi ginjal, menyebabkan gagal hati dan jantung, kerusakan pada kulit, gangguan sistem kardiovaskular, gangguan reproduksi, masalah pernapasan berupa asma dan bronkitis kronis, serta masalah kanker karena potensi karsinogenik yang dimilikinya (Singh, dkk., 2022; Paul, dkk., 2023; Georgaki, dkk., 2024; Putra, dkk., 2024). Proses bioakumulasi yang terjadi pada makhluk hidup akibat pencemaran lingkungan akuatik akan menyebabkan kerusakan ekologis jangka panjang (Liu, dkk., 2024). Pembuangan Cr(VI) menuju tanah dan perairan mampu mengganggu fungsi dari ekosistem akibat dari ancaman terhadap keanekaragaman hayati yang ditimbulkannya. Kematian salah satu organisme pada tingkat trofik tertentu dalam ekosistem akibat pelepasan Cr(VI) menuju lingkungan akan mengganggu kestabilan ekosistem tersebut secara keseluruhan. Mekanisme toksisitas Cr(VI) dapat terjadi melalui stress oksidatif yang menghasilkan spesies oksigen reaktif (ROS) sehingga menyebabkan kerusakan oksidatif pada komponen seluler protein dan asam nukleat makhluk hidup, serta mekanisme induksi apoptosis seluler pada berbagai jenis sel yang berkontribusi terhadap kerusakan serta disfungsi jaringan pada makhluk hidup (Singh, dkk., 2022; Liu, dkk., 2024).

Penelitian terdahulu telah menunjukkan jika Cr(VI) dapat mengalami reduksi menjadi Cr(III) pada kondisi asam, dimana Cr(III) merupakan unsur penting bagi tubuh (Ukhurebor, dkk., 2021). Cr(III) merupakan mikroelemen penting dalam keberlanjutan metabolisme dan homeostasis pada manusia (Kholisa, dkk., 2021). Pada mamalia termasuk manusia, Cr(III) merupakan unsur yang kurang permeabel pada membran sel dan berperan dalam metabolisme glukosa, lipid, dan protein. Sedangkan menurut penelitian yang telah dilaporkan, keberadaan Cr(VI) pada mamalia bersifat lebih beracun seratus kali lipat daripada Cr(III) yang berpotensi menyebabkan terjadinya mutasi DNA pada makhluk hidup sebesar seribu kali lipat daripada Cr(III) yang kurang berbahaya (Ake, dkk., 2023). Mekanisme reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) merupakan proses penting dalam remediasi lingkungan. Berbagai spesies bakteri, seperti *Enterobacter*, *Pseudomonas*, dan *Bacillus* dilaporkan efektif dalam mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) dimana hal ini menunjukkan kemampuan dan pentingnya mikroba dalam proses remediasi (Echeverri, dkk., 2021; Gnanarathinam, dkk., 2023). Reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) pada mikroorganisme dapat terjadi melalui aktivitas metabolisme bakteri resisten kromium yang disertai dengan aktivitas enzimatis pada suatu komunitas mikroorganisme (Leonard & Mishra, 2021; Abdulmalik, dkk., 2023; Montes-Robledo, dkk., 2024; Sun, dkk., 2024). Reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) dapat terjadi akibat proses transfer elektron yang difasilitasi oleh konsorsium mikroba (Gnanarathinam, dkk., 2023). Sifat Cr(VI) yang mampu tereduksi menjadi Cr(III) akibat keberadaan konsorsium mikroba memberikan potensi yang besar dalam proses remediasinya menggunakan konsorsium mikroba resisten kromium.

## 2.2 Keberadaan Bakteri Indigenous pada Wilayah Tercemar Logam Berat

Bakteri indigenous merupakan bakteri yang hidup secara bebas di alam dan merupakan bakteri asli yang mendiami suatu wilayah (Fatwa, dkk., 2021). Bakteri indigenous dapat dijumpai pada lingkungan yang tercemar karena kemampuan mereka dalam melakukan adaptasi terhadap kondisi lingkungan yang demikian. Dampak dari adanya pencemaran lingkungan terhadap bakteri indigenous mengakibatkannya memiliki kemampuan untuk menghilangkan polutan dari lingkungan (Wang, dkk., 2023). Penelitian terdahulu menunjukkan jika mikroorganisme pada wilayah tercemar mampu mengembangkan mekanisme detoksifikasi untuk mengatasi efek racun yang ditimbulkan oleh polutan logam berat, dimana hal ini dilakukan agar mikroorganisme mampu bertahan hidup dan berkembang pada wilayah terkontaminasi logam berat (Oziegbe, dkk., 2021). Meskipun dapat mendegradasi logam berat melalui proses detoksifikasi, masih terdapat keterbatasan dari bakteri indigenous dalam melakukan degradasi. Penelitian terdahulu menunjukkan jika proses degradasi oleh bakteri berlangsung dengan kecepatan yang sangat lambat karena logam berat tidak dapat terdegradasi dengan mudah dan secara biologis efek akumulasinya dapat bersifat racun (Sreedevi, dkk., 2022). Disamping itu, proses degradasi oleh bakteri indigenous dapat terhambat karena adanya persaingan dengan mikroorganisme lain dalam memperebutkan sumber daya yang tersedia di alam (Oziegbe, dkk., 2021).

Keberadaan konsorsium bakteri dapat dijumpai pada situs tercemar Cr(VI) sebagai konsorsium bakteri resisten kromium. Hasil penelitian terdahulu menunjukkan jika pada pertambangan Kromit Sukinda di India yang terkontaminasi oleh kromium terdapat komunitas bakteri berupa Proteobacteria, Actinobacteria, dan Bacteroidetes yang mampu hidup pada lingkungan tercemar dan terlibat dalam reduksi Cr(VI) (Pradhan, dkk. 2022). Hasil lainnya menunjukkan jika jenis bakteri Firmicutes,

Planctomycetes, dan Bacteroidetes memiliki jumlah yang melimpah pada situs terkontaminasi kromium (Sadiq, dkk., 2023). Selain itu, bakteri *Alcaligenes*, *Achromobacter*, dan *Bacillus* merupakan bakteri yang juga dapat dijumpai pada daerah tercemar kromium serta berperan dalam biotransformasi kromium menjadi bentuk yang kurang beracun (Fardami & Abdullahi, 2024). Jenis-jenis bakteri yang diisolasi dari daerah yang tercemar kromium memiliki ketahanan dan kemampuan pertumbuhan yang baik pada lingkungan dengan konsentrasi kromium tinggi, sehingga terdapat potensi dalam proses bioremediasi kromium pada lingkungan.

### 2.3 Komposisi Nutrien pada Bulu Ayam Broiler

Komposisi yang terdapat pada sampel bulu ayam broiler mencakup karbon (46%), hidrogen (7,5%), nitrogen (15%), dan sulfur (2%), dimana karbon dengan konsentrasi tertinggi menjadi unsur dengan jumlah yang paling besar pada bulu ayam broiler (Bharathi & Raj, 2021). Kandungan nitrogen dan karbon yang tinggi pada bulu ayam berpotensi sebagai sumber nutrisi dalam proses pertumbuhan dan perkembangan bakteri. Keberadaan karbon dibutuhkan sebagai sumber energi oleh bakteri untuk menjalankan aktivitasnya, sedangkan keberadaan nitrogen dibutuhkan untuk pembentukan serta pertumbuhan sel bakteri (Garcia-Tejero & Duran-Zuazo, 2023). Bulu ayam juga mengandung protein dalam bentuk keratin, serta asam amino esensial dan lipid dalam bulu ayam yang mampu memberikan nutrisi potensial untuk pertumbuhan (Andriani, dkk., 2024; Santos, dkk., 2024). Komposisi yang terdapat di dalam bulu ayam merupakan nutrisi esensial yang dibutuhkan dalam pertumbuhan mikroorganisme, sehingga penambahan bulu ayam sebagai sumber nutrisi diyakini mampu meningkatkan pertumbuhan mikroorganisme. Protein dalam bulu ayam akan digunakan sebagai sumber nutrisi dengan menguraikannya menjadi asam amino untuk selanjutnya dimanfaatkan sebagai sumber nitrogen oleh mikroorganisme. Sehingga, keberadaan bulu ayam sebagai sumber nutrisi akan menguntungkan pertumbuhan mikroorganismenya, termasuk bakteri.

## 3. METODE

Riset dilaksanakan selama tiga bulan di Laboratorium Biologi, Universitas Pendidikan Ganesha, dengan tahapan yang mencakup pengambilan sampel, isolasi bakteri, uji toleransi terhadap Cr(VI), kombinasi bioaugmentasi dan biostimulasi konsorsium bakteri dengan variasi tepung bulu ayam broiler, serta analisis data dan penarikan kesimpulan menggunakan uji *ANOVA One Way*.

Sampling lapisan sedimen perairan tercemar limbah cair sablon dilakukan pada areal Longstorage Sungai Tukad Mati, Kabupaten Badung menggunakan *bottom sampler*. Hal ini didasari karena Cr paling banyak dijumpai pada lapisan sedimen perairan (Suteja, dkk. 2020). Sampel disimpan dalam jar steril dan dibungkus dengan aluminium foil, lalu dibawa menuju Laboratorium Biologi Universitas Pendidikan Ganesha menggunakan *container box* steril. Konsorsium bakteri indigenous diisolasi dari sampel sedimen dan ditumbuhkan pada media agar menggunakan *spread plate method* dan metode tusuk untuk menguji sifat anaerob. Konsorsium bakteri yang berhasil tumbuh dilakukan uji toleransi terhadap Cr(VI) menggunakan media pertumbuhan yang termodifikasi dengan penambahan kalium dikromat ( $K_2Cr_2O_7$ ) sebesar 1 mg/L, serta pada media tanpa Cr(VI) sebagai perlakuan kontrol setelah dilakukan pengenceran  $10^{-5}$ . Konsorsium bakteri indigenous diinkubasi pada suhu 30°C selama 24 jam. Jumlah CFU setelah masa inkubasi dihitung dengan *colony counter*. Uji kombinasi dilakukan melalui penambahan tepung bulu ayam broiler yang telah disortir, dicuci, dikeringkan, dihaluskan, serta disaring menggunakan *mesh* 0,05 ke dalam 100 gram sampel sedimen perairan tercemar Cr(VI) yang telah dinokulasikan 1 ml konsorsium bakteri dengan faktor pengenceran  $10^{-3}$ , untuk kemudian dilakukan homogenisasi. Sampel sedimen diinkubasi pada suhu 30°C selama 21 hari dalam kondisi anaerob. Penambahan variasi tepung bulu ayam yang diberikan sebesar 0, 10, 20, 40 mg. Efektivitas kombinasi bioremediasi ditentukan dengan uji spektrofotometri UV-Visible pada panjang gelombang 540 nm. Sampel dilakukan destruksi kering menggunakan oven kemudian destruksi basah menggunakan  $H_2SO_4$  1M. Hasil destruksi basah diambil 1 ml kemudian ditambahkan 0,5 ml larutan difenilkarbazida yang dibuat dengan melarutkan 50 mg 1,5-difenilkarbazida dalam 10 ml aseton, serta menambahkan 1 ml  $H_2SO_4$  3M pada sampel hingga terjadi perubahan warna. Pembuatan kurva standar dilakukan pada larutan kalium dikromat 0-1 ppm dengan interval 0,1 ppm dan 1-10 ppm dengan interval 1 ppm. Keseluruhan data hasil riset dilakukan analisis statistika dengan uji *ANOVA One Way* pada taraf signifikansi 0,05 kemudian disimpulkan dengan melihat nilai signifikansi dari hasil analisis data.

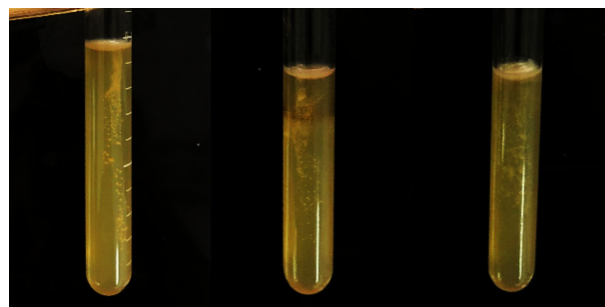
## 4. TEMUAN DAN DISKUSI

### 4.1 TEMUAN

Hasil dari pengambilan dan pengamatan terhadap sampel sedimen di Sungai Tukad Mati, Kabupaten Badung, Bali menunjukkan adanya tanda-tanda pencemaran berupa air sungai yang terlihat keruh, berwarna gelap, serta beraroma tidak sedap. Aroma tidak sedap pada sampel sedimen perairan kemungkinan besar berasal dari limbah domestik dan industri. Selain itu, terdapat banyak sampah domestik dan plastik yang terdapat pada aliran sungai. Hasil pengukuran pH air di Sungai Tukad Mati menunjukkan nilai di bawah 3,5 yang jauh dari standar kualitas air sehat dengan kisaran pH 6,5-8,5.

Hasil isolasi bakteri indigenous dari sampel sedimen perairan sebanyak 11 jar setelah homogenisasi menunjukkan bahwa konsorsium bakteri indigenous berhasil diperoleh dari sedimen perairan yang tercemar limbah cair industri sablon. Dari hasil isolasi, terdapat beberapa koloni bakteri yang berhasil tumbuh. Setelah diisolasi, konsorsium bakteri ditumbuhkan pada media pertumbuhan cair menggunakan *nutrient broth* dimana hasil menunjukkan bahwa bakteri dapat berkembang dengan baik dalam media ini. Hasil tersebut sesuai dengan pernyataan bahwa media kultur cair dapat memfasilitasi akses nutrisi bagi bakteri sehingga memungkinkan pembaruan nutrisi bagi bakteri (Bonnet, dkk., 2019).

Penumbuhan konsorsium bakteri indigenous yang dilakukan menggunakan metode *spread plate* pada media *nutrient agar* tidak berhasil dilakukan. Faktor yang diduga menyebabkan kegagalan adalah kondisi lingkungan yang kurang cocok sehingga konsorsium bakteri tidak mampu tumbuh pada permukaan media agar. Uji sifat anaerob konsorsium bakteri pada media *nutrient agar* dalam tabung menggunakan metode tusuk menunjukkan bahwa konsorsium bakteri indigenous dapat tumbuh dengan baik pada media *nutrient agar* (Gambar 1). Hasil tersebut menunjukkan jika konsorsium bakteri mampu tumbuh pada kondisi anaerob, tetapi tidak mampu tumbuh pada kondisi aerob. Reaksi metabolisme bakteri dapat terjadi dalam lingkungan anaerobik, di mana mikroorganisme yang hanya mampu melakukan proses tersebut dalam kondisi anaerob adalah anaerob obligat (Hatzinger & Kelsey, 2023). Berdasarkan hasil isolasi dan uji sifat anaerob, perlakuan kombinasi metode remediasi dengan bioaugmentasi dan biostimulasi dapat dilakukan secara anaerob menggunakan konsorsium bakteri indigenous pada sedimen perairan tercemar Cr(VI) yang berasal dari limbah cair industri sablon.



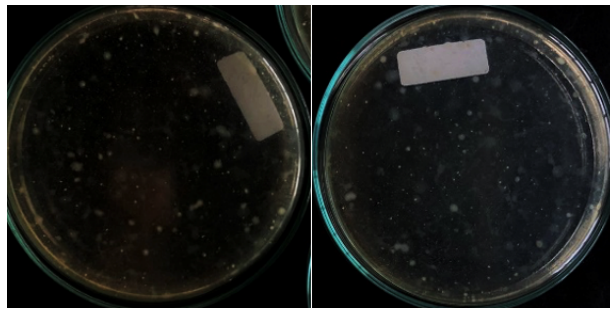
Gambar 1. Koloni Konsorsium Bakteri yang Ditumbuhkan dengan Metode Tusuk pada Agar Tabung

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 dan Gambar 2). Rerata jumlah CFU konsorsium bakteri yang muncul pada media *nutrient agar* termodifikasi kalium dikromat berjumlah sebesar  $92,6 \times 10^{-5}$  CFU, sedangkan rerata jumlah CFU konsorsium bakteri yang muncul pada media *nutrient agar* control berjumlah sebesar  $91,1 \times 10^{-5}$  CFU. Jumlah CFU konsorsium bakteri indigenous yang muncul pada kedua perlakuan tidak memiliki nilai rerata yang terlalu berbeda jauh.

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	$77 \times 10^{-5}$ CFU	$101 \times 10^{-5}$ CFU
2	$103 \times 10^{-5}$ CFU	$87 \times 10^{-5}$ CFU
3	$104 \times 10^{-5}$ CFU	$60 \times 10^{-5}$ CFU
4	$95 \times 10^{-5}$ CFU	$87 \times 10^{-5}$ CFU
5	$75 \times 10^{-5}$ CFU	$83 \times 10^{-5}$ CFU
6	$89 \times 10^{-5}$ CFU	$102 \times 10^{-5}$ CFU
7	$108 \times 10^{-5}$ CFU	$110 \times 10^{-5}$ CFU
8	$65 \times 10^{-5}$ CFU	$89 \times 10^{-5}$ CFU
9	$105 \times 10^{-5}$ CFU	$113 \times 10^{-5}$ CFU
10	$90 \times 10^{-5}$ CFU	$94 \times 10^{-5}$ CFU

Rerata	91,1 x 10 <sup>-5</sup> CFU	92,6 x 10 <sup>-5</sup> CFU
--------	-----------------------------	-----------------------------



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

Hasil kombinasi bioaugmentasi konsorsium bakteri indigenous dan biostimulasi dengan berbagai perlakuan pada konsentrasi yang berbeda setelah 21 hari waktu perlakuan menunjukkan jika rerata konsentrasi Cr(VI) yang masih terdapat pada sampel sedimen perairan tercemar limbah cair sablon tidak memiliki perbedaan nilai yang terlalu jauh (Tabel 3).

Tabel 2. 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 Konsentrasi 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

#### 4.2 Diskusi

Hasil analisis secara statistika menggunakan uji *Independent Sampel T-Test* pada hasil uji toleransi konsorsium bakteri indigenous terhadap Cr(VI) menunjukkan jika tidak terdapat perbedaan jumlah CFU secara signifikan pada media *nutrient agar* dalam 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 pada lingkungan, khususnya yang terkait dengan limbah cair sablon. Potensi bakteri indigenous tersebut sesuai dengan pernyataan dari (Mendes, dkk., 2011 dalam Ake, dkk., 2023) yang menyatakan bahwa bakteri memiliki kemampuan untuk menghasilkan enzim seperti peroksidase dan enzim lainnya yang memungkinkan bakteri indigenous untuk mendegradasi logam berat yang terdapat pada limbah cair pewarna tekstil melalui proses oksidasi.

Tabel 3. 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). Pencemaran yang terjadi akibat pembuangan limbah cair sablon pada Sungai Tukad Mati telah mengakibatkan bakteri indigenous yang mendiami wilayah tersebut mengembangkan kemampuan metabolisme untuk mendetoksifikasi racun yang diakibatkan oleh keberadaan Cr(VI). Hasil yang diperoleh sesuai dengan pernyataan Sharma (2021), yang menyatakan jika bakteri mampu mengembangkan kemampuan toleransi terhadap keberadaan logam berat di lingkungannya. Pada dasarnya, pengembangan kemampuan detoksifikasi oleh bakteri indigenous ini dilakukan agar bakteri indigenous tersebut mampu

bertahan hidup dan berkembang pada wilayah terkontaminasi logam berat (Oziegbe, dkk., 2021). Hal ini 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. Potensi sebagai agen bioremediasi ini muncul karena adanya kemampuan detoksifikasi logam berat tersebut, termasuk Cr(VI), sehingga mampu untuk digunakan sebagai agen percepatan pemulihan kondisi lingkungan.

Hasil penelitian serupa yang dilakukan untuk menguji kemampuan toleransi bakteri terhadap keberadaan Cr(VI) juga menunjukkan hasil yang sama. Strain bakteri A2 dan B1 yang berasal dari limbah penyamakan kulit menunjukkan adanya kemampuan toleransi kromium yang tinggi, dengan resistensi maksimum dari masing-masing strain mencapai 7.700 mg/L dan 7.200 mg/L yang ditentukan dengan menumbuhkan strain bakteri pada media pertumbuhan agar LB (Khanam, dkk., 2024). Isolat CRS-3 yang diperoleh pada area industri di wilayah Ranipet, Tamil Nadu menunjukkan tingkat toleransi yang tinggi terhadap Cr(VI), dimana isolat mampu tumbuh dengan baik pada konsentrasi Cr(VI) sebesar 500 mg/L dengan diameter koloni sebesar 21,3 mm (Chaithanya & Kumudini, 2023). Hasil-hasil penelitian serupa tersebut turut memperkuat hasil yang diperoleh, jika bakteri indigenous yang mendiami wilayah tercemar mampu mengembangkan kemampuan resistensi atau toleransi terhadap keberadaan logam berat Cr(VI) pada lingkungannya.

Hasil uji kombinasi bioaugmentasi konsorsium bakteri indigenous yang diisolasi dari sedimen perairan tercemar limbah cair sablon dengan biostimulasi bulu ayam broiler sebagai sumber nutrisi pada tingkat konsentrasi yang berbeda disetiap perlakuannya, menunjukkan jika tidak terdapat perbedaan yang signifikan dalam meremediasi atau mengurangi jumlah Cr(VI) yang terdapat pada sampel sedimen tercemar Cr(VI) dari limbah cair sablon (Tabel 4). Penambahan atau peningkatan konsentrasi tepung bulu ayam broiler tidak menunjukkan adanya peningkatan proses remediasi Cr(VI). Semakin tinggi atau semakin rendah konsentrasi tepung bulu ayam yang diberikan tidak akan berpengaruh terhadap laju proses remediasi Cr(VI) yang cenderung sama pada setiap perlakuan konsentrasinya.

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.

Kondisi konsorsium bakteri indigenous dengan penambahan nutrisi berupa tepung bulu ayam broiler belum mampu meningkatkan proses remediasi Cr(VI) 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). Kurang optimalnya nutrisi yang disediakan akan mengurangi laju proses reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III). 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). Hal ini mengindikasikan jika komposisi nutrisi yang sama tidak senantiasa memiliki fungsi yang sama terhadap fungsi remediasi suatu jenis bakteri, tetapi dapat memiliki fungsi yang berbeda tergantung pada jenis bakteri yang dilibatkan dalam proses remediasi. Setiap jenis maupun strain bakteri memiliki jalur metabolismenya tersendiri dalam mendegradasi suatu polutan dimana perbedaan jalur metabolisme akan menyebabkan kebutuhan nutrisi suatu bakteri dapat berbeda-beda. Gen dan enzim-enzim spesifik yang diatur oleh mekanisme sel bakteri sebagai respon terhadap keberadaan kontaminan pada lingkungan mampu mempengaruhi kemampuan metabolisme dan kebutuhan nutrisinya, sehingga metabolisme dan kebutuhan nutrisi yang dimiliki oleh berbagai jenis bakteri berbeda (Mohapatra, dkk., 2022; Das, dkk., 2023). Dalam hal ini, nutrisi yang terdapat pada tepung bulu ayam bukan merupakan nutrisi yang dibutuhkan pada proses metabolisme konsorsium bakteri indigenous dalam meremediasi polutan Cr(VI), sehingga penambahan tepung bulu

ayam broiler pada berbagai konsentrasi tidak mempengaruhi laju bioremediasi polutan oleh konsorsium bakteri indigenous.

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 protein dalam bentuk keratin sehingga menyebabkan nutrisi mereka sulit untuk dicerna karena struktur protein yang kompleks (Andriani, dkk., 2024). Demikian pula dengan kandungan nitrogen dan karbon dalam bulu ayam yang sulit untuk dipecah dan dicerna karena komposisi strukturnya yang kompleks. Struktur keratin yang kompleks mampu menahan proses degradasi oleh mikroorganisme karena terdapat kesulitan dalam memecah dan mencernanya secara efektif (Li, 2019). Dalam hal ini kompleksitas struktural yang dimiliki oleh unsur-unsur nutrisi pada bulu ayam bersifat sulit untuk dicerna oleh konsorsium bakteri indigenous yang digunakan dalam pelaksanaan kombinasi bioaugmentasi dan biostimulasi yang dilakukan. Sehingga, keberadaan sumber nutrisi yang sulit dicerna pada bulu ayam broiler justru menjadi sumber nutrisi yang tidak dapat dicerna dan digunakan oleh bakteri indigenous pada proses metabolismenya dalam mendegradasi polutan Cr(VI). Penambahan konsentrasi tepung bulu ayam broiler dalam jumlah yang semakin tinggi ataupun semakin rendah tidak akan mampu meningkatkan laju bioremediasi Cr(VI), sebab nutrisi yang terkandung di dalamnya tidak dapat dimanfaatkan dengan baik oleh bakteri indigenous pengurai polutan.

Kemungkinan adanya interaksi antagonis di antara strain mikroba pada konsorsium bakteri yang digunakan juga dapat berpengaruh terhadap laju proses bioremediasi Cr(VI). Interaksi antagonis diantara isolat atau strain dalam konsorsium bakteri dapat mengurangi efisiensi secara keseluruhan dengan signifikan (Ebadi, dkk., 2021). Terjadinya interaksi antagonis dalam konsorsium bakteri mampu mengurangi efisiensi bioremediasi melalui proses penghambatan pertumbuhan dan aktivitas mikroorganisme tertentu yang dapat membatasi kemampuan mikroorganisme lain yang bermanfaat untuk secara efektif mendegradasi polutan (Khanpour-Alikelayeh & Partovinia, 2021). Persaingan antar mikroorganisme dan produksi inhibitor atau racun oleh mikroorganisme tertentu, merupakan faktor utama yang mampu mengurangi efisiensi bioremediasi menggunakan konsorsium bakteri (Rezaei & Moghimi, 2024). 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, dkk., 2023). Dalam riset ini, tidak dilakukan identifikasi terhadap jenis-jenis isolat bakteri yang diperoleh pada sampel sedimen tercemar limbah cair sablon, serta tidak dilakukan uji sinergitas diantara keseluruhan jenis isolat bakteri yang diperoleh. Sehingga, sinergitas anantara isolat bakteri indigenous satu dengan isolat bakteri indigenous lainnya dalam suatu konsorsium bakteri tidak dapat diidentifikasi. Terdapat kemungkinan adanya interaksi antagonis yang saling menghambat pertumbuhan pada sesama bakteri indigenous dalam konsorsium bakteri indigenous dari sampel sedimen tercemar limbah cair sablon yang digunakan dalam kombinasi bioremediasi. Faktor inilah yang menyebabkan tidak spesifiknya perbedaan laju bioremediasi pada setiap perlakuan, karena interaksi antagonis akan saling menghambat proses bioremediasi yang dilakukan oleh masing-masing bakteri indigenous. Penambahan nutrisi tidak akan berpengaruh secara signifikan dalam meningkatkan laju bioremediasi karena bakteri indigenous agen bioremediasi akan menggunakannya sebagai sumber energi untuk menghambat pertumbuhan bakteri lainnya diantara sesama bakteri indigenous yang masih berada di dalam satu konsorsium bakteri indigenous yang sama.

Kompleksitas dan toksisitas Cr(VI) yang tinggi juga dapat menghambat aktivitas mikroba, di mana hal ini dapat terjadi karena dihasilkannya spesies oksigen reaktif yang mampu mempengaruhi metabolisme mikroba (Bhunia, dkk., 2022). Sehingga, dengan dihasilkannya spesies oksigen reaktif dalam jumlah yang berlebihan akibat keberadaan Cr(VI) yang tinggi akan berdampak pada terhambatnya proses metabolisme bakteri indigenous dalam mendegradasi polutan Cr(VI). Faktor-faktor yang telah disebutkan memiliki kemungkinannya tersendiri 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 perlakuan di laboratorium.

## 5. KESIMPULAN

Kombinasi metode bioaugmentasi dengan konsorsium bakteri indigenous dan biostimulasi menggunakan tepung bulu ayam broiler pada perbedaan tingkat konsentrasi yang digunakan belum mampu untuk meningkatkan degradasi 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 Cr(VI) 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 terjadi secara 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 mikroorganisme dalam konsorsium bakteri yang digunakan. 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 Cr(VI).

Saran untuk penelitian selanjutnya yakni dapat dilakukan evaluasi terhadap pengaruh waktu inkubasi yang lebih panjang guna melihat efektivitas jangka panjang dari kombinasi metode bioremediasi pada riset yang telah dilakukan. Selain itu, studi lanjutan juga perlu dilakukan untuk mengidentifikasi kompleksitas struktur nutrisi yang terdapat pada bulu ayam broiler, mengidentifikasi spesies atau strain bakteri spesifik dalam konsorsium bakteri yang paling berperan penting dalam proses degradasi Cr(VI) serta hubungan interaksi atau sinergitasnya dengan sesama strain atau jenis bakteri lainnya, sehingga pendekatan dalam bioaugmentasi dan biostimulasi yang lebih terarah dapat dikembangkan lebih lanjut.

## 6. UCAPAN TERIMA KASIH

Terimakasih kepada Direktorat Pembelajaran dan Kemahasiswaan Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi Republik Indonesia dan Universitas Pendidikan Ganesha atas kesempatan dalam pendanaan dan fasilitas yang diberikan untuk melaksanakan riset sebagai bentuk pelaksanaan PKM Riset Eksakta. Dukungan pendanaan dan fasilitas yang diberikan sangat mendukung pelaksanaan riset dari awal hingga akhir.

## 7. DAFTAR PUSTAKA

- Adhikary, S., Saha, J., Dutta, P., & Pal, A. (2024). Bacterial Homeostasis and Tolerance to Potentially Toxic Metals and Metalloids through Diverse Transporters: Metal-Specific Insights. *Geomicrobiology Journal*. 41(5), 496–518. <https://doi.org/10.1080/01490451.2024.2340517>
- Ake, A. H. J., Hafidi, M., Ouhdouch, Y., Jemo, M., Aziz, S., & Fels, L. E. (2023). Microorganisms From Tannery Wastewater: Isolation and Screening for Potential Chromium Removal. *Environmental Technology & Innovation*. 31(1), 103167. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103167>
- 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. <https://doi.org/10.19184/geosi.v8i1.30875>
- Ali, M., Song, X., Wang, Q., Zhang, Z., Che, J., Chen, X., Tang, Z., & Liu, X. (2023). Mechanisms of Biostimulant-Enhanced Biodegradation of PAHs and BTEX Mixed Contaminants in Soil by Native Microbial Consortium. *Environmental Pollution*. 318, 120831. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120831>
- Andriani, Y., Pratama, R. I., & Hanidah, I. I. (2024). A Review on Chicken Feather Flour Potential for Fish Feed. *Torani: Journal of Fisheries and Marine Science*, 7(2), 171-180. <https://doi.org/10.35911/torani.v7i2.34396>
- Asri, M., Ouafi, R., Bahafid, W., Elabed, S., Koraichi, S. I., Costa, F., Tavares, T. & Ghachtouli, N. E. (2023). Chromium Removal by Newly Developed Microbial Consortia Supported on Wood Husk. *Desalination and Water Treatment*. 289(1), 80-91. <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29342>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2022.102397>
- Bonnet, M., Lagier, J. C., Raoult, D., & Khelafia, 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. <https://doi.org/10.1016/j.nmni.2019.100622>
- Bora, J., Acharya, S., Mondal, S., Priya, S., Mishra, R., Malik, S., Rustagi, S., & Lata, S. (2024). Role of Microbes in Heavy Metal Bioremediation. Dalam Rajput, V. D. (2024). *Nanotechnology Applications and Innovations for Improved Soil Health* (pp. 354-379). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/979-8-3693-1471-5.ch018>
- Chaithanya, R., & Kumudini, B. S. (2023). Screening and Evaluation of Chromium (VI) Tolerant *Bacillus* sp. from Industrial Areas of Ranipet, Tamil Nadu for Bioremediation of Chromium Contaminated Soil. *Eco. Env. & Cons*. 29(2), 821-828. <http://doi.org/10.53550/EEC.2023.v29i02.047>
- Dabhade, A., Jayaraman, S. & Paramasivan, B. 2021. Development of Glucose Oxidase-Chitosan Immobilized

- Paper Biosensor Using Screen-Printed Electrode for Amperometric Detection of Cr(VI) in Water. *3 Biotech.* 11(4), 183. <https://doi.org/10.1007/s13205-021-02736-5>
- Dahnoun, K., Djadouni, F., Essghaier, B., Naccache, C., & Zitouna, N. (2024). Characterization and Bioremediation Potential of Heavy-Metal Resistant Bacteria Isolated from Agricultural Soil. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry.* 48(4), 607-617. <https://doi.org/10.55730/1300-011X.3205>
- Dai, Y., Li, J., Wang, S., Cai, X., Zhao, X., Cheng, X., Huang, Q., Yang, X., Luo, C., & Zhang, G. (2024). Unveiling the Synergistic Mechanism of Autochthonous Fungal Bioaugmentation and Ammonium Nitrogen Biostimulation for Enhanced Phenanthrene Degradation in Oil-Contaminated Soils. *Journal of Hazardous Materials.* 465, 133293. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2023.133293>
- Das, N., Das, A., Das, S., Bhatawadekar, V., Pandey, P., Choure, K., Damare, S., Pandey, P. (2023). Petroleum Hydrocarbon Catabolic Pathways as Targets for Metabolic Engineering Strategies for Enhanced Bioremediation of Crude-Oil-Contaminated Environments. *Fermentation.* 9(2), 196. <https://doi.org/10.3390/fermentation9020196>
- Decesaro, A., Thomé, A. & Colla, L. M. (2021). Biostimulation of the In Situ Production of Biosurfactants During the Bioremediation of Diesel Oil in Clayey Soil. *International Journal of Environmental Research.* 15, 947–957. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00364-8>
- Ebadi, A., Ghavidel, A., Sima, N. A. K., Heydari, G., & Ghaffari, M. R. (2021). New Strategy to Increase Oil Biodegradation Efficiency by Selecting Isolates with Diverse Functionality and No Antagonistic Interactions for Bacterial Consortia. *Journal of Environmental Chemical Engineering.* 9(5), 106315. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106315>
- Echeverri, G. E., Ramirez, L. S., Saez, Y., & Escorcía, A. (2021). In Vitro Evaluation of Bio Reduction of Hexavalent Chrome by Marine Microorganisms Isolated in The Cartagena Bay for Wastewater Treatment. *Chemical Engineering Transactions.* 86, 655-660. <https://doi.org/10.3303/CET2186110>
- Fardami, A. Y. & Abdullahi, S. (2024). Bacterial Bisorption as an Approach for the Bioremediation of Chromium Contaminated Soils: An Overview. *UJMR: UMYU Journal of Microbiology Research.* 9(3), 374-387. <https://doi.org/10.47430/ujmr.2493.045>
- 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, 71-86. <https://doi.org/10.1007/s41742-019-00240-6>
- Fatwa, E. B., Yoswaty, D. & Effendi, I. (2021). Identification of Indigenous Bacteria from Dumai Sea Waters Using 16S rRNA Method. *Journal of Coastal and Ocean Sciences.* 2(3), 184-188. <https://doi.org/10.31258/jocos.2.3.184-188>
- Fitriyanto, N. A., Ramadhanti, Y., Rismiyati., Rusyadi, I., Pertiwinigrum, A., Prasetyo, R. A., & Erwanto, Y. (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.* 95: 12064. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/951/1/012064>
- García-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. London: Academic Press.
- Georgaki, M. N., Mytiylaki, C., Tsokkou, S., & Kantiranis, N. (2024). Leachability of Hexavalent Chromium from Fly Ash-Marl Mixtures in Sarigiol Basin, Western Macedonia, Greece: Environmental Hazard and Potential Human Health Risk. *Environmental Geochemistry and Health.* 46, 161. <https://doi.org/10.1007/s10653-024-01946-z>
- Gnanarathinam, V. S., Balakrishnan, A., Rajendran, G., Arivarasu, A., Dharmalingam, S., Balasundaram, S. T., Venkatesan, P. N., & Perumal, E. P. U. (2023). Reduction of Hexavalent Chromium using Sulphonated Polyether Ether Ketone as Proton Exchange Membrane in Microbial Fuel Cells. *Environmental Progress & Sustainable Energy.* 42(5), e14158. <https://doi.org/10.1002/ep.14158>
- Hatzinger, P. B. & Kelsey, J. W. (2023). Biodegradation of Organic Contaminants. *Encyclopedia of Soils in the Environment.* 1(1), 547-557. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-822974-3.00140-3>
- Ibrahim, N. A. M., & Yagoub, S. O. (2023). Reduction Rate of Some Heavy Metal in Different Concentration using *Pseudomonas aeruginosa* Isolated from Tertiary Wastewater Effluent. *Electronic Journal of University of Aden for Basic and Applied Sciences.* 4(4), 361-369. <https://doi.org/10.47372/ejua-ba.2023.4.304>
- Khanam, R., Ashik, S. A. A., Suriea, U., & Mahmud, S. (2024). Isolation of Chromium Resistant Bacteria from Tannery Waste and Assessment of Their Chromium Reducing Capabilities – A Bioremediation Approach. *Heliyon.* 10(6), e27821. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e27821>
- Khanpour-Alikelayeh, E. & Partovinia, A. (2021). Synergistic and Antagonistic Effects of Microbial Co-Culture on Bioremediation of Polluted Environments. In *Microbial Rejuvenation of Polluted Environment.* Springer: Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-7455-9\\_10](https://doi.org/10.1007/978-981-15-7455-9_10)

- 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. <https://doi.org/10.3390/catal11091100>
- Kurniawan, S. B., Ramli, N. N., Said, N. S. M., Alias, J., Imron, M. F., Abdullah, S. R. S., Othman, A. R., Purwanti, I. F., & Hasan, H. A. (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. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e08995>
- 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, 867-876. <http://op.niscpr.res.in/index.php/IJEB/article/view/57832>
- Li, Q. (2019). Progress in Microbial Degradation of Feather Waste. *Frontiers in Microbiology*. 10, 2717. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2019.02717>
- Liu, S., Xi, C., Wu, Y., Wang, S., Li, B., Zhu, L., & Xu, X. (2024). Hexavalent Chromium Damages Intestinal Cells and Coelomocytes and Impairs Immune Function in the Echiuran Worm *Urechis unicinctus* by Causing Oxidative Stress and Apoptosis. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*. 285, 110002. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2024.110002>
- Mohammed, Z., Jeelani, S., Korivi, N. S., & Rangari, V. (2022). Synthesis and Characterization of N-Doped Porous Carbon from Chicken Feathers for 3D Printed Electrode Applications. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2230929/v1>
- Mohapatra, B., Dhamale, T., Saha, B. K., & Phale, P. S. (2022). Microbial Degradation of Aromatic Pollutants: Metabolic Routes, Pathway Diversity, and Strategies for Bioremediation. In *Microbial Biodegradation and Bioremediation* (pp. 365-394). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-85455-9.00006-0>
- Oziegbe, O., Oloduro, A. O., Oziegbe, E. J., Ahuekwe, E. F., & Olorunsola, S. J. 2021. Assessment of Heavy Metal Bioremediation Potential of Bacterial Isolates from Landfill Soils. *Saudi Journal of Biological Sciences*. 28(7), 3948-3956. <https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2021.03.072>
- Paul, A., Dey, S., Ram, D. K., & Das, A. P. (2023). Hexavalent Chromium Pollution and its Sustainable Management through Bioremediation. *Geomicrobiology Journal*. 41(4), 324-334. <https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2218377>
- Pradhan, S. K., Sahu, D. K., Singh, N. R., Kumar, U., & Thatoi, H. (2022). Unveiling of Metal-Tolerance Bacterial Consortia in Chromite Mine by Metagenomic Approaches. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1254880/v1>
- Putra, A., Arman, E., Fitri, W. E., Mayaserli, D. P., Putra, A. Y., & Febria, F. A. (2024). The Risks and Impacts of Chromium Metals on Human Health and Ecosystems. *Al-Kimia: Journal of Chemistry*, 12(1). <https://doi.org/10.24252/al-kimia.v12i1.47011>
- Rezaei, Z. & Moghimi, H. (2024). Fungal-Bacterial Consortia: A Promising Strategy for the Removal of Petroleum Hydrocarbons. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 280, 116543. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2024.116543>
- Sadiq, R., Kanwal, N., & Rehman, Y. (2023). In Silico Comparative Metagenomic Analysis of Microbial Communities of Chromium Contaminated Sites. *LGU Journal of Life Sciences*. 7(2). <https://doi.org/10.54692/lgujls.2023.0702264>
- 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.
- Santos, M. M. F., Grisi, C. V. B., Madruga, M. S., & Silva, F. A. P. (2024). Nutritional and Technological Potential of Chicken Feathers for the Food Industry. *British Poultry Science*. 12, 1-8. <https://doi.org/10.1080/00071668.2024.2365859>
- 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. <https://doi.org/10.3390/ijerph18052226>
- Sharma, P. (2021). Efficiency of Bacteria and Bacterial Assisted Phytoremediation of Heavy Metals: An Update. *Bioresour Technol*. 328, 124835. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124835>
- Singh, V., Singh, N., Verma, M., Kamal, R., Tiwari, R., Chivate, M. S., Rai, S. N., Kumar, A., Singh, A., Singh, M. P., Vamanu, E., & Mishra, V. (2022). Hexavalent-Chromium-Induced Oxidative Stress and the Protective Role of Antioxidants Against Cellular Toxicity. *Antioxidants*. 11(12), 2375. <https://doi.org/10.3390/antiox11122375>
- Soni, K., & Bagaria, A. (2024). Unlocking Nature's Clean-Up Crew: Marine *Bacillus* Species as Agents of Heavy Metal Detoxification. *Proceedings of the Indian National Science Academy*. 90, 594-602.

- <https://doi.org/10.1007/s43538-023-00228-z>
- Sreedevi, P. R., Suresh, K. & Jiang, G. (2022). Bacterial Bioremediation of Heavy Metals in Wastewater: A Review of Processes and Applications. *Journal of Water Process Engineering*. 48(1), 102884. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102884>
- Sun, Y. Y., Li, Q. S., Jiang, H. M., Li, Y. H., Zhu, M. S., Miao, L. K., Zhou, H. Z., Huang, J. W., Fan, X. X., & Wang, J. F. (2024). Microbial Communities Outperform Extracellular Polymeric Substances in the Reduction of Hexavalent Chromium by Anaerobic Granular Sludge. *Environmental Technology & Innovation*, 34, 103616. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2024.103616>
- Suteja, Y., Dirgayusa, I. G. N. P., & Purwiyanto, A. I. S. (2020). Chromium in Benoa Bay, Bali, Indonesia. *Marine Pollution Bulletin*. 153(1), 111017. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111017>
- Ukhurebor, K. E., Aigbe, U. O., Onyancha, R. B., nwanke, W., Osibote, O. A., Paumo, H. K., Ama, O. M., Adetunji, C. O., & Siloko, I. U. (2021). Effect of Hexavalent Chromium on The Environment and Removal Techniques: A Review. *Journal of Environmental Management*. 280, 111809. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.111809>
- Wang, J., Zhang, Y., Ding, Y., Song, H., Liu, T., Zhang, Y., Xu, W., & Shi, Y. (2023). Comparing the Indigenous Microorganism System in Typical Petroleum-Contaminated Groundwater. *Chemosphere*. 311(2), 137173. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.137173>
- Wise, J. P., Young, J. L., Cai, J., & Cai, L. (2022). Current Understanding of Hexavalent Chromium [Cr(VI)] Neurotoxicity and New Perspectives. *Environmental International*. 158, 106877. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106877>
- Yan, X., Yan, Z., Zhu, X., Zhou, Y., Ma, G., Li, S., Liu, X., & Zhang, M. (2023). Comparing Different Strategies for Cr(VI) Bioremediation: Bioaugmentation, Biostimulation, and Bioenhancement. *Sustainability*. 15(16), 12522. <https://doi.org/10.3390/su151612522>