

## **BAB II**

### **KAJIAN PUSTAKA**

#### **A. KAJIAN TEORI**

##### **1. Limbah Cair Industri Penyamakan Kulit**

Industri penyamakan kulit merupakan sektor yang memiliki nilai ekonomi signifikan, tetapi memberikan dampak besar terhadap lingkungan, terutama melalui limbah cair yang dihasilkannya. Di Indonesia, lebih dari 60% industri penyamakan kulit, terutama yang berskala kecil dan menengah, tidak cukup fasilitas pengolahan limbah, menyebabkan pencemaran lingkungan yang tinggi (BPS, 2022). Limbah cair ini mengandung berbagai polutan, termasuk bahan organik, amonia, sulfida, dan logam berat seperti kromium (Cr) dalam jumlah besar. Hal ini berdampak serius pada ekosistem perairan, mengancam biodiversitas, dan mencemari sumber air bersih.



**Gambar 2.1** Limbah Cair Industri Penyamakan Kulit LIK Magetan dengan Kandungan Cr  $\pm$  6 pada Inlet  
(Sumber : Dokumentasi pribadi 23 Juni 2026)

Pengelolaan limbah cair penyamakan kulit di Indonesia menghadapi banyak kendala. Salah satunya adalah kurangnya infrastruktur pengolahan limbah yang memadai. Teknologi tradisional seperti pengendapan kimia sering digunakan tetapi memiliki efisiensi rendah dalam mengurangi logam berat. Selain itu, regulasi pemerintah kurang ditegakkan, terutama pada Industri Kecil Menengah (IKM) yang mendominasi sektor penyamakan kulit. Tantangan lain adalah tingginya biaya teknologi Instalasi Pengolahan Limbah (IPAL), sehingga banyak industri enggan berinvestasi.

Kromium yang ditemukan dalam limbah cair penyamakan kulit diketahui dalam dua bentuk, yaitu Cr(III) dan Cr(VI). Cr(VI) adalah bentuk yang lebih beracun dan dapat menyebabkan kanker (karsinogenik), dan dapat mengkontaminasi air tanah melalui infiltrasi. Menurut World Health Organization (2021), konsentrasi Cr dalam air limbah yang dihasilkan dari proses penyamakan kulit di beberapa negara berkembang, termasuk Indonesia, mencapai rata-rata 2,0 mg/L, jauh di atas standar aman 0,05 mg/L. Kondisi ini menciptakan masalah kesehatan masyarakat, seperti gangguan ginjal dan kanker.

## **2. Logam Berat Kromium (Cr)**

Logam berat kromium (Cr) biasanya ditemukan dalam bentuk Cr(III) dan Cr(VI). Cr(III) berperan sebagai nutrisi mikro esensial dalam tubuh manusia, sedangkan Cr(VI) sangat toksik dan karsinogenik. Dalam limbah cair industri, Cr(VI) sering ditemukan dalam konsentrasi tinggi akibat penggunaan dalam proses penyamakan kulit dan elektroplating. Ion kromat ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) dan dikromat ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ )

adalah bentuk Cr(VI) yang paling umum di lingkungan, dengan sifat larut yang tinggi dan kemampuan penetrasi ke dalam tanah serta air permukaan.

#### **a. Struktur Kimia dan Rumus Molekul**

Dalam lingkungan air, Cr(III) cenderung membentuk ion kompleks seperti  $(\text{Cr}(\text{H}_2\text{O})_6)^{3+}$ . Struktur ini stabil dengan koordinasi oktahedral. Cr(VI) hadir sebagai ion kromat  $(\text{CrO}_4^{2-})$  dalam larutan dengan pH basa dan ion dikromat  $(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-})$  dalam larutan dengan pH asam. Kromat berbentuk tetrahedral dengan ikatan oksigen ganda, sedangkan dikromat memiliki dua tetrahedra yang saling terhubung. Gugus oksida  $(\text{O}^{2-})$  pada Cr(VI) memberikan sifat oksidatif yang sangat kuat, menjadikannya berbahaya bagi makhluk hidup. Cr(VI) mudah larut dalam air, sehingga memiliki kemampuan menyebar cepat di lingkungan. Gugus oksigen dalam struktur Cr(VI) juga berperan dalam reaksi kimia dengan bahan adsorben alami, seperti lignoselulosa dari daun bambu.

#### **b. Dampak Lingkungan**

Dalam beberapa kasus, Ada kemungkinan Cr(III) teroksidasi menjadi Cr(VI), yang memiliki efek toksik dan dapat menyebabkan kanker (WHO, 2021). Dinas Lingkungan Hidup Indonesia (2023) mencatat konsentrasi kromium dalam limbah cair industri penyamakan kulit mencapai 2,0 mg/L, jauh di atas ambang batas aman WHO 0,05 mg/L. Kondisi ini menunjukkan bahwa limbah cair penyamakan kulit menjadi salah satu kontributor utama pencemaran lingkungan di kawasan industri. Kromium dalam limbah cair yang dihasilkan oleh industri penyamakan kulit dapat mencemari udara, air, dan tanah, serta berpotensi membahayakan kesehatan manusia dan ekosistem (Kurniawati et al., 2017).

Paparan terhadap Cr(VI) dapat menyebabkan berbagai masalah kesehatan, seperti dermatitis, borok, dan edema. Selain itu, Cr(VI) juga dapat terakumulasi dalam organisme akuatik dan masuk ke rantai makanan, mengancam kesehatan manusia yang mengonsumsi produk perikanan yang terkontaminasi.

Studi terbaru menunjukkan bahwa kromium dari limbah cair penyamakan kulit menyumbang hingga 30% dari total polutan logam berat di perairan industri. Permasalahan utama dalam pengelolaan kromium adalah sifatnya yang mudah terakumulasi dan sulit diurai di lingkungan. Cr(VI) memiliki mobilitas tinggi di perairan sehingga sulit ditangani menggunakan metode konvensional seperti pengendapan kimia. Tantangan lainnya adalah kurangnya kesadaran dan regulasi yang ketat terhadap industri penyamakan kulit, terutama di negara berkembang. Selain itu, biaya tinggi untuk teknologi pengolahan limbah canggih seperti reverse osmosis atau elektrokoagulasi membuat industri kecil-menengah enggan berinvestasi.

### **3. Daun Bambu Petung**

Daun bambu petung (*Dendrocalamus asper*) memiliki potensi besar sebagai adsorben alami untuk menghilangkan logam berat, termasuk kromium Cr(VI), dari limbah cair. Kandungan senyawa seperti silika alami, lignin, dan selulosa pada daun bambu memungkinkan daya adsorpsi tinggi terhadap ion logam. Struktur mikropori pada daun bambu memperbesar luas permukaan kontak, sehingga meningkatkan efektivitas penjerapan polutan.



**Gambar 2.2.** Daun Bambu Petung (*Dendrocalamus asper*)  
(Sumber: Wicaksono et al., 2024)

Biomassa berbasis bambu mulai mendapatkan perhatian karena ketersediaannya yang melimpah dan sifatnya yang ramah lingkungan. Meski memiliki potensi besar, penelitian terkait penggunaan daun bambu sebagai adsorben menghadapi beberapa kendala. Salah satu tantangan utama adalah rendahnya efisiensi pada pH ekstrem yang sering ditemukan dalam limbah industri penyamakan kulit. Selain itu, stabilitas termal dan kemampuan regenerasi adsorben daun bambu perlu ditingkatkan agar dapat digunakan secara berulang. Tantangan lain adalah kurangnya studi yang mengintegrasikan daun bambu dalam sistem pengolahan limbah skala besar, mengingat sebagian besar penelitian masih terbatas pada kondisi laboratorium.

Dengan kandungan silika alami dan struktur mikropori, daun bambu memiliki potensi tinggi dalam mengadsorpsi kromium dari limbah cair. Pemanfaatan bahan yang murah dan melimpah seperti daun bambu diharapkan dapat memberikan alternatif pengolahan limbah cair yang efisien dan berkelanjutan, serta memberikan kontribusi pada solusi praktis bagi industri kecil

dan menengah dalam mengelola limbah cair secara lebih bertanggung jawab, sesuai dengan prinsip pembangunan berkelanjutan.

#### **4. Kromium (VI)**

Industri penyamakan kulit merupakan salah satu sektor padat pencemar karena menggunakan garam kromium dalam tahap penyamakan. Umumnya krom yang digunakan adalah Cr(III) (krom trivalen) dalam bentuk krom sulfat dasar, namun kondisi proses yang melibatkan oksidator dan pH tertentu dapat menyebabkan sebagian krom teroksidasi menjadi Cr(VI) (Maryudi et al., 2021). Cr(VI) jauh lebih berbahaya dibanding Cr(III) karena bersifat karsinogenik, mudah larut dalam air, dan dapat menembus membran biologis. Selama proses penyamakan kulit, hanya sekitar 60-70% kromium yang dapat diserap, dan sekitar 30-40% sisanya akan dibawa ke limbah industri penyamakan (Maryudi et al., 2021).

Keberadaan Cr(VI) menjadi persoalan serius, karena kualitas limbah cair industri kulit menurut Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Indonesia menetapkan kadar maksimum krom total hanya 2 mg/L. Hal ini berarti fraksi Cr(VI) sekecil apapun tetap berpotensi menyalahi ambang batas. Oleh karena itu, penanganan limbah penyamakan kulit harus diarahkan tidak hanya untuk mengurangi total krom, tetapi juga spesifik menargetkan Cr(VI).

Cr(VI) diketahui bersifat karsinogenik melalui mekanisme pembentukan radikal bebas dan kerusakan DNA. Pada ekosistem perairan, Cr(VI) menyebabkan kematian organisme akuatik pada konsentrasi rendah, serta akumulasi dalam rantai makanan. Pada manusia, paparan Cr(VI) dikaitkan dengan iritasi kulit, gangguan

hati, ginjal, hingga kanker paru-paru (Afandy & Sawali, 2024). Akibatnya, Cr(VI) merupakan masalah kesehatan dan lingkungan masyarakat di sekitar kawasan industri penyamakan.

Berbagai teknologi telah diterapkan untuk mengurangi Cr(VI) dari limbah cair, antara lain adsorpsi, membran, reduksi-koagulasi, dan presipitasi kimia. Metode presipitasi umumnya menghasilkan lumpur berbahaya yang menambah masalah sekunder. Oleh sebab itu, adsorpsi menjadi salah satu metode yang banyak diteliti karena biaya rendah, kemudahan aplikasi, dan ketersediaan bahan baku lokal.

Bambu merupakan tanaman yang melimpah di Indonesia dan berpotensi besar sebagai bahan baku adsorben. Abu daun bambu kaya silika, yang dapat dimodifikasi menjadi xerogel dengan porositas tinggi, cocok sebagai adsorben ion logam (Megasari et al., 2019). Selain itu, arang bambu yang diaktivasi kimia/termal menghasilkan karbon aktif yang memiliki luas permukaan yang besar.

## **5. Isoterm**

Isoterm adsorpsi merupakan model matematika yang digunakan untuk menjelaskan interaksi antara adsorbat (ion logam krom) dengan adsorben (arang aktif daun bambu petung yang diaktivasi dengan NaOH) pada permukaan padat. Isoterm Langmuir dan Freundlich adalah dua model isoterm yang sering digunakan. Sementara model Freundlich menunjukkan adsorpsi multilayer pada permukaan yang heterogen, model Langmuir menunjukkan adsorpsi monolayer pada permukaan adsorben yang homogen.

### Model Isoterm Langmuir

Model ini menggunakan asumsi bahwa adsorpsi terjadi secara monolayer pada permukaan adsorben yang homogen dengan jumlah situs aktif yang terbatas.

Persamaan linearisasi Langmuir adalah:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_{max} \cdot K_L} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (\text{Geankoplis, 1997})$$

Dengan kapasitas adsorpsi maksimum ( $q_{max}$ ) adalah (mg/g), konstanta Langmuir ( $K_L$ ) adalah (L/mg), dan konsentrasi kesetimbangan adalah ( $C_e$ ), dan  $q_e$  merupakan kapasitas adsorpsi kesetimbangan (mg/g). Plot  $C_e/q_e$  vs  $C_e$  menghasilkan garis lurus dengan slope =  $1/q_{max}$  dan intercept =  $1/(q_{max} \cdot K_L)$ .

### Model Isoterm Freundlich

Model Freundlich diaplikasikan untuk mengevaluasi kinerja arang aktif daun bambu petung dalam mengadsorpsi ion kromium Cr(VI). Pada penelitian ini, isoterm Freundlich dapat memberikan wawasan mengenai heterogenitas permukaan adsorben dan efisiensinya pada berbagai konsentrasi kromium. Model ini lebih fleksibel dan sering digunakan untuk permukaan adsorben yang heterogen.

Persamaan isoterm Freundlich adalah:

$$q_e = K_f \times C_e^{1/n} \quad (\text{Geankoplis, 1997})$$

Keterangan:

- a.  $Q_e$  = kapasitas adsorpsi kesetimbangan (mg/g)
- b.  $K_F$  = konstanta Freundlich yang berkaitan dengan kapasitas adsorpsi
- c.  $1/n$  = intensitas adsorpsi yang menggambarkan heterogenitas permukaan adsorben
- d.  $C_e$  = konsentasi kesetimbangan (mg/L)

Plot  $\log q_e$  vs  $\log C_e$  menghasilkan garis lurus dengan slope =  $1/n$  dan intercept =  $\log K_F$ . Nilai  $1/n < 1$  menunjukkan adsorpsi yang menguntungkan (favorable), sedangkan  $1/n > 1$  menunjukkan adsorpsi yang tidak menguntungkan.

## **B. KAJIAN TEORITIS**

Pencemaran kromium dalam limbah cair penyamakan kulit dapat diatasi dengan berbagai cara, termasuk adsorpsi menggunakan bahan alami. Penelitian oleh Sutyasmi & Susanto (2013) menunjukkan efektivitas bambu air dalam menyerap logam berat seperti Zn dan Pb dari limbah cair, meskipun studi ini masih terbatas pada skala laboratorium dan belum mengeksplorasi efektivitasnya terhadap kromium. Penelitian lain oleh Yusuf et al. (2023) menggunakan silika gel berbasis bambu untuk menyerap logam Fe dan menunjukkan hasil yang menjanjikan; penelitian ini juga menegaskan bahwa kandungan silika alami, lignin, dan selulosa pada daun bambu memungkinkan daya adsorpsi tinggi terhadap ion logam. Meskipun demikian, kajian tentang adsorpsi kromium menggunakan daun bambu sebagai biomaterial alami masih minim.

Widyastuti et al. (2023) mengevaluasi kemampuan bambu air berfungsi sebagai tanaman hiperakumulator untuk mengurangi konsentrasi logam berat Zn dalam leachate, dengan hasil efisiensi penyerapan mencapai 85%, bahkan pada uji lain adsorben berbasis bambu menunjukkan efisiensi hingga 89,7%. Fokus penelitian ini pada logam Zn, sehingga belum menjawab bagaimana efektivitasnya terhadap kromium. Sementara itu, Fachria et al. (2019) mengevaluasi efektivitas karbon aktif dari daun bambu kering dalam mengadsorpsi logam berat secara umum, namun belum mengkaji secara spesifik kapasitas adsorpsinya terhadap

Cr(VI). Kekurangan yang sama juga tampak pada penelitian Manurung et al. (2021), yang melaporkan bahwa arang bambu mampu menyerap Pb(II) dan Cr(III) dengan kapasitas sekitar 3,98 mg/g; walaupun belum menguji Cr(VI), hasil ini menunjukkan potensi besar bambu sebagai adsorben ion logam.

Di sisi lain, Megasari et al. (2019) menunjukkan bahwa abu daun bambu yang kaya silika dapat dimodifikasi menjadi xerogel dengan porositas tinggi sehingga berpotensi sebagai adsorben ion logam, sedangkan Maryudi et al. (2021) mengkaji proses oksidasi Cr(III) menjadi Cr(VI) pada tahap penyamakan kulit serta menemukan bahwa sekitar 30–40% kromium yang digunakan secara langsung dibuang ke limbah, memberikan dasar kuantitatif mengenai besarnya beban pencemaran Cr(VI) dari industri ini. Kurniawati et al. (2017) melengkapi gambaran tersebut dengan mengkaji dampak pencemaran kromium terhadap air, tanah, dan udara serta risikonya bagi kesehatan manusia dan ekosistem, sementara Afandy & Sawali (2024) secara lebih spesifik mengkaji dampak kesehatan akibat paparan Cr(VI) pada manusia, termasuk iritasi kulit, gangguan hati dan ginjal, hingga risiko kanker paru-paru.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penelitian tentang adsorben berbasis bambu untuk logam berat seperti Zn, Pb, Fe, dan Cr(III) sudah cukup banyak dilakukan, tetapi penelitian yang secara spesifik menargetkan Cr(VI) dengan menggunakan daun bambu petung (*Dendrocalamus asper*) masih sangat minim. Sebagian besar penelitian juga masih terbatas pada skala laboratorium sehingga belum tentu mencerminkan efektivitas dalam skala industri, dan belum tersedia data yang memadai mengenai kapasitas adsorpsi spesifik, kondisi

operasional optimal, serta mekanisme interaksi antara daun bambu dan ion kromium. Kesenjangan inilah yang mendasari perlunya penelitian lebih lanjut mengenai arang aktif daun bambu petung yang diaktivasi dengan NaOH untuk mengadsorpsi Cr(VI), dengan pendekatan kajian isoterm Langmuir dan Freundlich.

### **C. KERANGKA BERPIKIR**

Penelitian ini didasarkan pada masalah limbah cair dari industri penyamakan kulit yang mengandung konsentrasi logam berat Cr(VI) yang dapat mencemari lingkungan dan membahayakan kesehatan manusia. Permasalahan tersebut memerlukan solusi pengolahan ekonomis, hemat biaya, dan ramah lingkungan, sehingga penelitian ini mengarah pada pemanfaatan daun bambu petung (*Dendrocalamus asper*) yang diolah menjadi arang aktif melalui proses aktivasi NaOH. Kandungan silika alami, lignin, dan selulosa pada daun bambu diduga menjadi dasar kemampuan adsorpsinya terhadap ion Cr(VI), sehingga karakteristik gugus fungsi arang aktif perlu dibuktikan melalui uji FTIR sebelum dikaitkan dengan kinerja adsorpsinya. Massa adsorben dan waktu kontak adalah variabel bebas penelitian ini. Persentase penyisihan dan kapasitas adsorpsi adalah variabel terikat. Data hasil adsorpsi selanjutnya dianalisis dengan metode isoterm Langmuir dan Freundlich untuk mengidentifikasi pola interaksi antara ion Cr(VI) dan permukaan adsorben, serta diuji secara statistik menggunakan uji *Two-Way ANOVA* untuk mengukur efek massa adsorben, waktu kontak, dan interaksi terhadap efisiensi adsorpsi. Melalui alur berpikir tersebut, penelitian ini diharapkan dapat membuktikan efektivitas arang aktif daun bambu petung sebagai adsorben Cr(VI) sekaligus menentukan kondisi operasional yang optimal, sehingga dapat

menjadi solusi alternatif pengolahan limbah cair industri penyamakan kulit yang efektif dan berkelanjutan.

#### D. HIPOTESIS

Hipotesis penelitian ini adalah sebagai berikut berdasarkan rumusan masalah dan kerangka berpikir yang diuraikan:

1. Dampak yang dimiliki massa adsorben terhadap penyisihan Cr(VI)

$H_0$ : Variasi massa adsorben arang aktif daun bambu petung tidak berpengaruh signifikan terhadap penyisihan logam berat Cr(VI).

$H_a$ : Penyisihan logam berat Cr(VI) sangat dipengaruhi oleh perbedaan dalam massa adsorben arang aktif daun bambu petung.

2. Pengaruh waktu kontak terhadap penyisihan Cr(VI)

$H_0$ : Penyisihan logam berat Cr(VI) tidak banyak dipengaruhi oleh perbedaan waktu kontak.

$H_a$ : Variasi waktu kontak berpengaruh signifikan terhadap penyisihan logam berat Cr(VI).

3. Interaksi massa adsorben dan waktu kontak

$H_0$ : Massa adsorben dan waktu kontak terhadap penyisihan Cr(VI) tidak berkorelasi secara signifikan.

$H_a$ : Terdapat interaksi yang signifikan antara massa adsorben dan waktu kontak terhadap penyisihan logam berat Cr(VI).

4. Efektivitas adsorben

$H_a$ : Arang aktif daun bambu petung (*Dendrocalamus asper*) yang diaktivasi NaOH efektif menurunkan konsentrasi logam berat Cr(VI) dalam limbah

cair, ditunjukkan oleh nilai kapasitas adsorpsi ( $q_e$ ) dan persentase penyisihan yang terukur.