



Penghilangan Limbah Kromium dengan Teknik Kombinasi *Microbial Fuel Cell* SV-30 dan Adsorpsi Zeolit Y Hierarki

Alvin Romadhoni Putra Hidayat^{1*}, Pramastuti Adiar Rukmi¹, Salsabila¹,
Irmaliza Shafitri Caralin², Alvin Rahmad Widyanto²

¹Departemen Kimia, Fakultas Sains dan Matematika, Universitas Diponegoro, Jl. Prof. Soedarto S.H, Tembalang, Semarang 50275

²Departemen *Applied Chemistry*, *Shibaura Institute of Technology*, 3-7-5 Toyosu, Koto-ku, Tokyo 135-8548, Jepang

*Corresponding author: alvinromadhoniputra@lecturer.undip.ac.id

Received: 20 Mei 2025 / Accepted: 9 Juni 2025

Available online: 16 Juni 2025

Abstrak

Industri elektroplating menghasilkan limbah berbahaya seperti kromium heksavalen (Cr(VI)) yang dapat membahayakan kesehatan manusia. Salah satu metode potensial untuk mengatasi masalah ini adalah penggunaan *microbial fuel cell* biovolta-adsorpsi. Metode ini menggunakan konsorsium bakteri SV-30 sebagai biovolta untuk mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III), kemudian zeolit Y hierarki digunakan untuk mengadsorpsi Cr(VI) maupun Cr(III) hasil dari proses biovolta. Zeolit Y dimodifikasi menjadi zeolit Y hierarki dengan variasi konsentrasi NaOH sebesar 0,125 M, 0,25 M, dan 0,5 M guna meningkatkan kinerja adsorpsi, serta dikarakterisasi dengan XRD, FTIR, SEM, dan BET. Keunggulan dari metode ini adalah kemampuan bakteri SV-30 dalam mereduksi Cr(VI) sambil menghasilkan arus listrik. Setelah itu, kromium sepenuhnya diadsorpsi oleh zeolit Y dan zeolit Y hierarki. Hasil adsorpsi kromium menggunakan metode MFC berada di bawah ambang batas standar kualitas limbah cair sebagaimana tercantum dalam Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. KEP-51/MENLH/10/1995. Selain itu, metode ini juga menghasilkan potensi listrik sebesar 32 mW/m². Kinerja adsorpsi terbaik diperoleh pada modifikasi zeolit dengan NaOH 0,25 M, dengan kadar total kromium sebesar 0,21 mg/L dan kadar Cr(VI) sebesar 0,01 mg/L. MFC juga mampu menurunkan nilai COD dan BOD menjadi 55 dan 127 mg/L.

Kata Kunci: MFC-adsorpsi, Cr(VI), Konsorsium bakteri, Zeolit Y Hierarki, Desilikasi

1. Pendahuluan

Elektroplating secara luas digunakan sebagai metode pelapisan logam dalam berbagai industri, yang didefinisikan sebagai pelapisan logam dengan logam lain menggunakan arus listrik [1]. Banyak proses elektroplating menggunakan logam kromium [2]. Kromium merupakan logam berat yang memiliki beberapa spesies stabil seperti Cr(III) dan Cr(VI), di mana Cr(VI) bersifat karsinogenik dan genotoksik bagi makhluk hidup [3].

Metode yang paling banyak digunakan untuk pengolahan limbah kromium adalah *Microbial Fuel Cell* (MFC) [4]. Metode ini dapat menurunkan kadar logam berat B3 melalui proses bioremediasi [5]. Proses bioremediasi menggunakan beberapa jenis bakteri dari konsorsium SV-30 [6] yang memiliki kemampuan remediasi lebih baik dan efisien (99,92%) dibandingkan dengan mikroorganisme tunggal [7] seperti *Pseudomonas sp.* [8], *Escherichia coli* [9], dan *Shewanella sp.* [10].

Dalam proses bioremediasi, terjadi reduksi kimiawi oleh mikroba dengan metode kimia dan biologis yang merupakan proses sederhana dan memiliki potensi tinggi untuk mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) yang lebih ramah lingkungan. Selain itu, bakteri pada SV-30 juga mampu mendegradasi limbah organik lain seperti limbah amonium sebagai nutrisi dan menurunkan kadar COD serta BOD [11].

Selama proses reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III), dihasilkan elektron melalui aktivitas mikroba dalam sistem sel volta. Mikroorganisme dalam SV-30 juga mampu menghasilkan listrik sebesar 862,85 mA/m² dalam kondisi anaerob yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber bioenergi [12]. Konsentrasi awal dan konduktivitas Cr(VI) dapat memengaruhi laju reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III), produksi listrik, dan efisiensi coulombic dalam sistem MFC.

Namun, tidak semua Cr(VI) dapat direduksi menjadi Cr(III) oleh mikroba, sehingga diperlukan

Doi:

material adsorben lain untuk menurunkan kadar logam Cr(VI). Beberapa bahan adsorben yang dapat digunakan antara lain karbon aktif [13], campuran kompleks, logam hidrida, senyawa kimia hidrida, serta bahan berpori untuk adsorpsi [14]. Menurut Konwar dkk. [15], material adsorben yang aman dan efisien menjadi prasyarat dalam aplikasi pengolahan limbah. Metode adsorpsi menggunakan material berpori menjadi pilihan karena tidak menambahkan ion berbahaya. Dalam hal ini, material berpori yang memiliki keunggulan seperti volume pori besar dan porositas tinggi adalah zeolit, karena memiliki kekuatan yang baik dan luas permukaan yang besar [15].

Penelitian ini bertujuan untuk mengurangi limbah Cr(VI) yang terkontaminasi dalam sistem MFC, di mana bakteri SV-30 sebagai sel biovolta mampu mereduksi logam kromium sekaligus menghasilkan bioenergi. Energi ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif dalam proses reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III). Dibandingkan dengan bahan lainnya, zeolit merupakan material berpori luar biasa, berupa aluminosilikat dengan struktur yang teratur, volume pori tinggi, stabilitas termal yang baik, dan porositas yang tinggi [16].

Zeolit-Y digunakan sebagai adsorben untuk menurunkan kandungan kromium. Molekul Cr(VI) dalam bentuk $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ memiliki ukuran molekul yang lebih besar dibandingkan Cr(III), sehingga dapat meningkatkan performa adsorpsi. Pentingnya pori meso yang lebih besar [17], mendorong modifikasi zeolit Y menjadi Zeolit Y Hierarki melalui metode desilikasi untuk meningkatkan performa adsorpsi. Aktivitas dalam menurunkan logam berat Cr(VI) serta penurunan kadar COD dan BOD dianalisis dalam penelitian ini.

2. Metode Penelitian

Alat dan Bahan

Alat: Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini meliputi berbagai peralatan laboratorium seperti reaktor MFC, pengayak, erlenmeyer, gelas beaker, mortir penggiling, dan timbangan analitik. Selain itu, digunakan juga alat ukur seperti pH meter, AVO meter, pipet (ukuran, volume, dan tetes), gelas ukur, serta buret. Instrumen analisis yang digunakan mencakup spektrofotometer UV-Vis dan AAS. Untuk kebutuhan reaksi dan konektivitas listrik digunakan elektroda grafit, solder, dan timah. Proses pemanasan dilakukan dengan furnace, sedangkan alat bantu lainnya berupa tabung reaksi, corong, cawan arloji, dan pengaduk.

Bahan: Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi bakteri konsorsium SV-30, limbah amonia, dan limbah kromium sebagai sampel utama. Buffer fosfat 0,1 M pH 7, agar-agar, serta KCl digunakan sebagai media pendukung. Reagen kimia yang digunakan antara lain $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, HCl 1N dan 0,5N, NaOH, HNO_3 1M, dan H_2SO_4 1M. Aqua DM digunakan sebagai pelarut, aluminium foil sebagai pembungkus, serta kertas saring Whatman No. 41 untuk proses filtrasi.

2.1. Cara Kerja

2.1.1 Persiapan Larutan Standar Cr(VI) dan Kurva Kalibrasi Logam Kromium

Sebanyak 0,0226 gram $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ dilarutkan dalam labu ukur 1000 mL, kemudian ditambahkan 50 mL HNO_3 . Larutan Cr(VI) 8 ppm dipipet masing-masing sebanyak 37,5; 25; dan 12,5 mL, lalu dimasukkan ke dalam labu ukur 50 mL dan diencerkan hingga tanda batas dengan aquades, sehingga diperoleh larutan Cr(VI) dengan konsentrasi 6; 4; dan 2 ppm untuk pembuatan kurva kalibrasi.

2.1.2 Sintesis Zeolit Y

Sintesis adsorben zeolit Na-Y dilakukan melalui tiga tahap, yaitu pembuatan *seed gel*, *feedstock gel*, dan *gel overall*. Pembuatan *seed gel* dimulai dengan mencampurkan 23,991 gram aqua DM ke dalam botol polipropilena 50 mL yang berisi 3,469 gram NaOH dan 1,924 gram NaAlO_2 , lalu diaduk hingga homogen. Setelah itu, ditambahkan 17,518 gram NaAlO_2 ke dalam campuran dan diaduk selama 10 menit. Botol kemudian ditutup dan didiamkan pada suhu ruang selama 1 hari. Pembuatan *feedstock gel* dilakukan dengan cara serupa, tetapi dengan komposisi berbeda dan tanpa proses curing. Komposisinya adalah aqua DM 157,518 gram, NaOH 0,100 gram, dan NaAlO_2 13,851 gram. Kemudian ditambahkan 107,212 gram NaAlO_2 ke dalam campuran dan diaduk pada kecepatan 600 rpm. *Seed gel* yang telah dibuat ditimbang sebanyak 16,5 gram dan ditambahkan perlahan ke dalam *feedstock gel*, kemudian diaduk selama 20 menit dengan kecepatan 600 rpm. Setelah itu dilakukan proses hidrotermal. Sebelum dipanaskan, *gel overall* didiamkan terlebih dahulu selama 1 hari pada suhu ruang. Kemudian dilakukan hidrotermal pada suhu 100°C selama 7 jam. Hasil hidrotermal disaring menggunakan pompa vakum, dicuci dengan aqua DM hingga pH < 9, lalu dikeringkan pada suhu 110°C selama 12 jam [15].

2.1.3 Sintesis Zeolit Y Hierarki

Modifikasi zeolit Y menjadi zeolit Y hierarki dilakukan dengan metode desilikasi menggunakan larutan NaOH. Larutan NaOH diaduk pada kecepatan 500 rpm dan dipanaskan pada suhu tetap 65°C. Zeolit Y kemudian dimasukkan ke dalam larutan NaOH selama 30 menit dengan rasio padatan 3 gram per 100 mL larutan. Konsentrasi NaOH yang digunakan adalah 0,125 M, 0,25 M, dan 0,5 M. Proses desilikasi dihentikan dengan pendinginan (*quenching*) pada suhu ruang. Larutan hasil proses disaring menggunakan kertas saring Whatman No. 40 dan dicuci menggunakan aqua DM sebanyak tiga kali. Sisa padatan zeolit Y hierarki kemudian dikeringkan pada suhu 105°C selama 12 jam [17].

2.1.4 Preparasi Microbial Fuel Cell (MFC)

Aqua DM dididihkan lalu ditambahkan 3 gram gelatin dan 3 gram KCl untuk membuat jembatan garam. Larutan ini dituangkan ke dalam pipa berbentuk U dan didinginkan hingga mengeras.

Doi:

Elektroda karbon disiapkan dan direndam dalam larutan HNO_3 2 M selama 1 hari. Selang dan pompa aerator juga dipersiapkan. Bakteri SV-30 yang telah diaktivasi menggunakan media nutrisi luas disiapkan sebagai sumber biovolta.

2.1.5 Aplikasi Proses Bioremediasi pada Limbah Elektroplating

Dua reaktor disiapkan. Dalam reaktor anoda ditambahkan 80 mL bakteri konsorsium SV-30 dan larutan amonium 1000 mg/L dalam sukrosa, sementara dalam reaktor katoda ditambahkan 80 mL larutan Cr(VI). Ditambahkan pula adsorben berupa zeolit Y dan zeolit Y hierarki. Kedua reaktor dihubungkan dengan jembatan garam, dilengkapi aerator untuk kondisi aerobik dan AVO meter untuk pengukuran arus dan tegangan. Percobaan dilakukan dengan variasi waktu kontak (15, 30, 45, dan 60 menit) dan jenis adsorben (zeolit Y dan zeolit Y hierarki) menggunakan massa adsorben sebesar 0,3 gram. Setelah proses selesai, larutan diendapkan dan filtrat yang dihasilkan dianalisis menggunakan AAS dan UV-Vis. Selanjutnya, air hasil perlakuan diuji untuk kadar COD dan BOD menggunakan instrumen HI98193 DO Meter.

3. Hasil dan Pembahasan

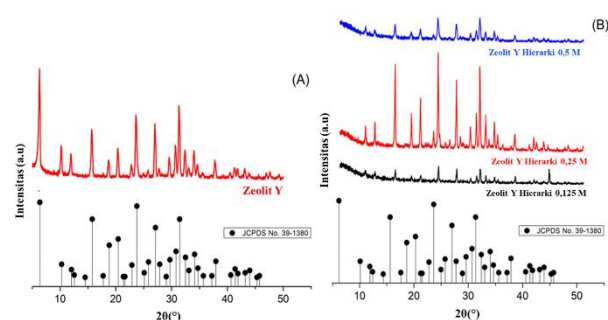
3.1. Sintesis Zeolit Na-Y dan Zeolit Y Hierarki

Zeolit Y disintesis berdasarkan metode yang dilakukan oleh Setyaningsih (2019). Sintesis zeolit Y dilakukan melalui tiga tahapan, yaitu pembentukan gel, proses hidrotermal, serta pencucian yang dilanjutkan dengan pengeringan untuk membentuk kristal zeolit. Selanjutnya, dilakukan *post-synthesis* (sintesis lanjutan) terhadap zeolit Y melalui proses desilikasi untuk menghasilkan zeolit Y hierarki. Zeolit Y dan zeolit Y hierarki yang dihasilkan kemudian dianalisis menggunakan XRD, SEM, FTIR, dan adsorpsi-desorpsi N_2 .

3.2. Karakterisasi XRD

Zeolit Y dianalisis menggunakan XRD untuk mengetahui puncak difraktogram khas dari fase kristalin zeolit Y serta tingkat kristalinitasnya. Difraktogram zeolit Y hasil sintesis dibandingkan dengan difraktogram standar JCPDS No. 39-1380. Berdasarkan Gambar 1(a), difraktogram zeolit Y hasil sintesis menunjukkan puncak difraksi khas pada $2\theta = 6,2^\circ$ [111], $10,1^\circ$ [220], $11,8^\circ$ [311], $20,2^\circ$ [440], $23,5^\circ$ [533], $26,9^\circ$ [642], $30,5^\circ$ [822], $31,2^\circ$ [555], dan $32,2^\circ$ [840]. Puncak-puncak khas tersebut sesuai dengan difraktogram standar JCPDS No. 39-1380.

Puncak kristal zeolit Y dengan intensitas tinggi muncul pada $2\theta \approx 6^\circ$, yang menunjukkan kristalinitas tinggi serta tidak terdapat fase lain selain zeolit Y (Setyaningsih, 2019). Pada Gambar 1(b), proses desilikasi pada zeolit Y menghasilkan intensitas difraktogram yang lebih tinggi dan masih sesuai dengan JCPDS No. 39-1380, yang menunjukkan bahwa zeolit Y hierarki berhasil disintesis dengan kristalinitas yang relatif tinggi.



Gambar 1: Pola XRD (A) Sintesis Zeolit Y dan (B) Zeolit Y Hierarki yang Dimodifikasi melalui Proses Desilikasi Berdasarkan JCPDS No. 39-1380

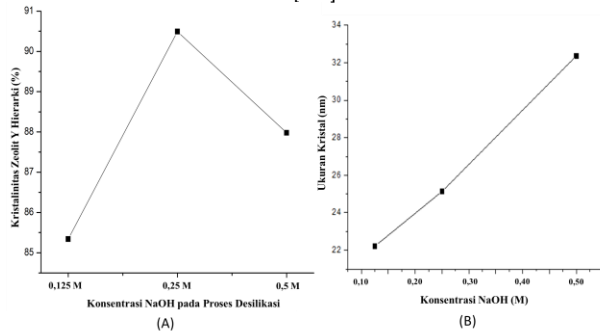
Penambahan NaOH pada Zeolit-Y dapat memengaruhi kristalinitas dari zeolit hierarki. Pada Gambar 2 ditunjukkan bahwa dengan ukuran kristal yang lebih besar (di atas $1 \mu\text{m}$), proses desilikasi dimulai dari bagian dalam karena kandungan alumina yang lebih tinggi berada di dekat permukaan luar zeolit. Ketika pembentukan mesopori dimulai, terlihat bahwa bahkan pada kristal yang lebih kecil, struktur mesopori juga mulai terbentuk. Hal ini menunjukkan adanya pengaruh gradien aluminium bahkan pada kristal berukuran kecil.

Pembentukan pori pada zeolit melalui proses desilikasi menghasilkan jalur difusi intrakristalin yang lebih pendek, dengan pori-pori yang lebih besar terhubung ke permukaan luar kristal, namun tetap mempertahankan sifat mikropori dan struktur khas zeolit, seperti yang diamati pada hasil XRD dan adsorpsi/desorpsi N_2 . Penurunan kristalinitas zeolit setelah desilikasi disebabkan oleh hilangnya silika dalam kerangka zeolit, yang menyebabkan kerusakan struktural atau kerusakan parsial pada struktur hasil desilikasi. Berdasarkan penelitian Li dkk. [18], proses desilikasi dapat meningkatkan kristalinitas Zeolit-Y, yang ditunjukkan dalam pola XRD zeolit Y hierarki dengan variasi NaOH 0,25 M yang memiliki kristalinitas lebih tinggi dibandingkan dengan konsentrasi 0,125 M. Namun, pada konsentrasi NaOH 0,5 M, terjadi cacat kristal yang tinggi sehingga menyebabkan penurunan kristalinitas Zeolit-Y [18].

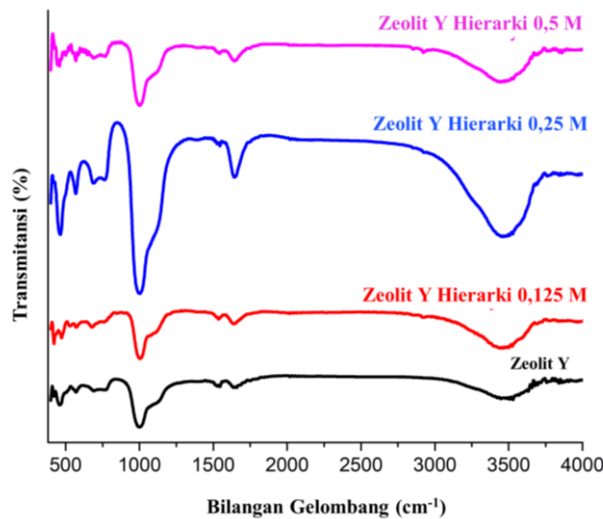
3.3. Karakterisasi FTIR

Hasil spektra puncak FTIR yang ditunjukkan pada Gambar 3 pada bilangan gelombang 3450 cm^{-1} menunjukkan adanya getaran regangan O-H, serta getaran tekukan gugus hidroksi (O-H) pada bilangan gelombang $1610\text{--}1639 \text{ cm}^{-1}$. Pada bilangan gelombang $1010\text{--}1033,88 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan getaran regangan asimetris dari gugus (Si-O-Al). Selanjutnya, pada $457\text{--}462 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan getaran tekukan dari gugus (Si-O-Si) atau (O-Si-O), dan pada $663,53 \text{ cm}^{-1}$ menunjukkan getaran regangan simetris dari (Si-O-Al). Hasil ini sesuai dengan hasil yang dilaporkan oleh Li (2005) yang melakukan pengujian FTIR terhadap zeolit Y. Zeolit Y hierarki yang disintesis menunjukkan spektra getaran regangan O-H yang lebih tajam pada bilangan gelombang 3464 cm^{-1} , getaran tekukan

dari hidroksil (OH) pada bilangan gelombang 1535–1637 cm^{-1} . Pada bilangan gelombang 1000 cm^{-1} menunjukkan getaran regangan asimetris dari (Si-O-Al). Kemudian pada 472–420 cm^{-1} menunjukkan getaran tekukan dari (Si-O-Si) atau (O-Si-O), dan pada 678 cm^{-1} menunjukkan getaran regangan simetris dari (Si-O-Al). Keberadaan kelompok fungsi khas zeolit Y menunjukkan bahwa zeolit Y hierarki telah berhasil disintesis [19].



Gambar 2: Karakteristik Kristal Zeolit-Y Hierarki (a) Kristalinitas (b) Ukuran Kristal



Gambar 3: Spektra FTIR Zeolit Y dan Zeolit Y Hierarki Hasil Sintesis

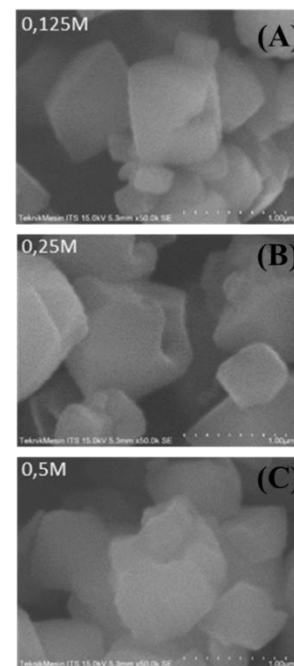
3.4. Karakterisasi SEM

Karakterisasi dengan Mikroskop Elektron Pindai (SEM). Hasil mikrogram SEM pada zeolit Y Hierarki digunakan untuk melihat keteraturan morfologinya. Hasil SEM zeolit Y (Gambar 4) menunjukkan keteraturan yang baik dengan adanya struktur oktahedral [20]. Pengaruh konsentrasi NaOH dapat menyebabkan beberapa cacat pada struktur zeolit.

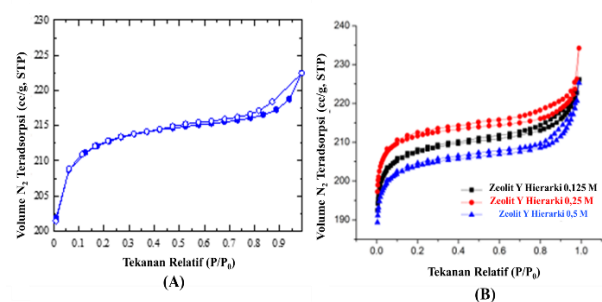
3.5. Karakterisasi Luas Permukaan dan Struktur Pori

Hasil adsorpsi-desorpsi gas N_2 pada Gambar 5 menunjukkan bahwa material zeolit Y memiliki isoterm tipe I, sedangkan Zeolit Y Hierarki memiliki isoterm tipe I dan IV. Grafik isoterm tipe I menunjukkan jumlah adsorpsi gas N_2 pada tekanan relatif rendah ($P/P_0 < 0,3$) yang mengindikasikan bahwa zeolit Y dan Zeolit Y Hierarki memiliki karakteristik pori mikro (mikropori). Jumlah gas N_2

yang dapat teradsorpsi dalam rentang tekanan relatif (P/P_0) 0,1–0,3 menunjukkan bahwa adsorbat telah membentuk lapisan monolayer pada permukaan zeolit Y dan Zeolit Y Hierarki. Sementara itu, ketika tekanan meningkat ($P/P_0 = 0,7$), terjadi penurunan adsorpsi gas N_2 karena lapisan pori internal dari zeolit Y tidak lagi dapat diisi oleh adsorbat [15]. Ketika tekanan mencapai 1 atm, material zeolit Y sudah tidak mampu lagi mengadsorpsi gas N_2 , sehingga tidak terjadi peningkatan kapasitas adsorpsi gas N_2 . Isoterm tipe IV menunjukkan adanya lengkungan histeresis, yang mengindikasikan keberadaan pori meso (mesopori) pada rentang tekanan relatif ($P/P_0 = 0,2$ –0,9).



Gambar 4: Citra SEM Zeolit Y Hierarki dengan Variasi Konsentrasi NaOH (a) 0,125 M; (b) 0,25 M; (c) 0,5 M



Gambar 5: Isoterm Adsorpsi N_2 dari (a) Zeolit Y dan (b) Zeolit Y Hierarki

Zeolit Y hierarki yang berhasil disintesis membentuk pori berukuran meso, seperti ditunjukkan pada Tabel 1, yaitu dengan adanya peningkatan volume mesopori (V_{meso}) dan diameter pori pada zeolit Y hierarki. Proses desilikasi menghasilkan pori sekunder berukuran meso akibat pengurangan gugus Si dalam struktur zeolit Y [17]. Tabel 1 menunjukkan bahwa proses desilikasi membentuk mesopori. NaOH dengan konsentrasi 0,25 M memberikan hasil terbaik dalam

Doi:

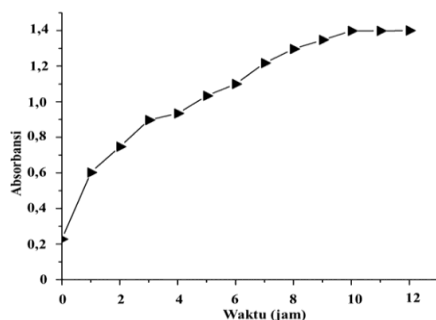
hal luas permukaan dan volume pori, karena mampu mengatur ulang struktur berdasarkan rasio Si/Al dalam kerangka zeolit [18]. Sementara itu, konsentrasi NaOH yang lebih tinggi, yaitu 0,5 M, dapat menyebabkan cacat kristal yang mengakibatkan penurunan luas permukaan dan volume pori, sebagaimana ditunjukkan pada citra SEM.

Tabel 1: Karakteristik Luas Permukaan dan Struktur Pori

Material	Luas Permukaan (m ² /g)		Volume Pori (cm ³ /g)		
	V _{mikro}	V _{meso}	V _{total}	V _{mikro}	V _{meso}
Zeolit Y	656,13	0,313	0,026	0,344	
Zeolit Y Hierarki 0,125M	972,10	0,311	0,039	0,349	
Zeolit Y Hierarki 0,25M	1069	0,322	0,042	0,363	
Zeolit Y Hierarki 0,5M	956,90	0,313	0,038	0,351	

3.6. Aktivitas Pertumbuhan Bakteri Konsorsium SV-30

Kurva pertumbuhan bakteri digunakan untuk menentukan fase-fase dalam pertumbuhan bakteri. Pada Gambar 6 ditunjukkan adanya peningkatan pertumbuhan konsorsium bakteri hingga 9 jam yang merupakan fase eksponensial, namun fase lag kurang dapat diamati. Hal ini disebabkan karena pengukuran dilakukan setiap satu jam, sehingga perubahan yang terjadi dalam waktu kurang dari satu jam tidak terdeteksi [21]. Pada jam ke-10, fase stasioner menunjukkan bahwa proses metabolisme bakteri berada pada kondisi maksimum.

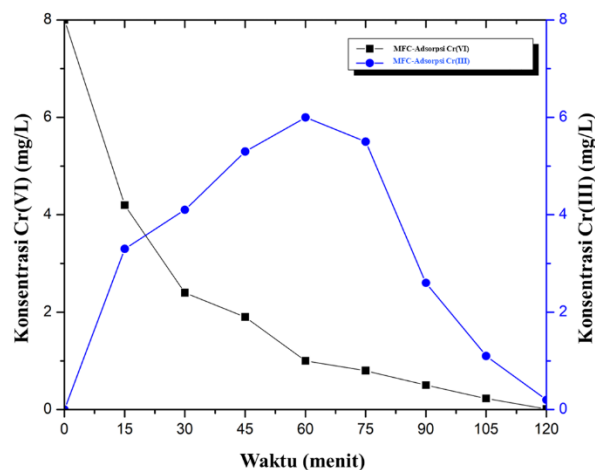


Gambar 6: Kurva Pertumbuhan Konsorsium SV-30

3.7. Aktivitas Reduksi Kromium (VI)

Reduksi kadar Cr(VI) dilakukan dengan metode kombinasi biovolta-adsorpsi menggunakan variasi adsorben zeolit Y dan zeolit Y hierarki, seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Reduksi Cr (VI) dengan metode biovolta bekerja melalui mekanisme yang mereduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) dalam rentang waktu 15–60 menit. Namun, pada menit ke-60 hingga 120 terjadi proses adsorpsi, di mana Cr(III) yang terbentuk akan teradsorpsi dan berikatan

dengan situs bermuatan negatif pada zeolit. Metode kombinasi adsorpsi-MFC menghasilkan kandungan total Cr sebesar 0,21 mg/L dan Cr (VI) sebesar 0,01 mg/L, yang sesuai dengan standar baku mutu limbah cair berdasarkan Keputusan MENLH No. KEP-51/MENLH/10/1995 (di bawah 0,6 mg/L).



Gambar 7: Profil Konsentrasi Cr(VI)

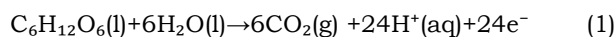
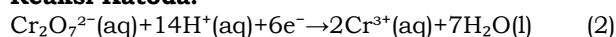
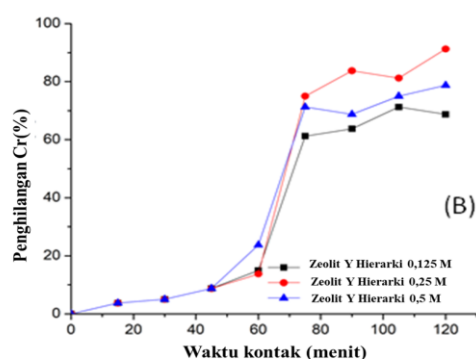
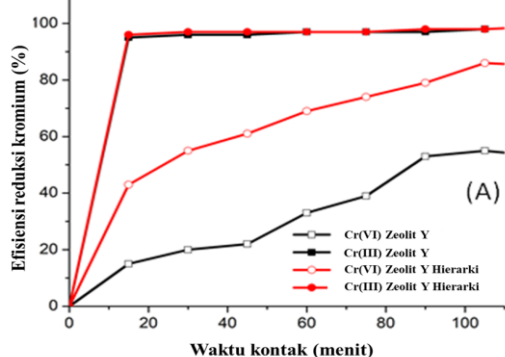
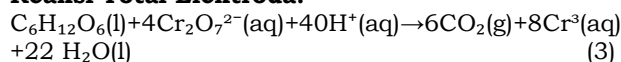
Hasil adsorpsi Cr(III) pada zeolit Y dapat dilihat pada Gambar 8(a), yang menunjukkan bahwa efisiensi penurunan kadar Cr(III) lebih tinggi dibandingkan dengan adsorpsi Cr(VI). Hal ini disebabkan oleh muatan positif pada Cr(III) yang mudah berikatan dengan muatan negatif formal Al-O pada struktur zeolit Y, serta adanya sisi aktif negatif dari zeolit tersebut. Zeolit Y hierarki memiliki kemampuan adsorpsi Cr(VI) yang lebih besar karena memiliki lebih banyak mesopori. Sifat fisik dari kombinasi mikropori dan mesopori juga memengaruhi penangkapan Cr(VI) dalam bentuk Cr₂O₇²⁻. Oleh karena itu, peran penting dari proses reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III) dalam sistem MFC adalah untuk mempermudah zeolit dalam mengadsorpsi Cr (III), serta proses desilikasi pada zeolit meningkatkan kinerja adsorpsi terhadap Cr (VI). Pada Gambar 8(b) ditunjukkan kinerja adsorpsi Cr dengan variasi konsentrasi NaOH. Hasil terbaik diperoleh pada konsentrasi 0,25 M NaOH karena memiliki luas permukaan dan volume pori yang paling tinggi, sehingga berpengaruh signifikan terhadap peningkatan kinerja adsorpsi.

3.8. Densitas Daya pada Reduksi Cr(VI)

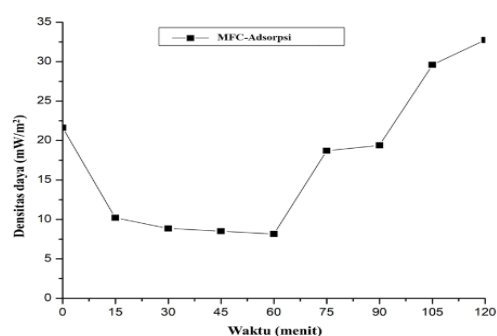
Profil densitas daya sebanding dengan potensial listrik yang dihasilkan. Potensial listrik ini dipengaruhi oleh konsentrasi ion Cr(III) dan Cr(VI), sesuai dengan Persamaan Nernst. Pada Gambar 9, terlihat bahwa densitas daya mengalami penurunan selama 0–15 menit, yang menunjukkan terjadinya reduksi Cr(VI) menjadi Cr(III). Selanjutnya, pada rentang waktu 15–60 menit, proses reduksi Cr(VI) mencapai titik kesetimbangan. Setelah 60 menit, terjadi peningkatan densitas daya yang disebabkan oleh penurunan konsentrasi total Cr(III) dan Cr(VI). Fenomena ini dapat dijelaskan melalui Persamaan Nernst dan reaksi elektrokimia sebagai berikut:

Reaksi Anoda:

Doi:

**Reaksi Katoda:****Reaksi Total Elektroda:**

Gambar 8: Kinerja Zeolit Y dan Zeolit Y Hierarki (a) Profil Efisiensi Cr(VI) dan Cr(III) (b) Penghilangan Total Cr Profil Konsentrasi Cr(VI)



Gambar 9: Aktivitas Reduksi Cr (VI) Ditinjau dari Profil Densitas Daya

MFC ini dapat digunakan sebagai biosensor untuk mendeteksi kadar Cr (VI), sebagaimana dilakukan oleh Ravikumar dkk. [22]. Deteksi Cr (VI) dapat diamati melalui tegangan listrik yang dihasilkan, yang berbanding lurus dengan kerapatan daya. Penurunan kerapatan daya mengindikasikan terjadinya reduksi Cr (VI) menjadi Cr (III). Selanjutnya, peningkatan intensitas daya menunjukkan penurunan kadar Cr (VI) dan Cr (III) akibat proses adsorpsi oleh zeolit Y.

3.9. Penurunan Kadar COD dan BOD

Limbah cair dari proses MFC dianalisis kadar COD dan BOD-nya menggunakan instrumen HI98193 DO Meter. Hasil uji karakteristik limbah cair dapat dilihat pada Tabel 2. Berdasarkan hasil analisis awal, nilai BOD sebesar 832 mg/L dan COD sebesar 964 mg/L. Setelah proses, diperoleh nilai BOD akhir sebesar 127 mg/L dan COD sebesar 55 mg/L. Nilai BOD yang dihasilkan masih berada di atas baku mutu, sedangkan kadar COD telah berada di bawah baku mutu sesuai dengan Peraturan Gubernur Jawa Timur No. 52 Tahun 2014.

Tabel 2: Analisis Kadar COD dan BOD

Parameter	Kadar Awal (mg/L)	Kadar Akhir (mg/L)	Baku Mutu (mg/L)
BOD	832	55	100
COD	964	127	250

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil yang diperoleh, metode MFC berhasil digunakan untuk menghilangkan kandungan kromium dari limbah cair proses pelapisan listrik (electroplating). Kandungan kromium yang berhasil dihilangkan mencapai 0,21 mg/L dan Cr (VI) sebesar 0,01 mg/L, yang sesuai dengan baku mutu limbah cair berdasarkan Keputusan Menteri Lingkungan Hidup No. KEP-51/MENLH/10/1995 (di bawah 0,6 mg/L). Metode ini juga menghasilkan potensi listrik sebesar 32 mW/m². Hasil terbaik dari proses adsorpsi Cr diperoleh dengan menggunakan Zeolit Y hierarki 0,25M yang memiliki luas permukaan dan volume pori terbesar. Selain itu, metode ini juga mampu menurunkan kadar COD dan BOD, dengan nilai akhir BOD sebesar 55 mg/L dan COD sebesar 127 mg/L.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada kepada Fakultas Sains dan Matematika Universitas Diponegoro atas hibah penelitian yang diberikan dengan Surat Penugasan Pelaksanaan Penelitian Nomor: 6/UN7.F8/HK/V/2025.

Daftar Pustaka

- [1] Liu. C., Fiola. N., Pochc. J., Villaescusaa. I. 2016. A new technology for the treatment of chromium electroplating wastewater based on biosorption. *Journal of Water Process Engineering*. 11: 143-151.
- [2] Rubcumintara. T. 2014. Chromium and iron removal for hard chrome bath recycling using eggshell sorbent. *J. Clean Energy Technol.* 2: 158-162
- [3] Mahmoud. A. M., Abd El-Twab. S. M. 2017. Caffeic acid phenethyl ester protects the brain against hexavalent chromium toxicity by enhancing endogenous antioxidants and modulating the JAK/STAT signaling pathway. *Biomedicine & Pharmacotherapy*. 91: 303-311.

Doi:

- [4] Slate. A. J., Whitehead. K. A., Brownson. D. A. C., Banks. C. E. 2019. Microbial fuel cells: An overview of current technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 101: 60-81.
- [5] Parkash A. 2016. Microbial fuel cells: a source of bioenergy. *J Microb Biochem Technol*. 8:247-55.
- [6] Wang. X., Zheng. Q., Yuan. Y., Hai. R., Zou. D. 2017. Bacterial community and molecular ecological network in response to Cr₂O₃ nanoparticles in activated sludge system. *Chemosphere*. 188: 10-17.
- [7] Sharma. S., Malaviya. P. 2016. Bioremediation of tannery wastewater by chromium resistant novelfungal consortium. *Ecological Engineering*. 91: 419 - 425.
- [8] Shen H-B, Yong X-Y, Chen Y-L, Liao Z-H, Si R-W, Zhou J. 2014. Enhanced bioelectricity generation by improving pyocyanin production and membrane permeability through sphorolipid addition in *Pseudomonas aeruginosa* inoculated microbial fuel cells. *Bioresour Technol*. 167:490-4.
- [9] Mehdinia A, Ziaei E, Jabbari A. 2014. Facile microwave-assisted synthesized reduced graphene oxide/tin oxide nanocomposite and using as anode material of microbial fuel cell to improve power generation. *Int J Hydrog Energy*. 39:10724-30.
- [10] Lee Y, Bae S, Moon C, Lee W. 2015. Flavin mononucleotide mediated microbial fuel cell in the presence of *Shewanella putrefaciens* CN32 and iron-bearing mineral. *Biotechnol Bioprocess Eng*. 20:894-900.
- [11] Chunyan. L., Tongyang. L., Wanjun. L., Hailian Z., Yi. C., Dapeng L. 2017. Efficient degradation of chlorimuron-ethyl by a bacterial consortium and shifts in the aboriginal microorganism community during the bioremediation of contaminated-soil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. 139: 423 - 430.
- [12] Tamboli. E., Eswari. J. S. 2019. Microbial Fuel Cell Configurations. *Microbial Electrochemical Technology*. 407-435.
- [13] Kim KY, Yang WL, Evans PJ, Logan BE. 2016. Continuous treatment of high strength wastewaters using air-cathode microbial fuel cells. *Bioresour Technol*. 221:96-101.
- [14] Hwang, Hyun Tae dan Varma, Arvind. 2014. Hydrogen Storage for Fuel Cell Vehicles. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 5:42-48.
- [15] Konwar, R J, dan De, M. 2016. Nitrogen modified templated carbons for energy application: Effect of templates and nitrogen precursors. *International Journal of Hydrogen Energy*. 30:1-10.
- [16] Setyaningsih. E. P., Rachman. A. R., Martia. U. T. I., Widyanto. A. R., Iqbal. R.M., Widiastuti. N. 2019. The MnO₂/Zeolite NaY Catalyzed Oxidation of CO Emission in Catalytic Converter System. *Materials Science Forum*. 964: 199-208.
- [17] Feliczak-Guzik, A. 2017. Hierarchical Zeolite: Synthesis and catalytic properties. *Microporous and Mesoporous Material*, 259:33-45.
- [18] Li, W., Zheng, J., Luo, Y., Tu, C., Zhang, Y., & Da, Z. (2017). Hierarchical Zeolite Y with Full Crystallinity: Formation Mechanism and Catalytic Cracking Performance. *Energy and Fuels*, 31: 3804-3811.
- [19] Li, G. 2005. FT-IR studies of zeolite materials: characterization and environmental applications. Iowa : University of Iowa.
- [20] Kayadoe V. 2013. Sintesis dan Karakterisasi Karbon Teremplat Zeolit NaY dengan Prekursor Sukrosa sebagai material Penyimpan Hidrogen". Thesis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.
- [21] Mohanakrishna G, Abu-Reesh IM, Al-Raoush RI, He Z. 2018. Cylindrical graphite based microbial fuel cell for the treatment of industrial wastewaters and bioenergy generation. *Bioresour Technol*. 247:753-8.
- [22] Ravikumar. K. V. G., Sudakaran. S.V., Pulimi. M., Natarajan. C., Mukherjee. A. 2018. Removal of hexavalent chromium using nano zero valent iron and bacterial consortium immobilized alginate beads in a continuous flow reactor. *Environmental Technology & Innovation*. 12: 104 - 114.