



## Uji Coba Resin Penukar Ion Indion 225 H sebagai Adsorben pada Penurunan Kadar Kromium di Dalam Air Limbah

### Testing Ion Exchange Resin Indion 225 H as Adsorbent in Reducing Chromium Concentration in Wastewater

NURYOTO<sup>1, 2\*</sup>, DIMAS ALAMUDIN<sup>1</sup>, ALDI ABDULLAH<sup>1</sup>, RAFIIF NUR TAHTA BAGASKARA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, Banten, 42435, Indonesia

<sup>2</sup>Magister Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, Banten, 42435, Indonesia

<sup>3</sup>Life of Science Departement, Faculty of art and science, University of Toronto, 33 Willcocks Street, Suite 1016V, Toronto, ON, M5S 3E8, Canada

\*[nuryoto@untirta.ac.id](mailto:nuryoto@untirta.ac.id)

#### ARTICLE INFO

##### Article history:

Received 24 February 2024

Accepted 23 May 2024

Published 31 January 2025

##### Keywords:

Kinetika

Fenomena

Absorpsi

Kromium

Integrasi

#### ABSTRACT

Chromium is extensively used in the leather tanning process, with only 60 - 70% utilized, leaving the remainder as waste. Effective waste management is essential to mitigating environmental impact. This study aims to conduct tests and understand the effectiveness of Indion 225 H as an adsorbent for removing chromium from wastewater by analyzing variables such as the mass of adsorbent per wastewater volume and contact time. The study seeks to optimize chromium removal and develop a mathematical model to explain the adsorption process. Experiments were conducted using a batch system with adsorbent masses ranging from 0.1 to 0.6 grams per 20 ml of wastewater and contact time from 3 to 5 hours. Results indicate that Indion 225 H can reduce chromium content in the solution by 33%, with optimal conditions being a contact time of 5 hours and adsorbent chromium content in the solution by 33%, with optimal conditions being 0.6 grams per 20 ml of wastewater. The Langmuir Isotherm model accurately describes the adsorption phenomena, and the adsorption kinetics follow a second-order model.

#### INFORMASI ARTIKEL

##### Histori artikel:

Diterima 24 Februari 2024

Disetujui 23 Mei 2024

Diterbitkan 31 Januari 2025

##### Kata kunci:

Kinetika

Fenomena

Penjerapan

Kromium

Integrasi

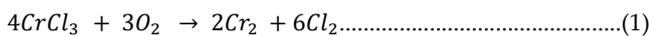
#### ABSTRAK

Kromium sering digunakan dalam proses penyamakan kulit, dengan hanya 60-70% yang dikonsumsi, selebihnya akan menjadi limbah. Oleh karena itu, untuk menghindari dampak negatif terhadap lingkungan, maka pengolahan limbah pada penyamakan kulit mutlak diperlukan. Tujuan dari penelitian ini adalah melakukan pengujian dan memahami fenomena yang terjadi pada Indion 225 H sebagai adsorben pada penjerapan kromium yang terkandung di dalam air limbah dengan mengintegrasikan variabel massa adsorben tiap volume limbah dan waktu kontak terhadap penurunan kromium, serta melakukan analisis model matematika untuk mengetahui fenomena dan kecepatan penjerapan yang terjadi pada penjerapan kromium berbasis adsorben Indion 225 H. Pengamatan dilakukan menggunakan sistem batch dengan massa adsorben 0,1-0,6 gram/20 ml larutan limbah dan waktu kontak 3-5 jam. Hasil observasi menunjukkan bahwa Indion 225 H mampu menurunkan 33% kadar kromium yang terkandung di dalam larutan yang dicapai pada waktu kontak 5 jam dan kadar adsorben 0,6 gram/20 ml larutan limbah. Adapun untuk model yang cocok guna menggambarkan fenomena dan kecepatan penjerapan kromium adalah model isotherm Langmuir dan kinetika kecepatan penjerapan mengikuti model kinetika orde 2

1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air merupakan salah satu kebutuhan vital manusia, selain pangan dan papan. Air seringkali digunakan dalam kehidupan sehari-hari sebagai air minum, memasak, mencuci, dan mandi (Alamsyah & Asyfiradayati, 2024). Air yang baik adalah air yang bersih dan terhindar dari zat pencemar berbahaya (Earnestly, 2018). Menurut Tanjung et al. (2024) bumi menyediakan 97,5% air, tetapi hanya 2,5% air yang tersedia dengan kualitas baik yang layak dan dapat dikonsumsi manusia. Jika dari sejumlah kecil tersebut (2,5%) juga tercemar oleh zat berbahaya dan tidak segera ditindak lanjuti, maka akan menjadi masalah tersendiri (Muta'ali & Satlita, 2024). Pada dekade industrialisasi sekarang ini, setiap proses industri akan menghasilkan limbah yang notabene nantinya akan dibuang ke lingkungan. Salah satu zat yang muncul di dalam air limbah sebagai akibat proses industri adalah zat berupa kromium. Pada dasarnya logam kromium mempunyai bilangan oksidasi 2+, 3+, dan 6+ (Rahayu et al., 2021). Kromium yang berbahaya adalah jenis kromium bilangan oksidasi 6+ atau sering dikenal dengan kromium heksavalen (Rahayu et al., 2021). Menurut Murti & Sugihartono (2020) kromium heksavalen mempunyai tingkat toksisitas 100 kali lipat daripada kromium *trivalent* dengan tingkat paparan dan kronisnya tinggi, serta dapat menyebabkan inhalasi kronis pada saluran pernapasan, bronkitis, penurunan fungsi paru, pneumonia, gatal serta nyeri pada hidung, mempunyai kapasitas oksidatif yang kuat, dan dapat berdampak pada kematian sel tubuh. Selain itu, kromium juga dapat menyebabkan kerusakan biotik air (Jati et al., 2024), seperti organisme (Pratiwi, 2020). Tetapi kromium *trivalent* yang notabene kurang berbahaya dapat berubah menjadi kromium heksavalen jika berinteraksi dengan oksidator (Asmadi et al., 2009) seperti yang dapat terlihat pada Persamaan (1).



Sumber kromium dapat berasal dari industri pewarna kain, industri penyamakan kulit, pelapisan listrik, rumah tangga, pertanian, pertambangan, perikanan, pariwisata, dan kegiatan lainnya (Pratiwi, 2020). Namun, penyumbang kromium terbesar berasal dari industri penyamakan kulit. Menurut Rahayu et al. (2021), dari proses penyamakan kulit, kromium yang terserap atau terkonsumsi hanya 60–70% di dalam prosesnya, sedangkan 30–40% terbawa oleh air dan dibuang sebagai limbah. Data tersebut menunjukkan bahwa kadar buangan kromium pada limbah air industri penyamakan kulit sangat besar, dan perlu dilakukan tindakan lebih lanjut agar memenuhi baku mutu limbah sebelum dibuang ke badan air serta tidak mencemari lingkungan. Hal ini dilakukan dalam rangka untuk menghindari dampak negatif yang ditimbulkan akibat adanya kromium di dalam air. Menurut Peraturan Kemenkes No. 2 Tahun 2023, ambang batas maksimal kromium total (Cr) yang diperbolehkan sebelum dibuang ke lingkungan adalah sebesar 0,05 mg/l (Kemenkes RI, 2023).

Secara teoritis kadar kromium dapat diturunkan dengan banyak cara di antaranya adalah metode adsorpsi,

filtrasi-koagulasi, dan *reverse osmosis* (Rahayu et al., 2021). Proses penurunan kadar kromium di dalam air limbah pada penelitian ini menggunakan metode penjerapan atau adsorpsi dengan media adsorben. Metode adsorpsi dipilih karena mudah dan sederhana dalam prosesnya, serta hasil penurunan kadar yang tinggi. Sebagai contoh pada penelitian Satriaji & Hendrasarie (2024) yang melakukan penurunan kadar kromium dengan metode adsorpsi, mampu mendegradasi kromium hingga mencapai 94% dari kondisi awalnya. Pada proses penjerapan atau adsorpsi, sebenarnya banyak jenis adsorben yang dapat dipakai seperti zeolit (Purwanti, 2023; Aisyah et al., 2024), karbon aktif (Satriaji & Hendrasarie, 2024; Rahman & Muldarisnur, 2024), dan resin penukar ion (Akmal et al., 2023; Putri et al., 2023; Soemargono & Saputro, 2005). Pada penelitian ini digunakan adsorben berupa resin penukar ion jenis Indion 225 H. Penggunaan resin penukar ion pada penelitian ini didasarkan karena resin penukar ion mempunyai daya jerap yang tinggi, harganya relatif murah, dan mudah dalam perlakuannya. Karakteristik beberapa resin penukar ion yang sering digunakan sebagai adsorben adalah seperti Amberlite IRC 120 Na (Akmal et al., 2023; Putri et al., 2023). dan Dowex SBR-P (Soemargono & Saputro, 2005), serta Indion 225 H (adsorben pada penelitian) yang tersaji pada Tabel 1.

Tabel 1. Karakteristik adsorben resin penukar ion

Karakteristik	Jenis Adsorben		
	Indion 225 H* (Penelitian ini)	Amberlite IRC 120 Na**	Dowex SBR-P***
Kapasitas Pertukaran Ion (KPK), meq/ml	1,8	2,0	1,3
Ukuran Partikel, mm	0,3–1,2	0,3–1,18	0,3–1,2
Rentang pH Operasional	0–14	0–14	0–14
Gugus Fungsional	H <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>

Sumber: \* Bulletin R003R (n.d); \*\* Dupont (2023); \*\*\* Dow Chemical Company (1998)

Berdasarkan Tabel 1, terlihat bahwa karakteristik dari Indion 225 H mempunyai kemampuan tukar kation (KPK) sebesar 1,8 meq per ml, hampir menyamai bahkan lebih besar dari adsorben penukar ion yang seringkali digunakan seperti Amberlite IRC 120 Na dan Dowex SBR-P yang mempunyai masing-masing KPK 2 dan 1,3 meq/ml. Padahal dari segi harga, resin Indion 225 H hampir 50% lebih murah dibandingkan Amberlite IRC 120 Na dan Dowex SBR-P. Jadi secara ekonomi dengan kondisi operasi yang sama, proses penurunan kadar menggunakan Indion 225 H akan lebih ekonomis.

Secara teoritis, pada umumnya proses penjerapan kromium menggunakan resin penukar ion pada umumnya dan resin penukar ion Indion 225 H merupakan penjerapan jenis *chemisorption* yang mengikuti konsep pada Persamaan (2) (Putri et al., 2023).



Keterangan:

- R-H = Resin dengan gugus aktif H<sup>+</sup>
- K<sup>+</sup> = Kation misalnya kromium

Kajian terkait penyerapan kromium sebenarnya bukan hal yang baru dan telah banyak dilakukan oleh peneliti sebelumnya seperti yang dilakukan oleh Helmi (2006) yang menggunakan media jamur merang, Habibi et al. (2015) dan Gherasim et al. (2011) yang menggunakan membran, dan Gomase et al. (2024) yang menggunakan superadsorben *Chitosan-Barbituric acid hydrogel*. Namun, yang membedakan penelitian ini jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya adalah belum ditemukannya penelitian yang menggunakan resin penukar ion Indion 225 H sebagai adsorben penyerapnya. Peneliti yang telah menggunakan resin penukar ion Indion 225 H dalam risetnya di antaranya adalah Phojaroen et al. (2024) pada penyerapan *cellulosic xylose*, Surasani et al. (2013) dan Mulya & Rathod (2017) sebagai katalis, dan Gawale & Marathe (2007) sebagai adsorben penyerapan kobalt. Jika mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh Gawale & Marathe (2007) dengan Indion 225 H yang mampu mendegradasi kobalt dengan signifikan serta karakteristik yang tersaji pada Tabel 1, yang mana resin penukar ion 225 H mempunyai karakteristik yang hampir sama dengan adsorben resin penukar ion yang telah digunakan pada penelitian penurunan kadar kromium sebelumnya yaitu Amberlite IRC 120 Na dan Dowex SBR-P, maka kemungkinan besar resin penukar ion Indion 225 H juga akan mampu menurunkan kadar kromium yang terkandung pada air limbah tersebut.

**1.2 Tujuan Penelitian**

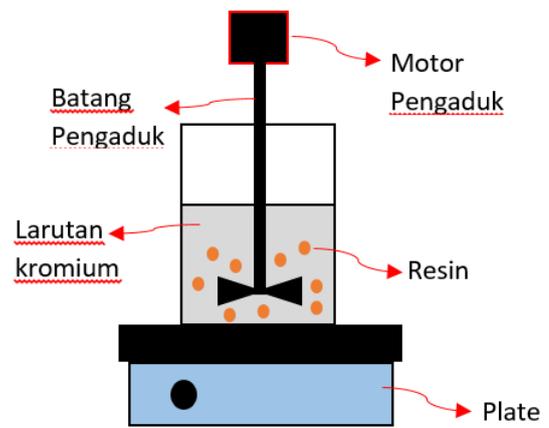
Tujuan khusus dari penelitian ini adalah melakukan pengujian dan memahami fenomena yang terjadi pada Indion 225 H sebagai adsorben pada penyerapan kromium yang terkandung di dalam air limbah dengan mengintegrasikan variabel massa adsorben tiap volume limbah dan waktu kontak terhadap penurunan kromium, serta melakukan analisis model matematika untuk mengetahui fenomena dan kecepatan penyerapan yang terjadi pada penyerapan kromium berbasis adsorben Indion 225 H. Sedangkan tujuan umum yang akan dicapai dengan dilakukan penelitian ini adalah memberikan informasi awal kepada publik terkait penggunaan adsorben resin penukar ion jenis Indion 225 H sebagai adsorben alternatif dalam menurunkan kadar kromium di dalam air. Jadi hasil penelitian ini dapat menjadi acuan awal ketika ingin dilakukan riset adsorben 225 H lanjutan dan pengembangan ke depan.

**2. METODE**

**2.1 Alat dan Bahan**

Limbah air yang digunakan pada penelitian ini merupakan limbah sintesis yang mengandung kromium valensi 3 ( $Cr^{3+}$ ), yang dibuat dengan melarutkan senyawa  $CrCl_3 \cdot 6H_2O$  ke dalam akuades dengan kadar 10 ppm (10 mg/L). Hal ini dilakukan untuk mendapatkan informasi yang lebih spesifik terkait kinerja adsorben Indion 225 H jika digunakan untuk menurunkan ion kromium yang terkandung di dalam air limbah tanpa dipengaruhi oleh pengotor lainnya yang ada pada air limbah tersebut. Untuk resin penukar ion Indion 225 H dibeli dari marketplace, yang mana sebelum digunakan dicuci dahulu dengan air akuades,

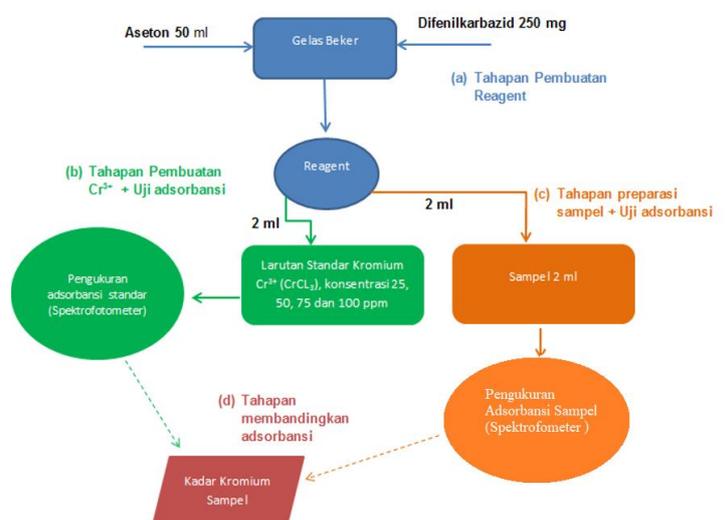
dan selanjutnya dikeringkan di dalam oven pada suhu 110 °C. Proses uji coba penyerapan kromium menggunakan resin Indion 225 H menggunakan sistem *batch* berpengaduk. Untuk detail skematik peralatan penelitian pada penelitian ini tersaji pada Gambar 1.



Gambar 1. Skematik peralatan penelitian

**2.2 Prosedur Penelitian**

Larutan kromium sebanyak 20 ml dimasukkan ke dalam gelas kimia dengan ukuran 250 ml (hal ini dilakukan untuk menghindari terlemparnya cairan pada saat dilakukan pengadukan menggunakan *over head stirrer*). Langkah selanjutnya adalah memasukkan resin penukar ion Indion 225 H dengan jumlah massa resin pada rentang 0,1–0,6 gram (mengacu pada penelitian Nurafriyanti et al., 2017; Wulandari et al., 2023). Tahap selanjutnya pengaduk dijalankan dengan kecepatan pengadukan 300 rpm selama waktu yang telah ditentukan yaitu 3–5 jam ((Nuryoto et al., 2021; Ratnaningsih, 2022; Emelda et al., 2013; Radinta et al., 2016). Ketika waktu kontak telah mencapai waktu yang ditentukan, proses adsorpsi dihentikan dan diambil sampel untuk dilakukan analisis kromium sisa menggunakan spektrofotometer jenis *Thermo Scientific Genesis 30 Visible Spectrophotometer*. Untuk tahapan analisis kromium tersaji pada Gambar 2.



Gambar 2. Alur tahapan analisis sampel

Guna mengetahui unjuk kerja adsorben, parameter yang diamati adalah efisiensi adsorpsi yang dihitung dengan menggunakan Persamaan (3).

$$\mu = \frac{C_{r_0} - C_{r_t}}{C_{r_0}} \times 100\% \dots\dots\dots(3)$$

Keterangan:

- $\mu$  = efisiensi penjerapan kromium ( $Cr^{3+}$ ), %
- $C_{r_0}$  = kadar Kromium ( $Cr^{3+}$ ) mula-mula, mg/l
- $C_{r_t}$  = kadar Kromium ( $Cr^{3+}$ ) pada waktu kontak tertentu, mg/l

Data hasil analisis sampel juga dipergunakan untuk memahami fenomena dan proses adsorpsi (Aravindhan *et al.*, 2024), apakah penjerapan kromium menggunakan adsorben Indion 225 H masuk jenis isoterm Langmuir (Persamaan (4)) atau isoterm Freundlich (Persamaan (5)) (Aravindhan *et al.*, 2024; Velarde *et al.*, 2024). Di samping itu juga dicoba memprediksi kinetika penjerapan yang terjadi yaitu menggunakan pendekatan kinetika orde 1 (Persamaan (6)–(7)) dan kinetika orde 2 (Persamaan (8)–(9)) sehingga nilai konstanta kecepatan penjerapan yang diperoleh dapat digunakan sebagai acuan desain peralatan ketika ingin dikembangkan lebih lanjut dalam skala yang lebih besar.

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \dots\dots\dots(4)$$

Keterangan:

- $C_e$  = konsentrasi kesetimbangan *adsorbate*, mg/L
- $q_e$  = jumlah *adsorbate* yang terjerap, mg/g
- $q_m$  = kapasitas penjerapan maksimum, mg/g
- $K_L$  = konstanta Langmuir, L/mg

$$\ln(q_e) = \ln(K_F) - \frac{\ln(C_e)}{n} \dots\dots\dots(5)$$

Keterangan:

- $C_e$  = konsentrasi kesetimbangan *adsorbate*, mg/l
- $q_e$  = jumlah *adsorbate* yang terjerap, mg/g
- $n$  = eksponensial Freundlich
- $K_f$  = konstanta Freundlich, (mg/g) (L/mg)<sup>n</sup>

**Kinetika penjerapan orde 1**

$$-\frac{dC_r}{dt} = kC_r \dots\dots\dots(6)$$

Persamaan (6) diintegalkan, maka akan menjadi Persamaan (7).

$$\ln C_r = \ln C_{r_0} - k t \dots\dots\dots(7)$$

**Kinetika penjerapan orde 2**

$$-\frac{dC_r}{dt} = kC_r^2 \dots\dots\dots(8)$$

Persamaan (8) diintegalkan, maka akan menjadi Persamaan (9).

$$-\frac{1}{C_r} = -\frac{1}{C_{r_0}} - k t \dots\dots\dots(9)$$

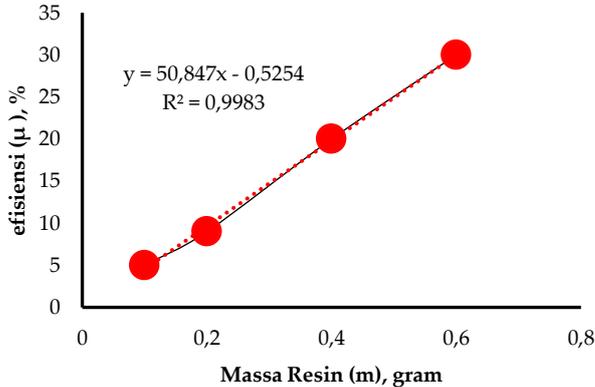
Keterangan:

- $k$  = jam<sup>-1</sup> (orde 1) dan L mg<sup>-1</sup> jam<sup>-1</sup> (orde 2)
- $t$  = waktu kontak, jam
- $-\frac{dC_r}{dt}$  = laju penjerapan, mg L<sup>-1</sup> jam<sup>-1</sup>

**3. HASIL DAN PEMBAHASAN**

**3.1 Pengaruh Massa Adsorben Resin Penukar Ion Indion 225 H**

Hasil pengamatan yang dilakukan pada rentang massa resin 0,1–0,6 gram/20 ml pada penurunan kadar kromium tersaji pada Gambar 3. Pada Gambar 3 terlihat bahwa seiring meningkatnya massa resin yang dimasukkan ke dalam larutan kromium, maka semakin banyak ion kromium yang terjerap. Kondisi ini terbukti dengan meningkatnya persentase efisiensi yang dihasilkan dengan semakin banyaknya massa resin yang dimasukkan ke dalam sistem proses adsorpsi. Secara berurutan efisiensi yang dihasilkan pada massa resin 0,1 gram, 0,2 gram, 0,4 gram, dan 0,6 gram tiap 20 ml air limbah (atau 5 g/l, 10 g/l, 20 g/l, dan 30 g/l limbah) adalah 5%, 9%, 20%, dan 30%. Jika dikaitkan dengan konsep yang tertulis pada Persamaan (1), maka peningkatan efisiensi yang dihasilkan cukup logis. Ketika semakin banyak resin yang dimasukkan, maka jumlah situs aktif secara total yang akan dipertukarkan dengan ion kromium juga semakin besar. Imbasnya semakin banyak ion kromium yang terjerap oleh resin (resin penukar ion Indion 225 H). Fenomena serupa juga dihasilkan oleh penelitian yang dilakukan oleh Wahid *et al.* (2023) dan Phojaroen *et al.* (2024) pada penjerapan kromium dan kobalt, yang mana peningkatan dosis adsorben yang dimasukkan ke dalam sistem adsorpsi berdampak pada jumlah kromium dan *Cellulosic Xylose* yang terjerap. Pada penelitian Wahid *et al.* (2022) dilakukan dengan menggunakan adsorben berupa resin penukar ion Amberlite IRC 120 Na pada rentang 40–120 gram/300 ml limbah atau 133,33–400,00 g/l limbah, yang mana penjerapan kromium terbaik diperoleh pada dosis adsorben 120 gram/300 ml dengan efisiensi penjerapan sebesar 97,86%. Hasil berbeda yang dilakukan oleh Phojaroen *et al.* (2024) yang menggunakan adsorben berbasis Indion 225 H dengan dosis adsorben 0,5–3 gram dengan konsentrasi *Cellulosic Xylose* (*adsorbate*) di dalam air sebesar 10 g/L, yang mana penjerapan *adsorbate* yang terjerap tertinggi sebesar 1,766 g *adsorbate*/g adsorben yang diperoleh pada kadar Indion 225 H sebesar 2,5 gram.



Gambar 3. Pengaruh massa resin terhadap persentase efisiensi removal kromium dengan waktu kontak 3 jam

Jika dilakukan *trendline* menggunakan Microsoft Excel pada Gambar 3, maka akan menjadi suatu persamaan matematika yang dapat digunakan untuk menggambarkan korelasi antara penambahan resin terhadap peningkatan efisiensi yang diperoleh (lihat Persamaan (10)).

$$\mu = 50,847 m - 0,5254 \dots\dots\dots(10)$$

Persamaan (10) cukup membantu dalam rangka memprediksi efisiensi *removal* kromium yang dihasilkan terhadap jumlah resin yang dimasukkan di luar dari rentang massa resin yang diamati. Hasil penggunaan Persamaan (10) seperti yang tersaji pada Tabel 2 terlihat bahwa hasil efisiensi yang dihasilkan mendekati efisiensi data percobaan. Deviasi antara efisiensi data dan hasil hitungan di bawah 10%, bahkan pada massa resin di atas 0,4 gram deviasinya kurang dari 1%. Jika mengacu Persamaan (10), agar kromium turun sampai dengan baku mutu limbah yang diijinkan untuk dibuang ke lingkungan yaitu 0,05 mg/l atau efisiensi yang dihasilkan harus 99,5%, maka adsorben resin Indion 225 H yang harus dimasukkan ke dalam sistem adalah 1,97 gram. Tetapi hasil perhitungan ini masih perlu validasi dengan data percobaan pada massa resin tersebut (1,97 gram). Namun, kemungkinan besar dengan massa resin 1,97 gram akan berpotensi mampu mendegradasi kromium sampai memenuhi baku mutu air limbah khususnya kromium. Dugaan ini didasarkan pada penelitian yang dilakukan oleh Wu *et al.* (2023) yang melakukan penjerapan kromium dengan adsorben berupa adsorben berbasis *iron material* dengan massa adsorben sebesar 3,5 gram dan mampu menyerap sampai dengan 97,20% dari kondisi awal.

Tabel 2. Hasil perhitungan efisiensi menggunakan Persamaan (10)

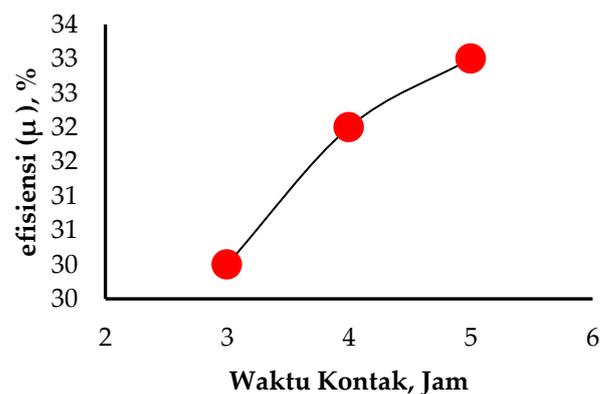
Massa resin, (gram)	Efisiensi Data Percobaan	Efisiensi Persamaan (3)	Deviasi, (%)
0,1	5	4,6	8,81
0,2	9	9,6	7,16
0,4	20	19,8	0,93
0,6	30	30,0	0,06

Di lain sisi, jika mengacu pada penelitian Soemargono & Saputro (2005) dengan adsorben resin anion Dowex SBR-P, kemampuan resin Indion 225 H ternyata mempunyai kinerja yang cenderung setara walaupun sedikit lebih kecil. Pada penelitian Soemargono & Saputro (2005) untuk mendapatkan efisiensi 40,64% membutuhkan dosis adsorben 25 gram/liter larutan, sedangkan pada penelitian ini untuk mendapatkan efisiensi 30% membutuhkan dosis 0,6 gram/20 ml larutan atau 30 gram/larutan. Kinerja adsorben penukar ion memang dipengaruhi banyak faktor di antaranya konsentrasi awal larutan yang akan dijerap, kecepatan pengadukan, dan karakteristik adsorben resin sendiri. Tetapi jika mengacu pada harga resin, resin Indion 225 H mempunyai harga yang jauh lebih murah dibandingkan resin anion Dowex SBR-P. Berdasarkan penelusuran referensi, harga Indion 225 H 3 kali lebih murah dibandingkan anion Dowex SBR-P (monotaro.id, 2023; Indotrading, 2023), sehingga penggunaan Indion 225 H dapat dijadikan adsorben alternatif untuk menurunkan kadar

kromium di dalam air limbah. Oleh karena itu, agar performa Indion 225 H meningkat perlu dilakukan observasi lebih lanjut guna mendapatkan kinerja yang maksimal.

### 3.2 Pengaruh Waktu Kontak

Gambar 4 menunjukkan bahwa semakin lama waktu kontak, maka diikuti dengan peningkatan perolehan persentase efisiensi *removal* kromium yang dihasilkan. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pada waktu kontak 3 jam, 4 jam, dan 6 jam diperoleh efisiensi *removal* kromium sebesar 30%, 32%, dan 33%. Hasil ini memberikan informasi bahwa semakin lama waktu kontak, maka potensi bertemunya kromium dengan sisi aktif pada adsorben semakin besar, dan imbasnya proses penjerapan akan semakin baik. Hasil pada penelitian ini mempunyai kecenderungan yang sama dengan yang dilakukan oleh Soemargono & Saputro (2005), yang mana ketika waktu kontak ditingkatkan, maka penjerapan kromium yang terjadi di dalam sistem mengalami peningkatan yaitu 1,49%, 11,51%, 11,91%, 38,68%, dan 40,64% yang diperoleh pada masing-masing waktu kontak 20 menit, 30 menit, 40 menit, 50 menit, dan 60 menit.



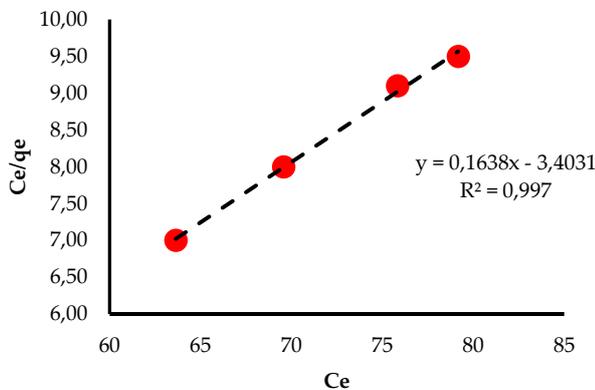
Gambar 4. Pengaruh waktu kontak terhadap persentase efisiensi *removal* kromium dengan massa resin 0,6 gram

Jika mengacu pada efisiensi dan keekonomisan operasional dengan mempertimbangan energi yang digunakan, maka kondisi yang paling efisien pada penelitian ini dicapai pada waktu kontak 3 jam dengan efisiensi 30%. Hal ini didasarkan kepada perbedaan persentase efisiensi *removal* kromium antara waktu kontak 3 jam dan 5 jam yang hanya beda 3% saja, sementara konsumsi energi khususnya *power* pengadukan pada jeda waktu 2 jam otomatis cukup besar. Atas dasar tersebut, ke depan perlu dilakukan kajian dengan waktu penjerapan di bawah 3 jam dan di atas 5 jam. Langkah tersebut dilakukan guna mendapatkan informasi yang lebih detail bagaimana sebenarnya kecenderungan kinerja resin penukar ion Indion 225 H terhadap efisiensi persentase *removal* kromium (Cr<sup>3+</sup>) pada rentang waktu di bawah 3 jam dan sampai waktu berapa lama resin penukar ion Indion 225 H mencapai kondisi jenuh. Informasi ini cukup penting untuk mendapatkan kondisi operasi yang lebih efektif, efisien, dan ekonomis, serta mengetahui kapan waktu regenerasi atau penggantian resin Indion 225 H.

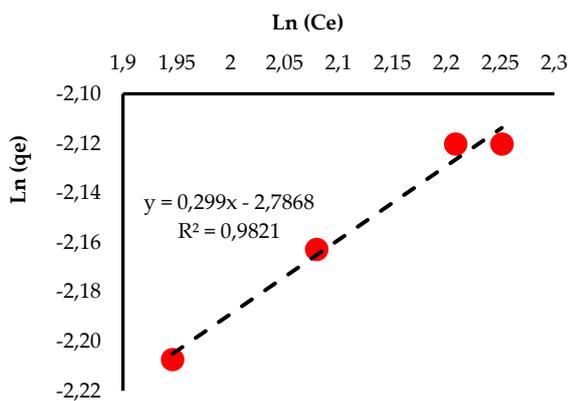
Ketika diperhatikan lebih lanjut terhadap Gambar 3, Tabel 2, dan Gambar 4, ternyata penambahan massa resin ke dalam sistem penjerapan dirasa lebih efektif dan efisien. Penambahan massa resin berdampak signifikan terhadap efisiensi *removal* kromium yang dihasilkan dibandingkan memperlama waktu kontak. Berdasarkan data tersebut, maka untuk meningkatkan perolehan efisiensi *removal* kromium, lebih baik memperbesar dosis adsorben dibandingkan memperlama waktu kontak.

**3.3 Isotherm Models**

Berdasarkan Gambar 5 (a) dan (b), serta Tabel 3, harga R<sup>2</sup> paling tinggi dihasilkan oleh model isoterm Langmuir yaitu 0,9970 (mendekati 1). Hasil ini memberi arti bahwa model isoterm Langmuir lebih cocok untuk menggambarkan fenomena yang terjadi selama penjerapan ion kromium pada permukaan aktif adsorben resin penukar ion 225 H dibandingkan model isoterm Freundlich.



(a)



(b)

Gambar 5. Hasil *plotting* menggunakan (a) model Langmuir dan (b) model Freundlich yang dilakukan pada waktu penjerapan 5 jam

Hasil pada penelitian ini mempunyai kesamaan dengan yang dilakukan oleh Debnath & Ghosh (2008), Ouass et al. (2017), dan Ahmed et al. (2024) pada penjerapan kromium menggunakan adsorben berbasis titanium oksida, *sodium polyacrylate*, dan *acrylic acid-grafted-sawdust* yang mana model isoterm Langmuir yang mempunyai R<sup>2</sup> yang lebih mendekati

1 dibandingkan isoterm Freundlich. Untuk lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 3. Parameter yang dihasilkan berdasarkan *isotherm models*

<i>Isotherm Models</i>	Persamaan	Parameter
Langmuir	$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m}$	R <sup>2</sup> <b>0,9970</b>
		q <sub>m</sub> (mg/g) 6,105
		K <sub>L</sub> (L/mg) 0,4064
Freundlich	$\ln(q_e) = \ln(K_f) - \frac{\ln(C_e)}{n}$	R <sup>2</sup> <b>0,9821</b>
		n 3,345
		K <sub>f</sub> 0,0616
		(mg/g)(L/mg) <sup>n</sup>

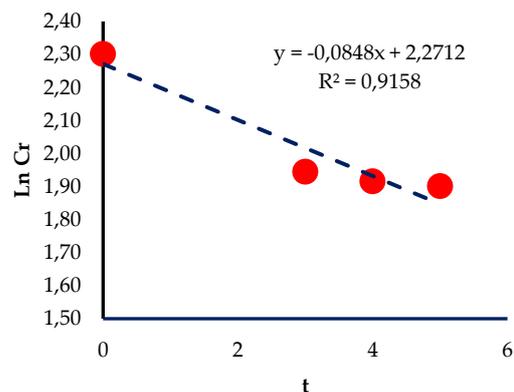
Tabel 4. Komparasi harga K<sub>L</sub> dan K<sub>f</sub> untuk Cr<sup>3+</sup>

K <sub>L</sub>	R <sup>2</sup>	K <sub>f</sub>	R <sup>2</sup>	Jenis adsorben	Referensi
0,406	0,997	0,0616	0,9821	Indion 225 H	Penelitian ini
0,091	0,986	4,737	0,854	Titanium Oksida	Debnath & Ghosh (2008)
0,920	0,998	10,63	0,295	<i>Sodium Polyacrylate</i>	Ouass et al. (2017)
0,005	0,983	0,1396	0,871	<i>acrylic acid-grafted-sawdust</i>	Ahmed et al. (2024)

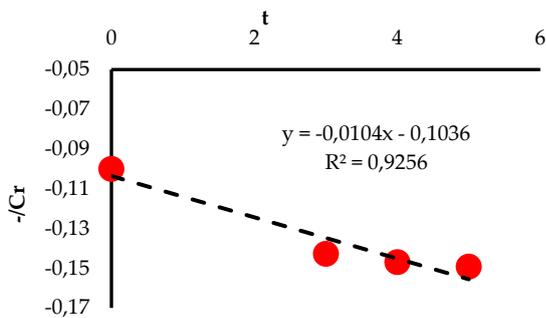
Pada saat suatu proses adsorpsi mengikuti model isoterm Langmuir, maka proses penjerapan yang terjadi merupakan penjerapan *interface-chemisorption* (Miri & Narimo, 2022). Hasil permodelan isoterm ini diperkuat oleh Persamaan (2), yang mana penjerapan kromium dengan resin penukar ion terjadi secara chemisorpsi. Berbasis hasil perhitungan Tabel 3, yang mana diperoleh sebesar 6,105 mg/g, maka kapasitas maksimum penjerapan Indion 225 H cukup baik yaitu mampu menyerap 6,105 mg *adsorbate* (kromium) per gram adsorben. Oleh karena itu, dapat dikatakan resin penukar ion Indion 225 H cukup baik digunakan sebagai adsorben pada penjerapan kromium.

**3.4 Kinetika Penjerapan**

Hasil perhitungan penentuan kinetika penjerapan menggunakan model kinetika penjerapan orde 1 dan orde 2 tersaji pada Gambar 6(a) dan 6(b).



(a)



(b)

Gambar 6. Hasil *plotting* kinetika penjerapan menggunakan (a) orde 1 dan (b) orde 2 yang dilakukan pada waktu penjerapan 5 jam

Pada Gambar 6 (a) dan (b) terlihat bahwa orde 2 mempunyai harga R<sup>2</sup> lebih mendekati 1 dibandingkan R<sup>2</sup> pada orde 1 yaitu masing-masing 0,9256 dan 0,9158, walaupun bedanya memang sangat kecil. Data ini memberikan arti bahwa laju penjerapan kromium dengan adsorben Indion 225 H cenderung mengikuti model kinetika penjerapan orde 2. Hasil pada penelitian ini selaras dengan observasi yang dilakukan oleh Debnath & Ghosh (2008) yang melakukan penjerapan kromium *trivalent* (Cr<sup>3+</sup>) menggunakan adsorben berbasis titanium oksida. Ketika dilakukan *plotting* antara orde 1 dan 2, orde 2 mempunyai *curve fitting* yang lebih baik dibandingkan orde 1. Demikian pula hasil observasi kinetika yang dilakukan oleh Hashem *et al.* (2024) pada penjerapan kromium menunjukkan bahwa *curve fitting* orde 2 lebih baik dibanding orde 1 dengan harga R<sup>2</sup> yaitu masing-masing adalah 0,9999 dan 0,9361.

Hasil pengamatan penelitian yang dilakukan pada rentang massa resin Indion 225 H 0,1–0,6 gram dengan rentang waktu kontak 0–5 jam, jika dihitung menggunakan pendekatan model kinetika orde 2 maka diperoleh variasi harga k yang tersaji pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil perhitungan konstanta kecepatan penjerapan menggunakan Persamaan (9)

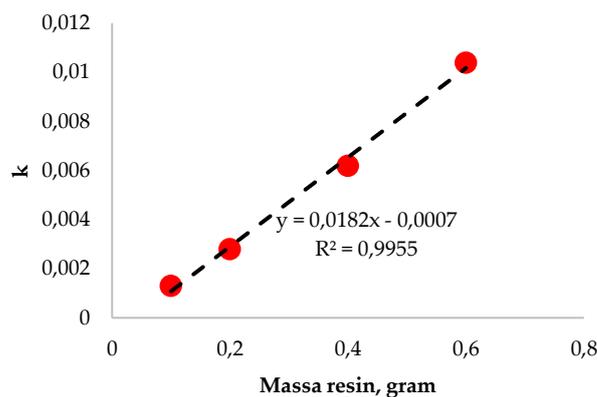
Massa Resin	k	R <sup>2</sup>
0,1	0,0013	0,941
0,2	0,0028	0,980
0,4	0,0062	0,942
0,6	0,0104	0,926

Pada Tabel 5 terlihat bahwa seiring meningkatnya massa resin yang dimasukkan ke dalam sistem penjerapan, maka akan diikuti dengan semakin meningkatnya konstanta penjerapan kromium yang dihasilkan. Jadi jumlah massa resin yang dimasukkan ke dalam sistem pada proses penurunan kadar kromium berdampak besar terhadap kecepatan penjerapan yang terjadi. Untuk lebih jelasnya, kecenderungan dari peningkatan massa resin Indion 225 H

yang dimasukkan ke dalam sistem terhadap peningkatan konstanta penjerapan kromium (k) tersaji pada Gambar 6.

Tabel 6. Perhitungan harga k menggunakan Persamaan (11)

Massa Resin, gram	kdata	khitung	Deviasi, (%)
0,1	0,0013	0,00112	13,85
0,2	0,0028	0,00294	5,00
0,4	0,0062	0,00658	6,13
0,6	0,0104	0,01022	1,73
<b>Rerata</b>			6,68



Gambar 7. Hasil *plotting* konstanta kecepatan penjerapan (k) versus massa resin Indion 225 H yang dilakukan pada rentang waktu 0–5 jam

Pada Gambar 7 terlihat bahwa peningkatan konstanta kecepatan penjerapan (k) terjadi secara linear dengan peningkatan massa adsorben resin Indion 225 H yang dimasukkan, dengan harga R<sup>2</sup> mendekati 1 yaitu 0,9955. Ketika dilakukan *trendline* menggunakan Microsoft Excel, maka persamaan matematika seperti pada Persamaan (11).

$$k = 0,0182 m - 0,0007 \dots\dots\dots(11)$$

Persamaan (11) cukup membantu guna memprediksi konstanta kecepatan penjerapan pada massa resin tertentu di luar rentang 0,1–0,6 gram seperti yang tersaji pada Tabel 6. Walaupun tentunya masih perlu divalidasi lagi menggunakan data hasil percobaan nantinya.

4. KESIMPULAN

Penggunaan resin penukar ion Indion 225 H sebagai adsorben pada *removal* kadar kromium yang terkandung di dalam larutan mempunyai kinerja yang cukup baik. Efisiensi penjerapan kromium tertinggi yaitu sebesar 33% yang dicapai pada kadar resin Indion 225 H sebesar 0,6 gram per 20 ml larutan atau setara dengan 30 gram/liter larutan pada waktu kontak 5 jam. Tetapi dengan mempertimbangan dari faktor penggunaan energi dengan perbedaan efisiensi yang tidak signifikan, kondisi operasi ekonomis diperoleh pada waktu kontak 3 jam dengan capaian efisiensi 30% yang dicapai pada massa resin yang sama (0,6 gram). Berdasarkan pendekatan

model matematika yang dilakukan, penyerapan kromium menggunakan adsorben Indion 225 H mengikuti model isotherm Langmuir dengan harga  $R^2$  sebesar 0,9970 dan kinetika laju penyerapannya mengikuti model kinetika penyerapan orde 2 dengan harga  $R^2$  adalah 0,9256.

Hasil penyerapan menggunakan resin penukar ion Indion 225 H dengan kadar awal kromium 10 mg/L hanya mampu menurunkan sampai 33% saja, artinya belum memenuhi baku mutu limbah yang diperbolehkan untuk dibuang yaitu 0,05 mg/L. Oleh karena itu, guna memaksimalkan hasil yang diperoleh, maka untuk penelitian ke depan perlu dilakukan dengan massa resin yang lebih tinggi serta waktu kontak yang lebih variatif. Harapannya adalah hasil penyerapan yang dihasilkan telah memenuhi baku mutu limbah kromium yang dipersyaratkan dan sekaligus untuk memvalidasi semua persamaan matematika yang diperoleh.

#### PERSANTUNAN

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya atas kesempatan dan fasilitas yang disediakan oleh Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, sehingga penelitian ini dapat dilaksanakan dengan baik dan berjalan lancar.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, S., Shahriar, A., Rahman, N., Alam, M. Z., & Nurnabi, M. (2024). Synthesis of gamma irradiated acrylic acid-grafted-sawdust (sd-g-aac) for trivalent chromium adsorption from aqueous solution. *Journal of Hazardous Materials Advances*, 100427.
- Aisyah, F. S., Syahadatun, A., & Khasanah, U. (2024). MEF-20: Adsorben Berbasis Zeolit dan Kitosan Jamur Tiram sebagai Filter Emisi Gas Buang Kendaraan Bermotor. *EKSTRAKSI: Jurnal Matematika Sains Teknologi Dan Lingkungan*, 1(1), 1-18.
- Akmal, A. A., Purnomo, C. W., & Ariyanto, T. (2023). Penjerapan Natrium pada Hasil Ekstraksi Silika dari Lumpur Panas Bumi. In *Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"*, 9-1.
- Alamsyah, M. D., & Asyfiradayati, R. (2024). Pengetahuan Kualitas Air dengan Pengelolaan Air Minum di Desa Ketandan Kecamatan Dagangan Kab. Madiun. *Jurnal Ners*, 8(1), 367-372.
- Aravindhan, S., Kumar, G. B., Saravanan, M., & Arumugam, A. (2024). *Delonix regia* biomass as an eco-friendly biosorbent for effective Alizarin Red S textile dye removal: Characterization, kinetics, and isotherm studies. *Bioresource Technology Reports*, 25, 101721.
- Asmadi, A., Endro, S., & Oktawan, W. (2009). Pengurangan Chrom (Cr) dalam Limbah Cair Industri Kulit pada Proses Tannery Menggunakan Senyawa Alkali  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ,  $\text{NaOH}$  dan  $\text{NaHCO}_3$  (Studi Kasus PT. Trimulyo Kencana Mas Semarang). *Jurnal Air Indonesia*, 5(1).
- Bulletin R003R. (n.d). Ion Exchange : Refreshing the planet. [https://ionresins.com/pdf/eds/225\\_H\\_Engg\\_data.pdf](https://ionresins.com/pdf/eds/225_H_Engg_data.pdf).
- Tanggal akses 25 Februari 2024.
- Debnath, S., & Ghosh, U. C. (2008). Kinetics, isotherm and thermodynamics for Cr (III) and Cr (VI) adsorption from aqueous solutions by crystalline hydrous titanium oxide. *The Journal of Chemical Thermodynamics*, 40(1), 67-77.
- Dow Chemical Company. (1998). DOWEX SBR-P A High Efficiency, Strong Base Anion Exchange Resin for Water Demineralization Applications. <http://www.cst.rs/pdf/sbr-p.pdf>. Tanggal akses 26 Februari 2024.
- Dupont. (2023). Product Data Sheet DuPont™ AmberLite™ IRC120 Na Ion Exchange Resin. <https://www.dupont.com/products/amberliteirc120na.html>. Tanggal akses 26 Februari 2024.
- Emelda, L., Putri, S. M., & Ginting, S. (2013). Pemanfaatan Zeolit Alam Teraktivasi untuk Adsorpsi Logam Krom (Cr3+). *Jurnal Rekayasa Kimia & Lingkungan*, 9(4), 166-172.
- Earnestly, F. (2018). Analisis Kadar Klorida, Amoniak di Sumber Air Tanah Universitas Muhammadiyah Sumbar Padang. *Jurnal Katalisator*, 3(2), 89-95.
- Gawale, R., & Marathe, K. V. (2007). Recovery of metal ion from micellar solution. *Indian Journal of Chemical Technology*, 14, 362-370.
- Gherasim, C. V., Bourceanu, G., Olariu, R. I., & Arsene, C. (2011). A novel polymer inclusion membrane applied in chromium (VI) separation from aqueous solutions. *Journal of hazardous materials*, 197, 244-253.
- Gomase, V., Doondani, P., Saravanan, D., Pandey, S., & Jugade, R. (2024). A novel Chitosan-Barbituric acid hydrogel supersorbent for sequestration of chromium and cyanide ions: Equilibrium studies and optimization through RSM. *Separation and Purification Technology*, 330, 125475.
- Habibi, S., Nematollahzadeh, A., & Mousavi, S. A. (2015). Nano-scale modification of polysulfone membrane matrix and the surface for the separation of chromium ions from water. *Chemical Engineering Journal*, 267, 306-316.
- Hashem, M. A., Nayeem, J., Hossain, M. T., & Miem, M. M. (2024). Chromium adsorption on thermally activated adsorbent equipped from waste biomass. *Waste Management Bulletin*, 2(1), 239-249
- Helmi. (2006). Penurunan Kadar Logam Krom pada Limbah Cair dengan Biomassa Jamur Merang. *Jurnal Reaksi (Journal of Science and Technology)*, 4(8), 21-15.
- Indotrading. (2023). Resin Anion Dowex SBRP. <https://www.indotrading.com/insoclayacidatamaindonesia/resin-anion-dowex-p244199.aspx>. Diakses 24 Februari 2024.
- Jati, E. D., Murti, S. H., Susilo, B., Amru, K., Ningrum, M. H., & Fahmi, S. (2024). Analisis Kadar Logam Berat Kromium (Cr) dalam Air dan Ikan Akibat Pembuangan

- Limbah Industri Penyamakan Kulit di Sungai Opak, Piyungan, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta. In *Prosiding Seminar Nasional Teknik Lingkungan Kebumihan Satu Bumi*, 5(1), 91-99.
- Kemenkes RI. (2023). Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 tentang Kesehatan Lingkungan. Indonesia: Kementerian Kesehatan Republik Indonesia.
- Miri, N. S. S. & Narimo. (2022). Equation Study of Langmuir and Freundlich Isotherms on Adsorption of Heavy Metal Fe (II) with Zeolite and Activated Carbon from Biomass: Review: Kajian Persamaan Isoterm Langmuir dan Freundlich pada Adsorpsi Logam Berat Fe (II) dengan Zeolit dan Karbon Aktif dari Biomassa. *Jurnal Kimia dan Rekayasa*, 2(2), 58-71.
- Monotaro.id. (2023). Indion Resin 225 H 25L 1p. <https://www.monotaro.id/items/s032584226.html>. Diakses 24 Februari 2024.
- Mulay, A., & Rathod, V. K. (2017). Esterification of maleic acid and butanol using cationic exchange resin as catalyst. *Journal of Chemical Sciences*, 129, 1713-1720.
- Murti, R.S. & Sugihartono. (2020). Bahaya Kromium Hexavalen (Cr VI) pada Kulit dan Produk Kulit Samak Krom serta Upaya Pencegahannya. *Jurnal Riset teknologi Industri*. 12(2), 241-252.
- Muta'ali, I. R., & Satlita, L. (2024). Kualitas Pelayanan Penyediaan Air Bersih pada Perusahaan Umum Daerah Air Minum (PERUMDAM) Kabupaten Tangerang. *Journal of Public Policy and Administration Research*, 9(1), 16.
- Nurafriyanti, N., Prihatini, N. S., & Syauqiah, I. (2017). Pengaruh Variasi pH dan Berat Adsorben dalam Pengurangan Konsentrasi Cr total pada Limbah Artifisial Menggunakan Adsorben Ampas Daun Teh. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 3(1).
- Nuryoto, N., Mas'ulunniah, N., Choerunnisa, A. S., & Suripno, S. (2021). Pemanfaatan Karbon Dioksida untuk Sintesis Precipitated Calcium Carbonate (PCC) dengan Metode Karbonasi. *Jurnal Integrasi Proses*, 10(2), 90-95.
- Ouass, A., Ismi, I., Elaidi, H., Lebkhiri, A., Cherkaoui, M., & Rifi, E. H. (2017). Mathematical modeling of the adsorption of trivalent chromium by the sodium polyacrylate beads. *J Mater Environ Sci*, 8(10), 3448-56.
- Phojaroen, J., Raita, M., Champreda, V., Laosiripojana, N., Assabumrungrat, S., & Chuetor, S. (2024). Thermodynamic and Kinetic Equilibrium for Adsorption of Cellulosic Xylose of Commercial Cation-Exchange Resins. *ACS omega*.
- Pratiwi, D. Y. (2020). Dampak Pencemaran Logam Berat terhadap Sumber Daya Perikanan dan Kesehatan Manusia. *Jurnal Akuatek*, 1(1), 59-65.
- Purwanti, A. (2023). Pembentukan Gelas Keramik Litium Alumina Silikat Berbahan Dasar Zeolit Alam Penjerap Kromium melalui Proses Sintering. *Jurnal redoks: jurnal pendidikan kimia dan ilmu kimia*, 6(2), 42-50.
- Putri, N. O., Ramadhanti, A. P., Widodo, L. U., & Pujiastuti, C. (2023). Pemisahan Ion Logam Perak Nitrat dari Limbah Cair Pencucian Fotografi melalui Metode Pertukaran Ion. *Jurnal Teknik Kimia*, 17(2), 61-64.
- Ratnaningsih, W. (2022). Adsorpsi Ion Logam Cr (VI) Menggunakan Karbon Aktif Kulit Singkong (Manihot esculenta) Termodifikasi Asam Nitrat. *Berkala Penelitian Teknologi Kulit, Sepatu, dan Produk Kulit*, 21(1), 34-46.
- Radinta, S., Kholisoh, S. D., & Mahargiani, T. (2016). Penurunan Kadar Krom (Cr) dalam Limbah Cair Industri Penyamakan Kulit dengan Metode Elektrokoagulasi Secara Batch. In *Seminar Nasional Teknik Kimia "Kejuangan"* (p. 13).
- Rahayu, A., Syauqi, R., & Islami, M. K. (2021). Teknologi Pengolahan Kandungan Kromium Dalam Limbah Penyamakan Kulit Menggunakan Proses Adsorpsi. *Jurnal Teknik Kimia dan Lingkungan*, 5(1), 90-99.
- Rahman, C., & Muldarisnur, M. (2024). Sintesis dan Karakterisasi Karbon Aktif Doping TiO<sub>2</sub> untuk Menurunkan Kadar Asam Lemak Bebas pada Minyak Jelantah. *Jurnal Fisika Unand*, 13(1), 42-48.
- Satriaji, F. V., & Hendrasarie, N. (2024). Spent Bleaching Earth sebagai Adsorben untuk Menyisihkan Krom dan Warna pada Limbah Cair Batik. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(1), 7642-7653.
- Surasani, R., Kalita, D., & Chandrasekhar, K. B. (2013). Indion Ina 225H resin as a novel, selective, recyclable, eco-benign heterogeneous catalyst for the synthesis of bis (indolyl) methanes. *Green Chemistry Letters and Reviews*, 6(2), 113-122.
- Soemargono, I. S., & Saputro, A. A. (2005). Kajian Penyerapan Logam Khrom dari Limbah Industri Elektroplating Menggunakan Resin Dowex SBR-P.
- Tanjung, S. M., Fahira, J. R., Walid, M., Syahputra, D., & Simamora, I. Y. (2024). Pemanfaatan Pembangunan Sistem Pengelolaan Air Minum (SPAM) Regional Mebidang pada Masyarakat di Jalan Medan-Binjai Say. *El-Mal: Jurnal Kajian Ekonomi & Bisnis Islam*, 5(1), 523-529.
- Velarde, L., Nikjoo, D., Escalera, E., & Akhtar, F. (2024). Bolivian natural zeolite as a low-cost adsorbent for the adsorption of cadmium: Isotherms and kinetics. *Heliyon*, 10(1).
- Wulandari, N. C., Widwastuti, H., & Asworo, R. Y. (2023). Pengaruh Massa Biosorben Kulit Batang Kayu Jawa (*Lannea coromandelica*) terhadap Kapasitas Adsorpsi Ion Cd (II). *Jurnal Atomik*, 8(2), 65-70.
- Wahid, A., Lifiana, N. N., Soemargono, S., & Erliyanti, N. K. (2022). Reduction of chromium ion (Cr<sup>6+</sup>) with ion exchange resin in liquid waste of batik. *Jurnal Konversi*, 11(1).

Wu, Z., Zhang, H., Ali, E., Shahab, A., Huang, H., Ullah, H., & Zeng, H. (2023). Synthesis of novel magnetic activated carbon for effective Cr (VI) removal via synergistic adsorption and chemical reduction. *Environmental Technology & Innovation*, 30, 103092.