

Penurunan Kadar Pb dan Cd dengan Metode *Ion exchange* Secara Batch dengan *Recycle* pada Limbah Cair Industri Cat

Firliandiva Anataya Putri Azzahra, Nala Nur Suroya, Caecilia Pujiastuti*, Renova Panjaitan

Program Studi Teknik Kimia, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya

*Koresponden email: caecilia.tk@upnjatim.ac.id

Diterima: 3 Maret 2026

Disetujui: 7 Maret 2026

Abstract

Liquid waste is the waste residue from a process that is no longer used. Liquid waste cannot be disposed of carelessly. There are quality standards that regulate the maximum levels in liquid waste disposal. One method of treating liquid waste is ion exchange. The ion exchange method can reduce the levels of heavy metals in liquid waste. Heavy metals have toxic effects if accumulated in living organisms. Ion exchange uses ion exchange resin to exchange heavy metals such as lead and cadmium. The resin used in this study is strong acid cation resin, specifically Trilite KH 80 resin. To maximize ion exchange, the variables adjusted are resin height, flow rate, and recycle rate. The resin height used sequentially was 20; 24; 28; 32; 36 cm, which was placed in an ion exchange column with a diameter of 7 cm. The flow rates used to flow the liquid waste were 60; 70; 80; 90; 100 mL/minute. Recycling was performed 1 and 3 times. The heavy metals observed were lead and cadmium. The results of the study showed that a resin height of 36 cm, a flow rate of 60 mL/minute with 3 times recycling yielded the best results. The final lead content obtained was 1.3 mg/L and the final cadmium content was 0.03 mg/L.

Keywords: *ion exchange, flow rate, recycling, trilite kh 80 resin, resin height*

Abstrak

Limbah cair merupakan sisa buangan dalam suatu proses yang tidak digunakan lagi. Limbah cair tersebut tidak boleh dibuang sembarangan. Terdapat baku mutu yang mengatur kadar maksimal dalam pembuangan limbah cair. Pengolahan limbah cair perlu dilakukan agar data memenuhi baku mutu tersebut, salah satunya menggunakan metode *ion exchange*. Metode *ion exchange* dapat menurunkan kadar logam berat dalam suatu limbah cair. Logam berat tersebut memiliki efek toksik jika terakumulasi dalam tubuh makhluk hidup. *Ion exchange* menggunakan resin penukar ion untuk menukar logam berat seperti timbal dan kadmium. Resin yang digunakan dalam penelitian adalah resin kation asam kuat Trilite KH 80. Untuk memaksimalkan pertukaran ion variabel yang dijalankan yaitu tinggi resin, laju alir dan *recycle*. Tinggi resin yang digunakan secara berturut turut 20; 24; 28; 32; 36 cm yang akan dimasukkan dalam kolom penukar ion dengan diameter 7 cm. Laju alir yang digunakan dalam mengalirkan limbah cair yaitu 60; 70; 80; 90; 100 mL/menit. *Recycle* dilakukan sebanyak 1-3 kali. Logam berat yang diamati yaitu timbal dan kadmium. Hasil penelitian menunjukkan tinggi resin 36 cm, laju alir 60 mL/menit dengan *recycle* 3 kali merupakan hasil terbaik. Kadar akhir timbal yang didapat sebesar 1,3 mg/L dan kadar akhir kadmium sebesar 0,03 mg/L.

Kata Kunci: *ion exchange, laju alir, daur ulang, resin trilite kh 80, tinggi resin*

1. Pendahuluan

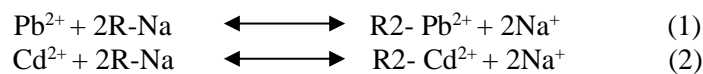
Perkembangan industri yang semakin meningkat pada bidang pertambangan, pelapisan logam, tekstil dan cat dapat meningkatkan limbah cair yang mengandung logam berat. Industri tersebut dalam prosesnya melibatkan logam berat dalam produksinya. Industri cat dalam proses produksinya menghasilkan limbah cair yang berasal dari air pencucian dan proses produksi. Salah satu bahan yang digunakan dalam prosesnya adalah pigmen. Pigmen mengandung logam berat [1]. Limbah cair sintesis dapat direkayasa dengan ion logam berat sebagai model limbah industri untuk mengetahui proses penurunan kadar logam berat [2]. Logam berat dapat berdampak pada makhluk hidup. Logam timbal dapat merusak sistem saraf pusat dan terganggunya sistem imun [3]. Logam Cadmium dapat menyebabkan kerusakan ginjal, anemia, hipertensi Ketika jumlah cadmium tersebut berlebihan [4]. Karena sifat logam berat yang sulit terurai dan memiliki efek toksik pada tubuh maka diperlukan pengolahan khusus [5]. Ion logam berat yang diamati dalam penelitian yaitu Timbal (Pb) dan Cadmium (Cd).

Untuk menangani logam berat dapat dilakukan penurunan kadar, salah satunya metode *Ion exchange*. *Ion exchange* dianggap sebagai pilihan proses yang paling efektif karena selektivitasnya yang

tinggi dan kapasitasnya untuk menangani air limbah dalam jumlah yang sangat besar. Pada penelitian yang dilakukan oleh Wahid pada tahun 2022, telah dilakukan penurunan kadar logam, Cr^{6+} pada limbah industry batik dengan metode *ion exchange*. Pada penelitian tersebut digunakan variable berat resin dan didapatkan bahwa semakin besar berat resin yang digunakan semakin besar persentase penurunan kadar logam berat. Penurunan kadar logam berat Cr^{6+} pada penelitian tersebut dapat mencapai hingga 97,86%. Hal tersebut menunjukkan bahwa proses *ion exchange* memiliki potensi yang baik dalam pengolahan limbah cair yang mengandung logam berat [6]. Pertukaran ion adalah reaksi kimia stoikiometri yang bersifat reversibel, dimana ion dari larutan ditukar dengan ion bermuatan serupa yang melekat pada bahan padat yang tidak bergerak dan tidak dapat larut, mempertahankan elektronetralitas secara keseluruhan [4].

Metode *Ion exchange* memanfaatkan resin penukar ion untuk menukar ion logam berat tersebut. Resin penukar ion adalah matriks yang tidak dapat larut yang terdiri dari partikel dengan jari jari 0,25-1,43 mm dan biasanya terbuat dari substrat polimer organik. Kebanyakan resin penukar ion terbuat dari *polystyrene*, dan menambahkan sejumlah kecil bahan tambahan biasanya diperlukan untuk membuat ikatan *crosslinker* [7]. Resin penukar ion dapat menukar ion logam berat salah satunya Pb dan Cd. Ion yang mengalami pertukaran dengan resin kation cenderung ion positif, sedangkan ion yang mengalami pertukaran dengan resin anion cenderung ion negatif [7]. Contoh resin kation asam kuat Resin Amberlite IR 120 Na dan Resin Trillite KH-80 sedangkan contoh resin kation asam lemah Resin Amberlite IRC-50 [8]. Resin kation yang memiliki matriks *Polystyrene Divinyl benzene* memiliki kapasitas yang sangat baik untuk menukar ion logam berat seperti Pb^{2+} dan Cd^{2+} . Resin kation Asam kuat mempunyai kekuatan reaksi dengan Gugus Sulfonik atau $-\text{SO}_3$ dan memiliki matriks *Polystyrene Divinyl benzene* [9].

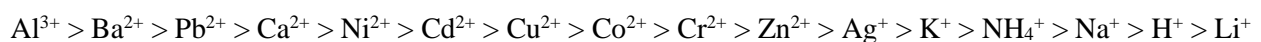
Resin yang digunakan dalam penelitian yaitu Resin Trillite KH-80 yang merupakan jenis resin kation asam kuat. Resin memiliki kapasitas penukar ion yang cukup tinggi agar resin tersebut tidak cepat jenuh. Resin tersebut memiliki kapasitas tukar total sebesar 2 eq/L dalam bentuk Na^+ . Resin kation Asam kuat mempunyai kekuatan reaksi dengan Gugus Sulfonik atau $-\text{SO}_3$ dan memiliki matriks *Polystyrene Divinyl benzene* [10]. Resin kation yang telah jenuh dapat di regenerasi menggunakan NaCl maupun HCl [11]. Pertukaran Kation menggunakan Resin Trillite KH-80 yang terjadi dalam percobaan yaitu menukar ion Pb^{2+} dan Cd^{2+} reaksi yang terjadi dapat dilihat pada persamaan 1 dan 2 [12].



Keterangan:

- 2R-Na = Resin Trillite KH-80 dalam bentuk Na^+
- Pb^{2+} = Ion logam berat timbal
- Cd^{2+} = Ion logam berat cadmium
- R₂-Pb²⁺ = Resin yang telah mengikat ion logam berat timbal
- R₂-Cd²⁺ = Resin yang telah mengikat ion logam berat kadmium
- Na^+ = Ion hidrogen yang dilepaskan dalam larutan

Kemampuan resin untuk mengikat ion tertentu dari larutan berdasarkan karakteristik ion disebut selektivitas penukar ion. Selektivitas tersebut dipengaruhi oleh muatan ion, jari-jari, dan berat atom [13]. Urutan selektivitas untuk resin penukar kation asam kuat adalah sebagai berikut [14].



Ion exchange dipengaruhi oleh tinggi resin, laju alir, kadar awal. Tinggi resin berpengaruh terhadap massa resin yang digunakan. Semakin tinggi resin yang digunakan akan semakin banyak media penukar ion [15]. Laju alir yang semakin kecil akan berpengaruh pada waktu kontak, waktu kontak akan berlangsung lama hal tersebut akan memaksimalkan pertukaran ion [8]. Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian penurunan kadar logam berat dilakukan dengan menggunakan variasi tinggi resin dan laju alir untuk menentukan kondisi optimum dalam penurunan kadar logam berat.

2. Metode Penelitian

2.1 Resin Penukar Ion

Resin penukar ion yang digunakan adalah resin Trillite KH-80 yang memiliki gugus fungsi sulfonate SO_3^- dan ion penukar Na^+ . Sebelum digunakan, resin terlebih dahulu dicuci dengan larutan NaCl. Setelah itu dibilas beberapa kali menggunakan air destilasi (aquadest) hingga tidak terdapat sisa larutan garam. Selanjutnya, resin dikeringkan pada suhu ruang sebelum digunakan dalam proses pertukaran ion.

2.2 Pembuatan larutan sintetis

Larutan sintetis dibuat dengan menambahkan $Pb(NO_3)_2$ dan $Cd(NO_3)_2$ hingga mencapai kadar Pb^{2+} 8,09 mg/L dan Cd^{2+} 4,29 mg/L, dimana kadar tersebut digunakan untuk mempresentasikan kondisi limbah cair industri rata-rata dalam rentang mg/L. Massa pelarut $Pb(NO_3)_2$ dan $Cd(NO_3)_2$ dihitung dengan persamaan 3 dan 4 [16]

$$C_{st} = \frac{W \times At.wt}{M.wt \times V} \quad (3)$$

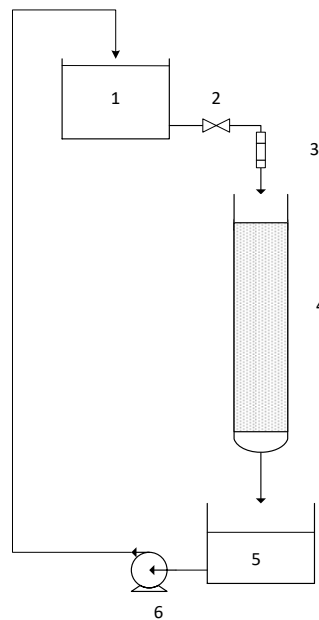
$$w = \frac{M.wt \times V \times C_{st}}{At \times wt} \quad (4)$$

Keterangan rumus:

- C_{st} = Konsentrasi ion (mg/L)
- W = Massa zat pelarut (mg)
- At.wt = Berat atom (mg/mol)
- M.wt = Berat molekul (mg/mol)
- V = Volume larutan (L)

2.3 Metode Ion exchange

Rangkaian alat penukar ion terdiri dari kolom penukar ion, pompa, valve, dan bak penampung. Limbah cair sintetis yang telah diuji kadar awalnya di ukur sebanyak 1000 ml dan dipindahkan dalam bak penampung sampel. Resin trilita KH 80 dimasukkan ke dalam kolom penukar ion dengan variabel tinggi resin 20; 24; 28; 32; 36 cm. Kemudian limbah cair sintetis dialirkan ke dalam kolom dengan variasi laju alir 60; 70; 80; 90; 100 mL/menit. Sampel limbah cair sintetis diambil sebagian sebagai sampel *recycle* 1. Sisa sampel *recycle* 1 dialirkan kembali pada bak penampung sampel untuk dikontakkan kembali dengan resin yang telah digunakan. Prosedur diulangi sampai *recycle* ke 3 dan sampel limbah cair sintetis pada *recycle* 3 diambil sebagai sampel *recycle*. Analisis limbah yang sudah di *recycle* untuk di analisis kadar logam berat timbal dan cadmium menggunakan Sampel dianalisis di Badan Standarisasi dan Pelayanan Jasa Industri Surabaya dengan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS). Rangkaian alat *ion exchange* dapat dilihat pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Rangkaian alat *ion exchange*

Keterangan gambar

1. Bak penampung sampel
2. Kran
3. Flow control
4. Kolom pertukaran ion
5. Bak penampung hasil pertukaran ion
6. Pompa

2.4 Analisis kadar logam yang tertukar

Perhitungan kadar logam yang tertukar menggunakan rumus menggunakan persamaan 5 [17] :

$$C_{tertukar} = C_0 - C_1 \quad (5)$$

Keterangan rumus

C_0 = Kadar logam sebelum *ion exchange* (mg/L)

C_1 = Kadar logam sesudah proses *ion exchange* (mg/L)

3 Hasil dan Pembahasan

3.1 Analisis kadar awal kadar logam berat limbah cair sintetis

Penelitian dimulai dengan Analisis kadar awal logam berat limbah cair sintetis. Analisis kadar awal menggunakan metode *Atomic Absorption Spectrophotometry* (AAS) yang dilakukan di BSPJI Surabaya didapat hasil sebagai berikut dapat dilihat dalam **Tabel 1** sebagai berikut:

Tabel 1. Hasil analisis kadar awal limbah cair sintetis

Parameter	Kadar awal (mg/L)	Literatur (mg/L)[18]	Baku mutu SNI (mg/L)[1]
Timbal (Pb)	8,09	5,38-17,21	0,3
Cadmium (Cd)	4,29	3,03-4,18	0,08

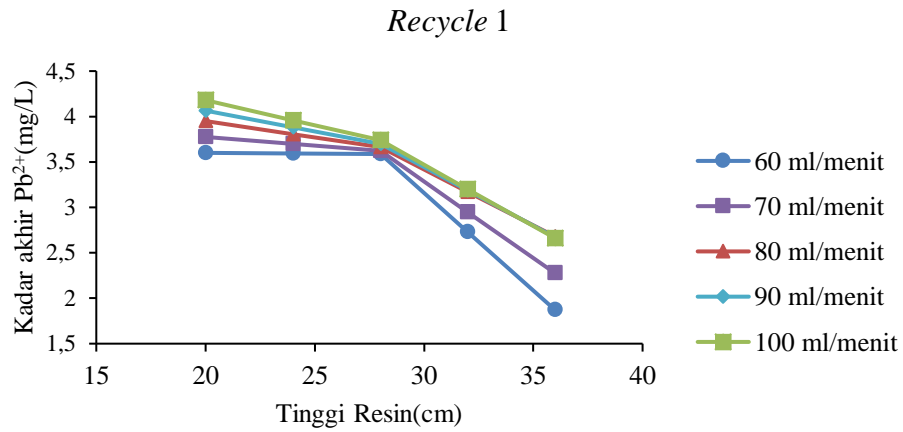
Mengacu pada hasil analisis kadar awal limbah cair sintetis yang terdapat pada **Tabel 1** limbah cair sintetis yang akan diolah memiliki kadar awal timbal sebesar 8,09 mg/L dan kadar awal cadmium sebesar 4,29 mg/L, kedua parameter melebihi standar baku mutu yang sudah ditetapkan oleh Peraturan menteri lingkungan hidup no. 5 tahun 2014.

3.2 Hasil analisis

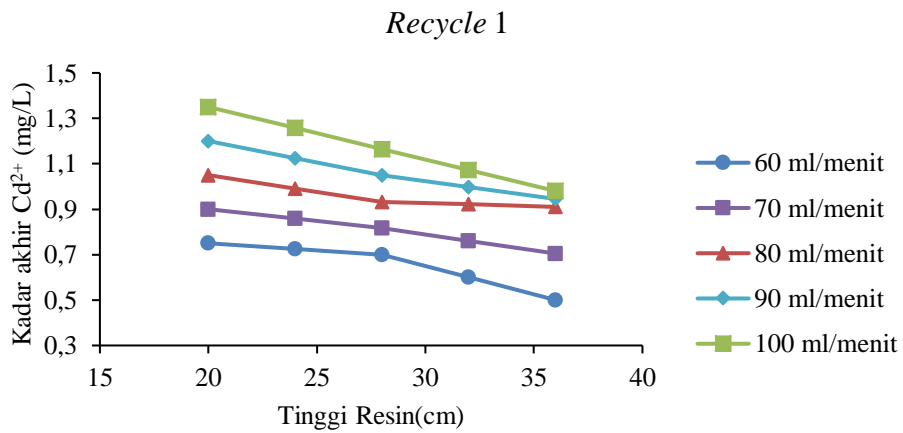
Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, hasil analisis kadar akhir limbah cair sintetis pada *recycle 1* dengan metode *ion exchange* dapat dilihat pada **Tabel 2**, **Gambar 2** dan **Gambar 3**.

Tabel 2. Hasil analisis kadar akhir limbah cair sintetis pada *recycle 1*

Recycle 1					
Tinggi resin (Cm)	Laju alir (ml/menit)	Kadar akhir Pb (mg/L)	Kadar akhir Cd (mg/L)	Kadar ion tertukar Pb (mg/L)	Kadar ion tertukar Cd (mg/L)
20	60	3,6	0,75	4,49	3,54
24		3,59	0,725	4,49	3,56
28		3,58	0,7	4,50	3,59
32		2,72	0,6	5,36	3,69
36		1,87	0,5	6,22	3,79
20	70	3,77	0,9	4,31	3,39
24		3,69	0,85	4,39	3,43
28		3,62	0,81	4,46	3,47
32		2,94	0,76	5,14	3,52
36		2,27	0,7	5,81	3,58
20	80	3,95	1,05	4,14	3,24
24		3,08	0,99	4,28	3,29
28		3,66	0,93	4,42	3,35
32		3,17	0,92	4,91	3,36
36		2,68	0,91	5,41	3,38
20	90	4,06	1,2	4,02	3,09
24		3,88	1,12	4,02	3,16
28		3,70	1,04	4,38	3,24
32		3,18	0,99	4,90	3,29
36		2,67	0,94	5,41	3,34
20	100	4,18	1,31	3,91	2,94
24		3,96	1,25	4,20	3,03
28		3,74	1,16	4,35	3,12
32		3,2	1,07	4,89	3,21
36		2,66	0,98	5,43	3,31



Gambar 2. Grafik hubungan antara tinggi resin dengan kadar akhir timbal pada *recycle 1*



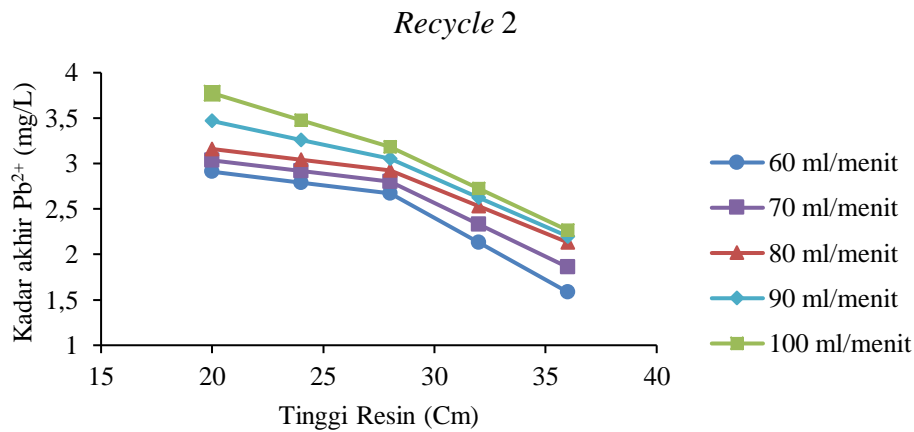
Gambar 3. Grafik hubungan antara tinggi resin dengan kadar akhir cadmium pada *recycle 1*

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, hasil analisis kadar akhir limbah cair sintesis pada *recycle 2* dengan metode *ion exchange* dapat dilihat pada **Tabel 3**, **Gambar 4** dan **Gambar 5**.

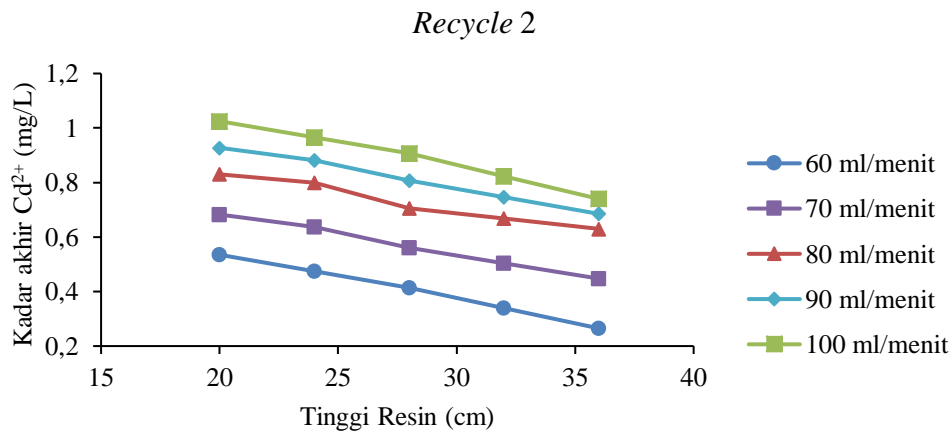
Tabel 3. Hasil analisis kadar akhir limbah cair sintesis pada *recycle 2*

Tinggi resin (Cm)	Laju alir (ml/menit)	Recycle 2			
		Kadar akhir Pb (mg/L)	Kadar akhir Cd (mg/L)	Kadar ion tertukar Pb (mg/L)	Kadar ion tertukar Cd (mg/L)
20	60	2,91	0,54	5,18	3,76
24		2,79	0,47	5,30	3,82
28		2,67	0,41	5,42	3,88
32		2,13	0,34	5,96	3,95
36		1,59	0,27	6,51	4,03
20	70	3,04	0,68	5,06	3,61
24		2,92	0,64	5,17	3,65
28		2,33	0,56	5,76	3,73
32		2,33	0,50	5,76	3,79
36		1,86	0,45	6,23	3,84
20	80	3,16	0,83	4,93	3,46
24		3,04	0,80	5,05	3,49
28		2,93	0,71	5,16	3,58
32		2,53	0,67	5,56	3,62
36		2,13	0,63	5,96	3,66
20	90	3,47	0,93	4,62	3,36

Tinggi resin (Cm)	Laju alir (ml/menit)	Recycle 2			
		Kadar akhir Pb (mg/L)	Kadar akhir Cd (mg/L)	Kadar ion tertukar Pb (mg/L)	Kadar ion tertukar Cd (mg/L)
24	100	3,26	0,88	4,83	3,41
28		3,05	0,81	5,04	3,48
32		2,63	0,75	5,46	3,54
36		2,20	0,69	5,89	3,61
20		3,78	1,03	4,32	3,27
24		3,48	0,97	4,61	3,32
28		3,18	0,91	4,91	3,38
32		2,72	0,82	5,37	3,47
36		2,27	0,74	5,83	3,55



Gambar 4. Grafik hubungan antara tinggi resin dengan kadar akhir timbal pada recycle 2



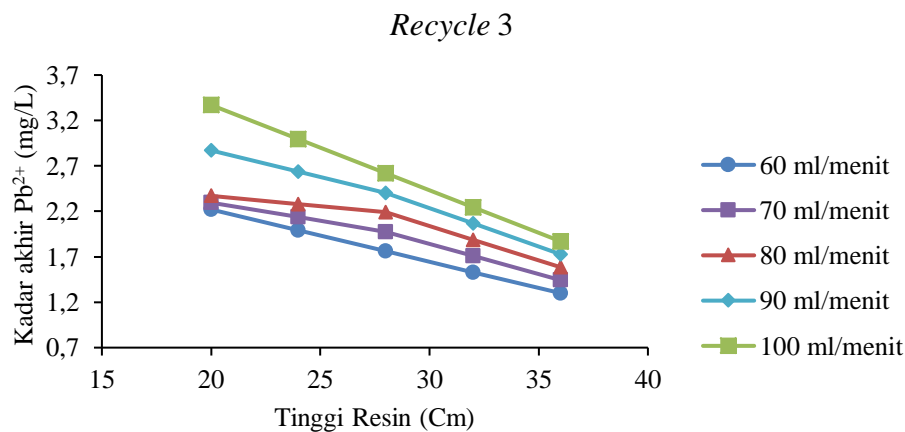
Gambar 5. Grafik hubungan antara tinggi resin dengan kadar akhir cadmium pada recycle 2

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, hasil analisis kadar akhir limbah cair sintesis pada recycle 3 dengan metode ion exchange dapat dilihat pada Tabel 4, Gambar 6 dan Gambar 7.

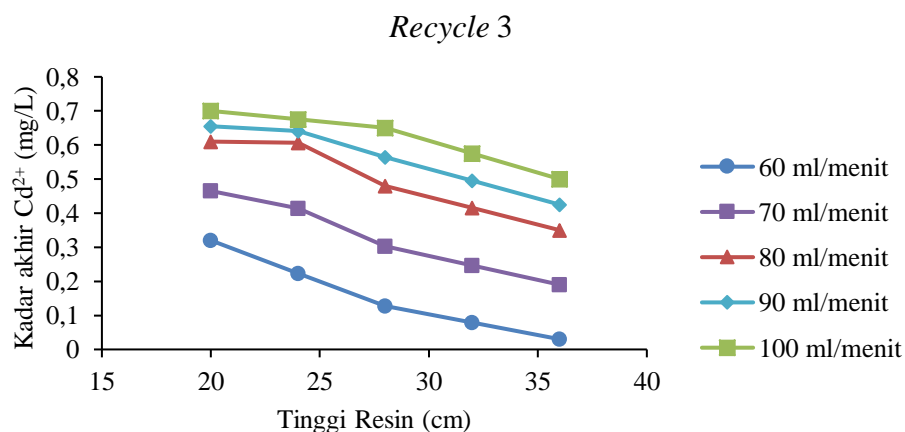
Tabel 4. Hasil analisis kadar akhir limbah cair sintesis pada recycle 3

Recycle 3					
Tinggi resin (Cm)	Laju alir (ml/menit)	Kadar akhir Pb (mg/L)	Kadar akhir Cd (mg/L)	Kadar ion tertukar Pb (mg/L)	Kadar ion tertukar Cd (mg/L)
20	60	2,22	0,32	5,87	3,97
24		1,99	0,22	5,79	4,06
28		1,76	0,12	6,33	4,16
32		1,53	0,07	6,50	4,21
36		1,3	0,03	6,79	4,26
20	70	2,29	0,46	5,79	3,82
24		2,13	0,41	5,95	3,87

Recycle 3					
Tinggi resin (Cm)	Laju alir (ml/menit)	Kadar akhir Pb (mg/L)	Kadar akhir Cd (mg/L)	Kadar ion tertukar Pb (mg/L)	Kadar ion tertukar Cd(mg/L)
28		1,97	0,30	6,11	3,98
32		1,70	0,24	6,38	4,04
36		1,44	0,19	6,64	4,01
20	80	2,37	0,61	5,72	3,68
24		2,28	0,60	5,81	3,64
28		2,19	0,48	5,9	3,81
32		1,88	0,41	6,20	3,87
36		1,58	0,35	6,50	3,94
20	90	2,87	0,65	5,22	3,63
24		2,63	0,64	5,81	3,64
28		2,40	0,56	5,68	3,72
32		2,06	0,49	6,02	3,79
36		1,72	0,42	6,36	3,86
20	100	3,37	0,7	4,72	3,59
24		2,99	0,67	5,09	3,61
28		2,62	0,65	5,47	3,64
32		2,24	0,57	5,84	3,71
36		1,87	0,5	6,22	3,79



Gambar 6. Grafik hubungan antara tinggi resin dengan kadar akhir timbal pada *recycle 3*



Gambar 7. Grafik hubungan antara tinggi resin dengan kadar akhir cadmium pada *recycle 3*

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada **Tabel 3** didapat hubungan tinggi resin terhadap hasil kadar akhir logam berat Pb^{2+} dan Cd^{2+} pada *recycle 1*. Semakin tinggi resin yang digunakan dalam penukaran ion akan didapat kadar akhir logam berat yang semakin rendah. Hal tersebut dipengaruhi oleh situs aktif yang tersedia untuk penukaran ion akan bertambah dan akan semakin efektif dalam menurunkan kadar logam berat [19]. Selain itu juga didapat hubungan antara laju alir dengan kadar akhir logam berat. Laju alir yang semakin rendah akan menghasilkan kadar akhir logam berat yang semakin

rendah. Hal tersebut dipengaruhi oleh waktu kontak yang terjadi antara resin dengan limbah cair sintesis [20]. Kadar ion yang tertukar lebih banyak timbal daripada cadmium. Hal tersebut dipengaruhi oleh selektivitas penukaran ion. Ion yang memiliki berat atom dan jari-jari yang lebih besar akan lebih mudah ditukarkan [13]. Jari-jari timbal sebesar 119 pm sedangkan sebesar 95 pm [18]. Jari-jari yang lebih besar akan menghasilkan medan yang lebih besar dan memungkinkan distorsi awan elektron resin SO_3^- lebih efektif membentuk ikatan. Selain itu juga dipengaruhi oleh berat atom, ion yang memiliki berat atom yang lebih yang lebih besar akan ditukar dahulu [15]. Berat atom timbal sebesar 207, 20 gr/mol sedangkan berat atom cadmium sebesar 112,411 gr/mol [18].

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat dilihat pada **Tabel 2**, **Tabel 3** dan **Tabel 4** didapat hubungan *recycle* terhadap kadar akhir logam berat. *Recycle* bertujuan untuk meningkatkan efisiensi penyisihan dan pengoptimalan resin yang digunakan dalam pertukaran ion. Kondisi resin saat *recycle* 1 masih baru sehingga kadar ion yang tertukar akan semakin besar. Hal tersebut disebabkan karena kapasitas tukar ion resin yang masih optimal, sehingga jumlah situs aktif yang tersedia masih maksimal. Jika dibandingkan dengan *recycle* 2 dan *recycle* 3 kadar ion yang tertukar lebih sedikit dibandingkan *recycle* 1. Hal tersebut disebabkan resin yang digunakan memiliki jumlah situs aktif yang terbatas, sehingga kemampuan resin dalam menukar ion logam berat akan menurun pada siklus *recycle* selanjutnya [21].

4. Kesimpulan

Pada penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa penggunaan resin Trillite KH-80 pada proses *ion exchange* dengan metode batch dengan *recycle* dapat menurunkan kadar logam berat Pb^{2+} dan Cd^{2+} dalam limbah sintesis. Keefektifan penurunan kadar dipengaruhi oleh tinggi resin dalam kolom, laju alir limbah, dan waktu kontak antara limbah dengan resin. Efektivitas penurunan terbaik kadar logam berat timbal dan kadmium terdapat pada variable tinggi resin 36 cm dengan laju alir 60 ml/menit pada *recycle* 3 yaitu kadar akhir timbal yaitu sebesar 1,3 mg/L dan kadar akhir cadmium sebesar 0,03 mg/L. Hasil penelitian yang didapat ion timbal yang didapat belum memenuhi baku mutu sedangkan untuk ion cadmium telah memenuhi baku mutu yang telah ditetapkan.

5. Referensi

- [1] Linsley, R. K. "Kemen LH no 34 tahun 2009 tentang Baku Mutu Air Limbah bagi usaha dan/atau kegiatan Pertambangan. Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia.(2014). Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 101 Tahun 2014 tentang Pengelolaan Limbah Bahan Berbahaya dan Beracun. Jakarta: KLHK."
- [2] F. Fu and Q. Wang, "Removal of heavy metal ions from wastewaters : A review," *J. Environ. Manage.*, vol. 92, no. 3, pp. 407–418, 2011, doi: 10.1016/j.jenvman.2010.11.011.
- [3] W. M. Ibrahim, Y. S. A. Aziz, S. M. Hamdy, and N. S. Gad, "Biodegradation Comparative Study for Biosorption of Heavy Metals from Synthetic Wastewater by Different Types of Marine Algae," vol. 9, no. 1, pp. 5–11, 2018, doi: 10.4172/2155-6199.1000425.
- [4] A. Bashir *et al.*, "Removal of heavy metal ions from aqueous system by ion-exchange and biosorption methods," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 17, no. 2, pp. 729–754, 2019, doi: 10.1007/s10311-018-00828-y.
- [5] N. Sekarwati, B. Murachman, and Sunarto, "Dampak Logam Berat Cu (Tembaga) dan Ag (Perak) Pada Limbah Cair Industri Perak," *Ekosains*, vol. VII, no. 1, pp. 64–76, 2015.
- [6] A. Wahid, N. N. Lifiana, Soemargono, and N. K. Erliyanti, "Reduction of Chromium Ion (Cr^{6+} with Ion Exchange Resin in Liquid Waste of Batik", *Konversi*, vol 11, no 1, pp 26-31, 2022
- [7] A. Shahab and I. A. Setiorini, "Efektifitas Volume Resin Ion Exchanger Terhadap Kapasitas Pertukaran Ion Dan Waktu Jenuh Pada Unit Demin Plant Di PT PLN (Persero) UPDK Keramasan," *J. Innov. Res. Knowl.*, vol. 2, no. 3, pp. 310–324, 2023.
- [8] Kosim, Muhamad Engkos, Dwi Prambudi, and Rini Siskayanti. "Analisis Efisiensi Penukar Ion Sistem Demineralisasi Pada Pengolahan Air di Proses Produksi Electroplating." *Prosiding Semnastek* (2021).
- [9] Bergamasco, Sara, et al. "Innovative Nafion-and Lignin-Based Cation Exchange Materials Against Standard Resins for the Removal of Heavy Metals During Water Treatment." *Separations* 11.12 (2024): 357.
- [10] Kurniani, Icha Intan, et al. "Pengaruh Waktu Kontak Filtrasi Media Resin Kation dan Zeolit terhadap Kesadahan Air Sumur Gali." *Buletin Keslingmas* 43.3 (2024): 129-134.
- [11] B. A. Pratama and O. Setiawan, "Analisis efisiensi penukaran ion pada unit demineralisasi di PT Petrowidada," *J. Integr. Proses dan Lingkung.*, vol. 1, no. 1, pp. 12–17, 2023, doi:

- 10.30587/jipl.v1i1.6414.
- [12] Nachod, Frederick C., and Jack Schubert, eds. *Ion exchange technology*. Academic Press, 2013.
- [13] C. Asnadi, S. R. S, and D. P. Ningsih, "Pengaruh Waktu Dan Putaran Agitasi Terhadap Penyerapan Ion Timbel Oleh Resin Lewatit K-2621," vol. 44, no. 2, 2020.
- [14] Sajjadinezhad, Seyed Mehrzad, et al. "Photophysical properties and photonic applications of porphyrin-based MOFs." *Coordination Chemistry Reviews* 510 (2024): 215794.
- [15] Ratnasari, Budiarti Yunisha, Nur Fadillah, and Dwi Hery Astuti. "Penurunan Kadar Ion Logam Berat pada Air Sungai Karah Surabaya dengan Resin Kation." *ChemPro* 2.3 (2021): 7-12.
- [16] A. Q. Jasim and S. K. Ajjam, "Removal of Heavy Metal Ions from Wastewater Using Ion Exchange Resin in a Batch Process with Kinetic Isotherm", *South African Journal of Chemical Engineering*, vol 49, no1, pp 43-54, 2024
- [17] Panjaitan, Legipson, Megawati Setiawan Putri, and Caecilia Pujiastuti. "Pengaruh Laju Alir Terhadap Penurunan Kadar Logam Berat Cr pada Limbah Industri Batik dengan Metode Ion Exchange Menggunakan Resin Amberlite IR 120Na." *Enviroous* 4.1 (2023): 1-4.
- [18] P. Patnaik, *Handbook of Inorganic Chemicals*. Nature Publishing Group UK, 2003. doi: 10.1038/s41598-023-29956-4.
- [19] Romadona, Syahri, Shinta Elystia, and Yelmida Yelmida. *Penurunan Timbal (Pb) Air Laut Pulau Bengkalis Menggunakan Tanah Lempung dengan Metode Penukar Ion pada Variasi Tinggi Unggun dan Debit Aliran*. Diss. Riau University.
- [20] S. Kocaoba, "Determination of some heavy metals from aqueous solutions using modified Amberlite XAD - 4 resin by selective solid - phase extraction," *J. Anal. Sci. Technol.*, vol. 7, 2022, doi: 10.1186/s40543-022-00324-7.
- [21] Visca, Rinette, and Bagas Anggono. "Performansi Resin Penukar Ion Pada Sistem Mixed Bed Demineralisasi di Industri Farmasi." *Jurnal Pendidikan Indonesia* 6.8 (2025).