



KOVALEN: Jurnal Riset Kimia

<https://bestjournal.untad.ac.id/index.php/kovalen>



Evaluasi dan Modifikasi Alat Penukar Ion dengan Penambahan Kolom Adsorpsi Karbon Aktif untuk Menurunkan Kesadahan

[Evaluation dan Modification of Ion Exchange Equipment with the Addition of Activated Carbon Adsorption Column to Reduce Hardness]

Endang Kusumawati, Retno Dwi Jayanti, Lestari Herlianti Putri, Nurul Annisa, Tifa Paramitha✉

*Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir, Ciwaruga, Kec. Parongpong, Kabupaten Bandung Barat, Jawa Barat, Indonesia*

Abstract. Ion exchange is one of the water treatment methods used to reduce hardness. To improve the performance of the ion exchange columns, modification can be done by adding an activated carbon column placed after the ion exchange column to adsorb ions that were not exchanged by the resin so that the treated water met boiler feed water quality standards. The purposes of this study were to determine the best flow rate to reduce hardness in the configuration of the ion exchange and activated carbon columns, determine the saturation time of each column, and determine their exchange/adsorption capacities. The steps of this study included modifications and repair of equipment, leak tests, and configuration system performance tests. Performance tests were conducted by varying the feed flow rates by 0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1 GPM and analyzed the efficiency of hardness reduction. The results of this study showed that the best flow rate to reduce the initial hardness of 499 mg/L CaCO_3 was a flow rate of 0.6 GPM or 2.2 LPM. The efficiency of hardness reduction in the configuration system was 100%. The conductivity of the effluent of anion column and activated carbon column decreased compared to the conductivity of the effluent of cation column with an average decrease of 33.17% in the anion column and 18.35% in the activated carbon column. The saturation time of the configuration system was 168 minutes in cation resin, 46.4 minutes in anion resin, and 159 minutes in activated carbon. Furthermore, the adsorption capacity of cation resin, anion resin, and activated carbon were 35.28 mg/g, 43.98 mg/g, and 9.61 mg/g, respectively. The addition of activated carbon in the configuration system lowers the conductivity of the effluent and decreases hardness.

Keywords: *Ion exchangers, activated carbon, water hardness, artificial raw water, boiler feed water*

Abstrak. Pertukaran ion merupakan salah satu metode pengolahan air untuk menurunkan kesadahan. Untuk meningkatkan kinerja kolom penukar ion, modifikasi dapat dilakukan dengan penambahan kolom karbon aktif yang ditempatkan setelah kolom penukar ion untuk menyerap ion-ion yang tidak tertukar oleh resin sehingga air hasil pengolahan memenuhi standar baku mutu air umpan boiler. Tujuan penelitian ini ialah mengetahui laju alir terbaik untuk menurunkan kesadahan pada konfigurasi kolom pertukaran ion dan karbon aktif, menentukan waktu jenuh setiap kolom, dan menentukan kapasitas pertukaran/penyerapannya. Tahap penelitian meliputi modifikasi dan perbaikan alat, uji kebocoran, dan uji kinerja sistem konfigurasi. Uji kinerja dilakukan dengan memvariasikan laju alir umpan sebesar 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1 GPM dan dilakukan analisa terhadap efisiensi penurunan kesadahan. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa laju alir terbaik untuk menurunkan kesadahan awal 499 mg/L CaCO_3 ialah laju alir 0,6 GPM atau 2,2 LPM. Hasil efisiensi penurunan kesadahan pada sistem konfigurasi sebesar 100%. Konduktivitas effluent kolom anion dan kolom karbon aktif mengalami penurunan dibandingkan dengan konduktivitas effluent kolom kation dengan rata-rata penurunan 33,17% pada kolom anion dan 18,35% pada kolom karbon aktif. Adapun waktu jenuh sistem konfigurasi sebesar 168 menit pada resin kation, 46,4 menit pada resin anion, dan 159 menit pada karbon aktif. Selanjutnya, kapasitas penyerapan pada resin kation, resin anion, dan karbon aktif berturut-turut adalah 35,28 mg/g, 43,98 mg/g, dan 9,61 mg/g. Penambahan karbon aktif pada sistem konfigurasi mampu menurunkan konduktivitas effluent dan menurunkan kesadahan.

Kata kunci: *Alat penukar ion, karbon aktif, kesadahan air, air baku artificial, air umpan boiler*

Diterima: 14 September 2023, Disetujui: 8 Maret 2024

Sitasi: Kusumawati, E., Jayanti, R.D., Putri, L.H., Annisa, N., dan Paramitha, T. (2024). Evaluasi dan Modifikasi Alat Penukar Ion Dengan Penambahan Kolom Adsorpsi Karbon Aktif Untuk Menurunkan Kesadahan. *KOVALEN: Jurnal Riset Kimia*, 10(1): 1-10.

✉ Corresponding author

E-mail: tifa.paramitha@polban.ac.id

<https://doi.org/10.22487/kovalen.2024.v10.i1.16556>



2477-5398/ © 2024 Kusumawati et al.
This is an open-access article under the CC BY-SA license.

LATAR BELAKANG

Air baku yang digunakan untuk air umpan boiler biasanya diperoleh dari air sungai, waduk, air tanah dan sumber lainnya yang memiliki tingkat kesadahan. Pada proses pengolahannya di industri, adanya kesadahan yang terkandung dalam air umpan boiler dapat menimbulkan kerak akibat pemanasan pada alat boiler dan pertukaran panas lainnya sehingga dapat menurunkan kinerja alat (Zulriadi & Danardono, 2020).

Timbulnya kerak disebabkan oleh adanya endapan yang mengeras dan menempel pada permukaan logam atau alat penukar panas akibat unsur-unsur pembentuk kerak dalam air (Priyanto & Wilastari, 2022). Hasan *et al.* (2012) menyatakan bahwa faktor temperatur dan konsentrasi Ca^{2+} dapat meningkatkan jumlah kerak. Selain itu, ada beberapa unsur lain yang mempengaruhi terbentuknya kerak yakni magnesium (Mg) dan besi (Fe) dalam bentuk karbonat, kalsium (Ca) dalam bentuk sulfat, dan lain-lainnya.

Usaha yang dapat dilakukan untuk mengurangi senyawa pembentuk kerak pada air umpan boiler agar sesuai dengan standar yang berlaku (seperti *standar The American Society of Mechanical Engineers (ASME)/ PT. Nalco*) biasanya dilakukan pengolahan internal yakni penambahan bahan kimia ke air umpan boiler. Senyawa pembentuk kerak diubah menjadi lumpur yang mengalir bebas, yang dapat dibuang dengan blowdown. Namun, metode tersebut tidak ekonomis karena dapat menyebabkan kehilangan banyak air dan panas (Nanda, 2017). Selain itu, jenis sumber air yang berbeda memerlukan bahan kimia berbeda pula sehingga pengolahan internal sangat tidak direkomendasikan.

Kesadahan dapat diturunkan dengan menggunakan proses pertukaran ion. Proses pertukaran ion beroperasi berdasarkan prinsip pertukaran kation dan anion untuk menghilangkan ion positif dan negatif yang terlarut dalam air dengan menggunakan resin yang dapat menukar ion-ion tersebut.

Penelitian oleh Nathanael dan Ransun (2022) menunjukkan bahwa untuk mengelola air umpan boiler dengan *total dissolved solid* (TDS) dan *electrical conductivity* (EC) yang tinggi dapat dilakukan dengan pertukaran ion. Penurunan TDS dan EC yang tinggi dipengaruhi oleh rendahnya laju alir, semakin kecil laju alir maka semakin lama waktu kontak sehingga semakin banyak pula ion yang dipertukarkan yang berimbas pada penurunan nilai TDS dan EC. Sementara itu, penelitian Sintya (2022) menyebutkan bahwa untuk menurunkan TDS, kesadahan, dan klorida dapat digunakan media karbon aktif dengan persentase penurunan TDS, kesadahan, dan klorida berturut-turut sebesar 50,6%, 77%, dan 65,5%.

Berdasarkan uraian di atas, pada penelitian ini dilakukan modifikasi kolom penukar ion dengan penambahan kolom karbon aktif dengan tujuan untuk meningkatkan kinerja kolom penukar ion dalam menurunkan kesadahan air. Kolom karbon aktif ditempatkan setelah kolom penukar ion untuk menyerap ion-ion yang tidak tertukar oleh resin. Dengan demikian, dari penelitian ini diharapkan dapat diperoleh air hasil pengolahan yang memenuhi standar baku mutu air umpan boiler.

METODE PENELITIAN

Bahan dan Peralatan

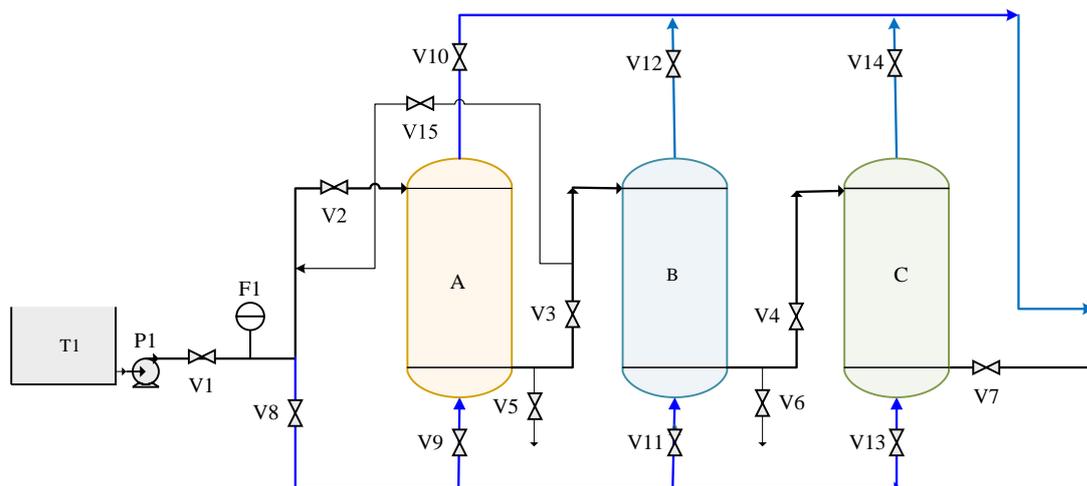
Bahan yang digunakan dalam penelitian ini adalah air keran, resin kation (siklus H^+)

DOWEX, resin anion (siklus OH⁻) DOWEX, karbon aktif granular, aquades, CaCl₂ teknis, MgSO₄ teknis, Na₂EDTA pa (Merck), larutan penyangga pH 10, indikator EBT pa (Merck), KCN 10%, NaOH teknis, HCl 32% teknis. Sementara itu, peralatan yang digunakan adalah seperangkat alat gelas, pH meter, dan konduktometer.

Prosedur Penelitian

Modifikasi Alat dan Uji Kebocoran

Modifikasi alat dilakukan dengan melengkapi kolom penukar ion dengan kolom karbon aktif dan peralatan pendukung lainnya. Gambar 1 menunjukkan modifikasi alat yang telah dilakukan. Setelah modifikasi selesai, dilakukan uji kebocoran untuk setiap kolom.



Keterangan: T= Tangki; P=Pompa; V=Valve; F=Rotameter; A=Kolom penukar kation; B=Kolom penukar anion; C=Kolom karbon aktif

Gambar 1. Modifikasi alat

Pembuatan air baku artificial

Prosedur pembuatan air baku *artificial* adalah melarutkan 14,4 gram CaCl₂ dan 14,4 gram MgSO₄ ke dalam 50 ml air. Selanjutnya, larutan CaCl₂ dan MgSO₄ dicampurkan dalam 48 L air. Kemudian, air baku *artificial* dianalisis kesadahan total, pH, dan konduktivitas. Analisis kesadahan total dilakukan dengan mengacu pada SNI 06-6989.12-2004.

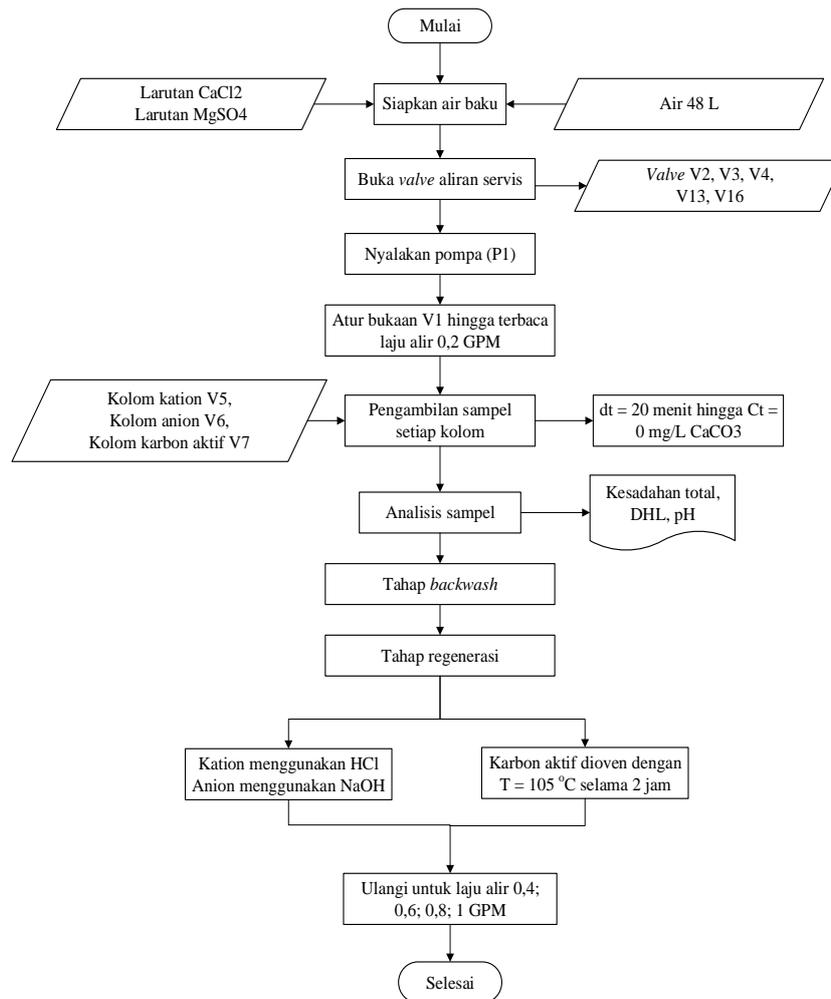
Percobaan sistem konfigurasi (penukar ion – karbon aktif)

Prosedur percobaan sistem konfigurasi dapat dilihat pada Gambar 2.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Modifikasi Alat

Modifikasi alat kolom penukar ion yang telah dilengkapi dengan kolom karbon aktif dan peralatan pendukung dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 2. Prosedur percobaan sistem konfigurasi

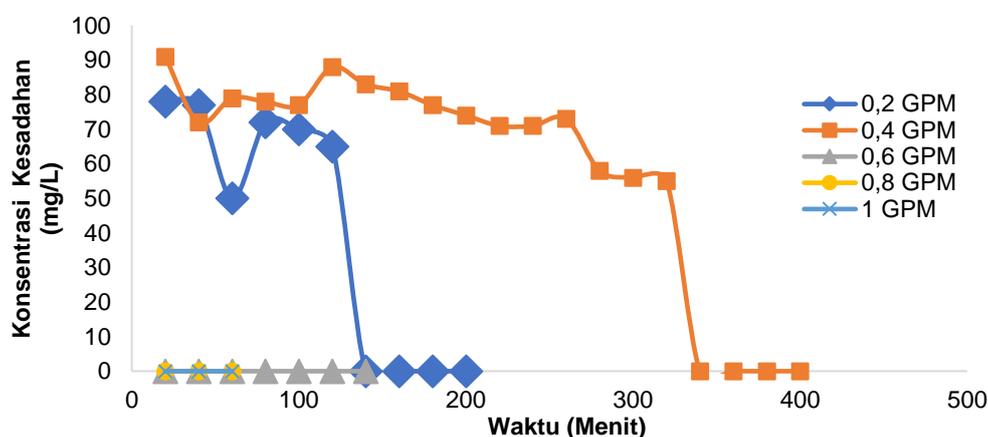


Gambar 3. Sebelum (a) dan sesudah (b) modifikasi alat

Percobaan Sistem Konfigurasi (Kolom Kation, Anion, dan Karbon Aktif)

Hasil penurunan kesadahan untuk variasi laju alir 0,2; 0,4; 0,6; 0,8 dan 1 GPM dapat dilihat pada Gambar 4. Berdasarkan Gambar 4 diketahui bahwa dengan konsentrasi awal 499 mg/L CaCO_3 , semua variasi laju alir dapat menurunkan kesadahan sebesar 100%. Namun, pada laju alir 0,2 GPM terjadi penurunan hingga 0 mg/L CaCO_3 pada menit ke-140 dan pada laju alir 0,4 GPM terjadi penurunan hingga 0 mg/L CaCO_3 pada menit ke-340. Adanya waktu penurunan yang berbeda pada laju alir 0,2 dan 0,4 GPM untuk

mencapai penurunan kesadahan 100% dapat disebabkan oleh belum stabilnya kinerja resin, dimana resin yang masih baru membutuhkan waktu untuk beradaptasi dengan kondisi air baku, sehingga performa resin dalam mengurangi kesadahan belum optimal meskipun sudah dilakukan regenerasi. Sementara itu, untuk laju alir 0,6 GPM, 0,8 GPM, dan 1 GPM memiliki efisiensi penurunan kesadahan 100% pada menit ke-20. Hal tersebut menandakan resin sudah beradaptasi dan bekerja dengan baik dalam menurunkan kesadahan.



Gambar 4. Penurunan kesadahan pada berbagai waktu pengamatan

Pada penelitian Ratnasari *et al.*, (2021) menyebutkan bahwa semakin kecil laju alir maka semakin lama waktu kontak antara resin dengan air baku sehingga penyerapan kesadahan menjadi lebih maksimal. Hal ini disebabkan waktu kontak yang lama memberikan waktu yang lebih panjang bagi partikel resin kation untuk mempertukaran ion H^+ .

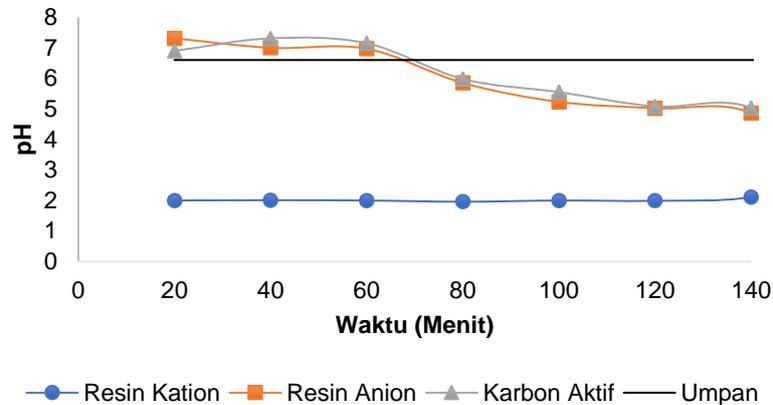
Berdasarkan Gambar 4 dapat diketahui bahwa dengan laju alir 0,6 GPM, 0,8 GPM dan 1 GPM mampu menurunkan kesadahan 100%. Hal ini sesuai juga dengan nilai laju alir optimum pada tahapan servis menurut *The Dow*

Chemical Company (DOW, 2013) yang menjelaskan bahwa laju alir optimum pada tahapan servis berada pada kisaran 2-24 GPM/ft² atau setara dengan 0,2 GPM – 2,6 GPM pada alat yang digunakan. Dengan demikian, ketiga laju alir yaitu 0,6; 0,8; 1 GPM dapat menghasilkan air umpan boiler yang sesuai standar baku mutu air umpan boiler PT. Nalco. Dari ketiga laju alir, laju alir 0,6 GPM dipilih sebagai laju alir terbaik karena dengan laju alir lebih kecil maka waktu tinggal dalam kolom lebih lama sehingga pertukaran ion yang terjadi lebih optimal.

Parameter pH dan Konduktivitas pada Laju Alir Terbaik (0,6 GPM)

Analisis pH dilakukan sebagai indikasi terjadinya pertukaran ion dalam resin dengan

air baku serta dapat mengetahui kondisi resin yang telah jenuh (Partuti, 2014). Analisis pH effluent sistem konfigurasi dapat dilihat pada Gambar 5.



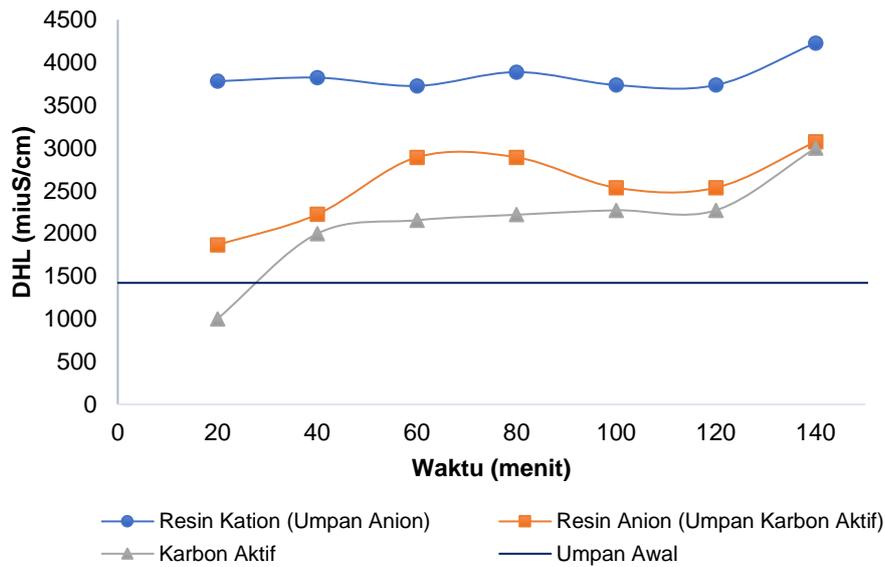
Gambar 5. Hubungan antara pH tiap *effluent* sistem konfigurasi terhadap waktu pengamatan pada laju alir 0,6 GPM

Berdasarkan Gambar 5, pH effluent kolom kation pada menit ke-20 hingga 140 berkisar 2. Hal ini menandakan adanya ion H^+ yang tertukar dengan ion terlarut sebagai kesadahan total pada umpan. Effluent dari kolom kation bersifat asam dan terjadi penurunan kesadahan total hingga 0 mg/L. Pada effluent kolom anion hingga menit ke-140 masih dapat menukarkan ion OH^- dengan ion negatif yang berasal dari effluent kolom kation yaitu Cl^- dan SO_4^{2-} . Resin anion melepaskan ion OH^- dan akan bereaksi atau berikatan dengan ion H^+ dalam larutan sehingga pH effluent kolom anion lebih tinggi dibandingkan dengan pH effluent kolom kation. Adapun pH effluent kolom karbon aktif disetiap menit nya sedikit meningkat dibandingkan pH effluent kolom anion tetapi tidak begitu signifikan.

pH effluent kolom penukar ion saat kesadahan total bernilai 0 mg/L berada dalam rentang 5 – 6,6, yang mana hampir memenuhi hasil olahan resin penukar ion. Hal tersebut

sesuai dengan penelitian (Li et al., 2021) menyatakan air olahan dari penukar ion bernilai netral atau pH 6-7. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar polutan telah dihilangkan oleh resin penukar ion.

Selain itu, dilakukan analisis konduktivitas pada sistem konfigurasi untuk mengetahui kemampuan masing-masing kolom dalam menurunkan ion-ion terlarut di dalam umpan. Pada laju alir 0,6 GPM dan konduktivitas awal sebesar 1.422 $\mu S/cm$, konduktivitas effluent kolom kation menjadi 3.726 $\mu S/cm$ – 4.228 $\mu S/cm$. Hubungan konduktivitas dengan waktu dapat dilihat pada Gambar 6. Sementara itu, konduktivitas effluent kolom anion dan kolom karbon aktif mengalami penurunan dibandingkan dengan konduktivitas effluent kolom kation dengan rata-rata penurunan 33,17% pada effluent kolom anion dan 18,35% pada effluent kolom karbon aktif. Dengan demikian, karbon aktif memberikan kontribusi untuk menurunkan konduktivitas.

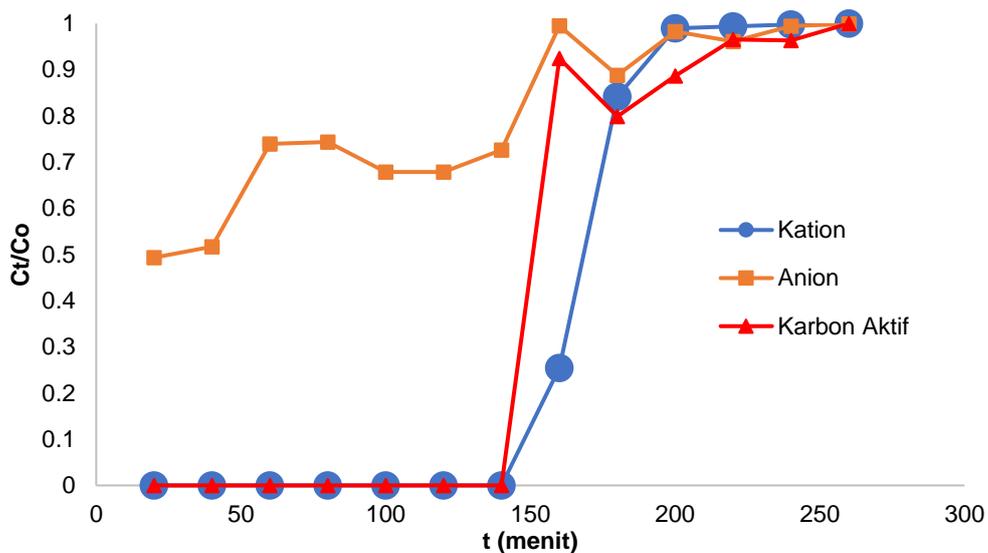


Gambar 6. Hubungan Konduktivitas dengan Waktu Pengamatan pada Laju Alir 0,6 GPM

Kurva Breakthrough

Kurva *breakthrough* digunakan untuk mengetahui waktu servis selama 1 siklus, waktu titik balik, dan waktu titik *exhaust*. Jika sudah tercapai titik *exhaust* maka segera dilakukan regenerasi pada resin kation dan resin anion. Regenerasi dilakukan dengan larutan HCl untuk resin kation dan larutan NaOH untuk resin anion. Gambar 7 memperlihatkan kurva *breakthrough* sistem

konfigurasi pada laju alir 0,6 GPM. Pembuatan kurva *breakthrough* kolom kation dan kolom karbon aktif digunakan nilai kesadahan total untuk parameter Co, sedangkan kolom anion menggunakan nilai konduktivitas yang dikonversi menjadi TDS (mg/L) untuk parameter Co karena resin anion hanya menukarkan ion-ion negatif seperti SO_4^{2-} dan Cl^- .



Gambar 7. Kurva *breakthrough* pada laju alir 0,6 GPM

Gambar 7 menunjukkan kondisi resin kation dan karbon aktif dari menit ke-20 hingga 140 memiliki nilai Ct/Co bernilai 0. Hal tersebut menandakan resin telah menurunkan kesadahan total 100%. Selanjutnya, pada menit ke-160, nilai Ct/Co resin kation dan karbon aktif terjadi titik balik, dimana Ct/Co mengalami peningkatan. Hal tersebut menandakan kemampuan resin kation dan karbon aktif dalam menyerap/menukarkan ion semakin berkurang. Sementara itu, pada resin anion tidak terlihat adanya titik balik karena nilai Ct/Co yang terendah ialah 0,5 pada menit ke-20. Adapun kondisi titik *exhaust* resin kation, anion, dan karbon aktif terjadi pada waktu yang sama yaitu menit ke-260 dimana pada titik tersebut konsentrasi kesadahan total effluent bernilai sama dengan konsentrasi awal umpan. Dari kurva *breakthrough* tersebut diperoleh waktu jenuh dengan memperhitungkan nilai

$\int_0^{\infty} \left(1 - \frac{C}{C_0}\right)$ yang nilainya dapat diwakili dengan luas area kurva hingga titik *exhaust*. Adapun waktu jenuh resin kation dan anion secara berurutan ialah 168 dan 46,4 menit sehingga setelah mencapai waktu tersebut perlu dilakukan regenerasi. Sementara itu, waktu jenuh karbon aktif ialah 159 menit.

Kapasitas Penyerapan

Perhitungan kapasitas penyerapan menggunakan model Thomas, dimana model ini dapat menghitung jumlah ion yang dapat diserap oleh resin dan karbon aktif secara kontinyu. Pengaplikasian model Thomas menggambarkan laju perubahan konsentrasi terhadap waktu dan jarak di sepanjang kolom resin. Kapasitas penyerapan pada kolom resin kation, resin anion dan karbon aktif pada laju alir 0,6 GPM dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kapasitas total penyerapan menggunakan model thomas

Keterangan	Model Thomas				
	KTh (L/min.mg)	q ₀ (mg/g)	R ²	Slope	Intercept
Kation	0,0001804	35,28	0,9211	-0,09	14,706
Anion	0,0000116	43,98	0,7884	-0,0242	1,1747
Karbon Aktif	0,00014496	8,91	0,6831	-0,028	3,2198

Tabel 1 menunjukkan nilai KTh berbanding terbalik dengan kapasitas penyerapan, semakin besar nilai KTh akan menghasilkan kapasitas penyerapan yang rendah. Adapun jenis resin kation yang digunakan yaitu siklus H⁺ dan jenis merek yaitu dowex yang memiliki kapasitas total > 1,8 eq/L (2,25 meq/g). Berdasarkan perhitungan, kapasitas total pada kolom kation ialah 35,28 mg/g (0,705 meq/g) yang diartikan dalam 1 gram resin kation dapat menukar/menyerap 35,28 mg kesadahan total CaCO₃. Kemudian untuk menghitung kapasitas pada resin anion

digunakan parameter konduktivitas yang dikonversikan ke dalam konsentrasi TDS (*Total Dissolve Solid*). Konversi ini dilakukan dengan mengacu pada penelitian (Rusydi, 2018) mengenai pendekatan hubungan konduktivitas dan TDS. Konduktivitas hasil olahan pada resin anion berada pada rentang 1.865 – 3.072 S/cm yang mana pada penelitian (Rusydi, 2018) rentang tersebut masuk ke dalam air jenis *natural water* yang memiliki nilai k sebesar 0,65. Adapun jenis resin anion yang digunakan yaitu trilit MA-12OH dengan siklus OH⁻ dengan kapasitas total > 1 eq/L (1,51 meq/g =

419,6 mg/g) sedangkan dari perhitungan diperoleh kapasitas total resin anion sebesar 43,98 mg/g.

Kapasitas penyerapan resin kation dan anion tersebut memiliki nilai yang lebih rendah dibandingkan dengan kapasitas spesifikasi resin dari produsen. Hal yang dapat dipengaruhi diantaranya konsentrasi yang akan ditukarkan terlalu tinggi, jenis proses regenerasi, adanya kontaminasi, dan lain sebagainya. Penggunaan konsentrasi tinggi pada umpan yang berlebih dapat membuat resin tersebut terpapar dengan jumlah ion yang melebihi kapasitas sehingga kapasitas hasil penelitian ini menjadi lebih rendah dibandingkan kapasitas totalnya karena mencapai titik *exhaust* sangat cepat. Selain itu, menurut (Koponen, 2020), proses regenerasi tidak selalu sepenuhnya sama dengan kondisi pada awal proses karena pertukaran yang tidak merata sehingga masih terdapat residu ion yang tersisa sehingga menghambat pertukaran ion.

Jenis karbon aktif yang digunakan ialah jenis granular dengan nomor iodin sebesar 1.020 mg/g. Berdasarkan perhitungan didapatkan kapasitas total penyerapan pada kolom karbon aktif sebesar 9,61 mg/g. Adanya perbedaan nilai antara kapasitas yang didapatkan dengan kapasitas spesifikasi produsen dapat disebabkan oleh beberapa faktor. (Cechinel et al., 2014) menjelaskan bahwa kapasitas adsorpsi dapat dipengaruhi oleh konsentrasi dan jenis polutan, yang mana karbon aktif lebih baik dalam menyerap ion logam berat seperti timbal dibandingkan dengan menyerap kesadahan total.

KESIMPULAN

Laju alir terbaik pada sistem konfigurasi (kolom kation, anion, dan karbon aktif) yaitu 0,6 GPM karena dapat menurunkan kesadahan total menjadi 0 mg/L CaCO_3 pada menit ke-20 dengan pH pada rentang 5 – 6.6 pada menit ke-20 sampai 140. Karbon aktif dapat berkontribusi dalam menurunkan konduktivitas air baku dengan rata-rata 18,35%. Waktu jenuh resin kation dan anion secara berurutan ialah 168 dan 46,4 menit sehingga setelah mencapai waktu tersebut perlu dilakukan regenerasi. Sementara itu, waktu jenuh karbon aktif ialah 159 menit. Kapasitas pertukaran/penyerapan resin kation, anion, dan karbon aktif berturut-turut sebesar 35,28 mg/g, 43,98 mg/g, dan 9,61 mg/g.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada Politeknik Negeri Bandung yang telah mendukung penelitian ini melalui pendanaan penelitian peningkatan kapasitas laboratorium dengan nomor kontrak B/94.20/PL1.R7/PG.00.03/2023.

DAFTAR PUSTAKA

- Cechinel, M. A. P., Ulson De Souza, S. M. A. G., & Ulson De Souza, A. A. (2014). Study of Lead (II) Adsorption onto Activated Carbon Originating from Cow Bone. *Journal of Cleaner Production*, 65, 342–349. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.020>
- DOW. (2013). Ion Exchange Resins Water Conditioning Manual. In <https://www.lenntech.com/Data-sheets/Dowex-Ion-Exchange-Resins-Water-Conditioning-Manual-L.pdf>, diakses 10 September 2023.
- Hasan, B. O., Nathan, G. J., Ashman, P. J., Craig, R. A., & Kelso, R. M. (2012). The Effects of Temperature and Hydrodynamics on The Crystallization

- Fouling Under Cross Flow Conditions. *Applied Thermal Engineering*, 36, 210–218.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2011.12.027>
- Koponen, A. (2020). *Optimization of Ion Exchange Resin Regeneration*. Turku University of Applied Sciences.
- Li, X., Wu, S., Kan, C., Zhang, Y., Liang, Y., Cui, G., Li, J., & Yang, S. (2021). Application of Ion Exchange Resin in the Advanced Treatment of Condensate Water. *E3S Web of Conferences*, 272.
<https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127201005>
- Nanda, R. (2017). *Pengaruh Variasi Temperatur Feedwater Boiler Terhadap Performance Boiler Type N-600 SA Dengan Kapasitas 20 Ton Uap/Jam Di PT Perkebunan Nusantara V Sei Pagai*. Universitas Islam Riau.
- Nathanael, F., & Ransun, P. A. (2022). *Studi Ion Exchange Untuk Menghasilkan Air Umpam Boiler Berbahan Baku Air Sumur Kecamatan Rungkut*. UPN Veteran Jawa Timur.
- Partuti, T. (2014). Efektivitas Resin Penukar Kation Untuk Menurunkan Kadar Total Dissolved Solid (TDS) Dalam Limbah Air Terproduksi Industri Migas. *Jurnal Integrasi Proses*, 5(1), 1–7.
- Priyanto, & Wilastari, S. (2022). Faktor-Faktor Penyebab Menurunnya Kinerja Boiler Di Pt. Papertech Indonesia. In *Majalah Ilmiah Gema Maritim*, e-issn 24(1).
- Ratnasari, B. Y., Fadillah, N., Astuti, D. H., & Sani. (2021). Penurunan Kadar Ion Logam Berat pada Air Sungai Karah Surabaya dengan Resin Kation. In *Journal of Chemical and Process Engineering ChemPro Journal* 2(3).
- Rusydi, A. F. (2018). Correlation Between Conductivity and Total Dissolved Solid In Various Type Of Water: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>
- Sintya, M. (2022). Perbaikan Kualitas Air Payau Menggunakan Media Kabon Aktif Dan Zeolit. *Ruwa Jurai: Jurnal Kesehatan Lingkungan*, 15(3), 124.
<https://doi.org/10.26630/rj.v15i3.3073>
- Zulriadi, & Danardono, P. (2020). Pengaruh Berbagai Macam Packing Kolom Terhadap Kualitas Air Kebutuhan Boiler (Studi Kasus Pada Alat Ion Exchanger Sistem Batch Dan Kontinyu). *Jurnal Teknik: Ilmu Dan Aplikasi*, 8(1).