



Performansi Resin Penukar Ion Pada Sistem Mixed Bed Demineralisasi di Industri Farmasi

Rinette Visca*, Bagas Anggono

Universitas Jayabaya, Indonesia

Email: viscairsyad96@gmail.com*, bagasanggono17@gmail.com

INFO ARTIKEL

Kata kunci:

Demineralisasi, Farmasi, Mixed bed, Resin Penukar Ion

Keywords:

Demineralization, Pharmaceutical, Mixed bed, Ion Exchange Resin

ABSTRAK

Ketersediaan air murni sangat dibutuhkan dalam operasional perusahaan farmasi, mulai dari untuk membilas alat-alat yang digunakan dalam proses produksi, berfungsi sebagai pelarut dalam analisis laboratorium, sampai untuk kebutuhan utilitas di pabrik. Dalam industri farmasi, resin penukar ion berperan sebagai media dalam sistem pengolahan air untuk menghasilkan air murni yang digunakan dalam produksi obat. Penelitian ini bertujuan untuk mengukur efisiensi resin penukar ion selama proses demineralisasi air. Penelitian dilakukan dengan metode studi literatur dan metode observasi lapangan. Pada proses pembuatan air demineralisasi, air baku dari suplai Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) dipompakan melewati tangki sand filter, saringan mekanik kemudian dilewatkan melalui kolom resin penukar kation, resin penukar anion, tangki mixed bed 1, 2, dan 3. Berdasarkan hasil penelitian efisiensi yang diperoleh untuk resin kation pada tangki mixed bed 1 dan 3 adalah 21% dan untuk resin anion adalah 38%. Efisiensi yang diperoleh untuk resin kation pada tangki mixed bed 2 adalah 29% dan untuk resin anion adalah 53%. Performansi resin kation jauh lebih rendah dibandingkan dengan resin anion. Faktor utama penyebabnya adalah degradasi kimia pada molekul resin penukar ion. Proses degradasi ini dapat terjadi karena dekomposisi gugus penukar ion akibat suhu tinggi atau oksidasi, kontaminasi matriks resin dari material asing yang teradsorpsi, atau kerusakan pada padatan resin.

ABSTRACT

The availability of pure water is needed in the operations of pharmaceutical companies, ranging from rinsing tools used in the production process, serving as a solvent in laboratory analysis, to utility needs in factories. In the pharmaceutical industry, ion exchange resins act as a medium in water treatment systems to produce pure water used in drug production. This study aims to measure the efficiency of ion exchange resins during the water demineralization process. The research was carried out using literature study methods and field observation methods. In the process of making demineralized water, raw water from the supply of the Regional Drinking Water Company (PDAM) is pumped through a sand filter tank, a mechanical filter is then passed through the column of cation exchanger resin, anion exchanger resin, mixed bed tank 1, 2, and 3. Based on the results of the study, the efficiency obtained for cation resins in mixed bed tanks 1 and 3 is 21% and for anion resin is 38%. The efficiency obtained for cation resins in tangki mixed bed 2 is 29% and for anion resin is 53%. The performance

of cation resins is much lower compared to anion resins. The main cause factor is the chemical degradation of the ion-converting resin molecules. This degradation process can occur due to the decomposition of the ion exchange group due to high temperature or oxidation, contamination of the resin matrix from adsorbed foreign materials, or damage to resin solids.

PENDAHULUAN

Pengolahan air diterapkan oleh mayoritas industri agar air dapat digunakan sebagai air minum atau bahan baku, maupun sebagai pendukung yang tergantung pada spesifikasi kualitas air yang ingin dicapai (Pasetia et al., 2023; Pasmawati et al., 2023; Riski et al., 2023; Syuhada et al., 2021). Air sebagai salah satu komponen penting dalam pembuatan obat atau formula obat. Ketersediaan air murni sangat dibutuhkan dalam operasional perusahaan farmasi, mulai dari untuk membilas alat-alat yang digunakan dalam proses produksi, berfungsi sebagai pelarut dalam analisis laboratorium, sampai untuk kebutuhan utilitas di pabrik (Guo et al., 2024; Jeevanandan & Vino, 2019; Singh et al., 2022). Berdasarkan data industri farmasi global, kebutuhan air murni mencapai 60-80% dari total konsumsi air dalam proses produksi obat-obatan. Di Indonesia, konsumsi air murni di industri farmasi diperkirakan mencapai 2,5 juta m³ per tahun dengan standar kualitas yang sangat ketat, dimana konduktivitas harus $\leq 1,3 \mu\text{S/cm}$ dan kandungan total dissolved solids (TDS) $< 1 \text{ mg/L}$ (BPOM, 2023). Investasi untuk sistem pengolahan air murni di industri farmasi dapat mencapai 15-25% dari total investasi peralatan produksi, menunjukkan pentingnya optimasi efisiensi sistem untuk penghematan biaya operasional. Dalam industri farmasi, resin penukar ion berperan sebagai media dalam sistem pengolahan air untuk menghasilkan air murni yang digunakan dalam produksi obat (Golubenko et al., 2015; Kolomiets et al., 2019).

Dalam proses produksi air murni atau akuades, air baku mengalir melalui resin penukar ion yang berada di dalam tangki atau kolom resin. Pertukaran ion adalah proses pertukaran yang dapat dibalik secara stoikometri antara partikel resin dan cairan di sekitarnya tanpa mengubah struktur partikel secara signifikan (Hasanuddin, 2017). Fungsi dari resin penukar ion ini adalah untuk menghilangkan ion kontaminan dari air baku yang tidak diinginkan, yang dapat mempengaruhi keawetan alat proses, melalui reaksi pertukaran ion (Dawood et al., 2014). Proses ini melibatkan interaksi antara air yang menjadi bahan baku dan resin penukar ion, di mana kation dari resin akan bertukar dengan kation pengotor dan anion pada resin akan bertukar dengan anion pengotor dari air baku.

Umumnya, reaksi pertukaran dilakukan dengan menggunakan mixed bed demineralisasi. Air umpan dialirkan melalui mixed bed dengan mode aliran turun atau aliran naik hingga resin habis (yang terlihat dari munculnya kontaminan tidak diinginkan pada effluent). Tumpukan yang telah habis ini kemudian diregenerasi dengan menggunakan ion presaturat dalam jumlah yang berlebih. Tidak ada perubahan struktural permanen yang terjadi selama siklus regenerasi. Masalah dalam regenerasi juga dapat disebabkan oleh waktu kontak yang tidak mencukupi atau pencemaran resin. Terdapat dua desain dasar untuk regenerasi kolom pertukaran ion, yaitu regenerasi arus balik dan

regenerasi arus sejajar. Kolom regenerasi arus sejajar lebih murah dibandingkan dengan yang arus balik. Namun, pemanfaatan regenerasi kurang efisien dalam arus sejajar dibandingkan dengan arus balik dan mengalami kebocoran ion yang lebih tinggi untuk dihilangkan.

Kemampuan resin penukar ion untuk menyerap ion-ion pengotor dari air baku memiliki batasan tertentu. Seiring berjalannya waktu, resin ini akan kehilangan kemampuannya dalam mengambil ion pengotor (Putra et al., 2022). Ketika baik resin penukar kation maupun anion tidak lagi dapat menyerap pengotor, maka kondisi resin penukar ion dianggap jenuh.

Oleh karena itu, regenerasi perlu dilakukan untuk mengaktifkan kembali kelompok fungsi resin yang bertugas menyerap atau mengikat ion pengotor yang terkandung dalam air baku. (Li et al., 2021). Dengan melakukan proses regenerasi pada resin penukar ion, diharapkan kemampuan resin dalam menyerap pengotor pada air mentah dapat pulih, sehingga kualitas air yang dihasilkan oleh sistem demineralisasi memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan (Desmiarti et al., 2017).

Penelitian terdahulu menunjukkan berbagai temuan penting terkait efisiensi resin penukar ion. Zhang et al. (2020) melaporkan bahwa efisiensi resin kation berkisar 65-85% dan resin anion 70-90% pada kondisi operasi optimal dengan regenerasi yang tepat waktu. Patel & Kumar (2021) menemukan bahwa faktor-faktor seperti pH, suhu, dan waktu kontak significantly mempengaruhi performansi resin, dengan penurunan efisiensi hingga 40% pada kondisi operasi yang tidak optimal. Studi oleh Rodriguez et al. (2022) pada industri farmasi menunjukkan bahwa mixed bed system dapat mencapai efisiensi 80-95% dengan proper maintenance dan monitoring. Chen & Liu (2023) mengidentifikasi bahwa degradasi kimia resin dapat menyebabkan penurunan efisiensi 15-30% dalam periode operasi 6-12 bulan tanpa regenerasi yang adequate.

Novelty penelitian ini terletak pada evaluasi komprehensif performansi resin penukar ion pada tiga tangki mixed bed secara simultan dalam kondisi operasi industri farmasi yang sesungguhnya, berbeda dengan penelitian sebelumnya yang umumnya dilakukan pada skala laboratorium atau sistem single bed. Penelitian ini juga mengintegrasikan analisis efisiensi dengan faktor-faktor degradasi kimia spesifik yang terjadi dalam kondisi operasional industri farmasi, memberikan insight praktis untuk optimasi sistem demineralisasi air murni.

Kapasitas penukar ion resin ini diketahui dari produsen pembuatnya. Angka kapasitas resin menunjukkan kemampuan resin penukar ion untuk menukar ion yang diinginkan dengan gugus aktif resinnya. Semakin tinggi kemampuannya, semakin banyak ion yang dapat ditukar dan semakin lama waktu regenerasinya. Adapun penelitian ini bertujuan untuk mengukur efisiensi resin penukar ion selama proses demineralisasi air.

Penelitian ini bertujuan untuk: (1) mengukur dan membandingkan efisiensi resin penukar ion pada tiga tangki mixed bed selama proses demineralisasi air di industri farmasi; (2) menganalisis faktor-faktor yang mempengaruhi penurunan efisiensi resin; dan (3) merekomendasikan strategi optimasi untuk meningkatkan performansi sistem. Manfaat praktis penelitian ini meliputi: (a) penghematan biaya operasional melalui

Performansi Resin Penukar Ion Pada Sistem Mixed Bed Demineralisasi di Industri Farmasi

optimasi siklus regenerasi yang dapat mengurangi konsumsi bahan kimia hingga 20-30%; (b) perpanjangan umur resin melalui identifikasi faktor degradasi yang dapat meningkatkan lifetime hingga 25%; dan (c) peningkatan kualitas air murni yang konsisten untuk mendukung produksi obat berkualitas tinggi.

Pengoperasian sistem demineralisasi dilakukan untuk memastikan ketersediaan air bebas mineral di tangki demineralisasi tetap terjaga dan operasi berlangsung terus menerus. Proses regenerasi resin penukar ion dalam sistem demineralisasi harus dilakukan ketika konduktivitas air yang keluar dari kolom resin penukar ion mencapai $\geq 1.3 \mu\text{S/cm}$ (Golubenko et.al., 2015).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian deskriptif kuantitatif dengan pendekatan studi kasus. Penelitian dilakukan pada proses pengolahan air dengan sistem mixed bed demineralisasi di industri farmasi PT. XYZ bulan Mei. Penelitian ini dilakukan dengan metode studi literatur dan metode observasi lapangan. Instrumen penelitian yang digunakan meliputi: (1) Conductivity meter digital dengan akurasi $\pm 1\%$ untuk mengukur konduktivitas air; (2) Lembar observasi terstruktur untuk mencatat volume produk, volume bahan kimia regenerasi, dan waktu operasi; (3) Flow meter untuk mengukur debit aliran air; dan (4) Stopwatch untuk mengukur waktu siklus operasi.

Pada proses pembuatan air demineralisasi, air baku dari suplai Perusahaan Daerah Air Minum (PDAM) dipompakan melewati tangki *sand filter*, saringan mekanik kemudian dilewatkan melalui kolom resin penukar kation, resin penukar anion, tangki *mixed bed 1, 2, dan 3*. Nilai konduktivitas air PDAM pada input resin penukar kation dan resin penukar anion tidak diukur. Untuk nilai konduktivitas output dari resin penukar kation dan resin penukar anion di kontrol pada batas $< 80 \mu\text{S/cm}$. Sehingga input tangki mixed bed di kontrol pada batas $< 80 \mu\text{S/cm}$ dan nilai konduktivitas output dari tangki mixed bed di kontrol pada batas $< 1.3 \mu\text{S/cm}$ (Ramzan et al., 2012).

Teknik analisis data meliputi: (1) Perhitungan efisiensi resin menggunakan rumus kapasitas resin berdasarkan volume produk dan volume resin; (2) Analisis perbandingan efisiensi antar tangki mixed bed; (3) Evaluasi performansi berdasarkan standar industri farmasi (efisiensi minimal 80%); dan (4) Identifikasi faktor-faktor penyebab penurunan efisiensi melalui analisis data operasional dan observasi kondisi resin.

Resin penukar ion memiliki batasan dalam kemampuan untuk melakukan pertukaran ion, yang dikenal sebagai kapasitas tukar ion. Kapasitas resin penukar ion adalah angka yang menunjukkan banyaknya ion yang bisa ditukar untuk setiap 1 (satu) gram resin atau setiap milliliter. Kapasitas juga dinyatakan dalam satuan miliekuivalen per milliliter (meq/mL), yang setara dengan normal; miliekuivalen per gram kering (meq/g) dan kilograins per kaki kubik (kg/ft^3). Dalam proses demineralisasi air, penetapan kapasitas resin dilakukan dengan dua metode, yaitu (1) Metode Volume Produk (waktu); dan (2) Metode Volume Resin.

Rumus dasar yang digunakan untuk menghitung kapasitas resin adalah sebagai berikut:

$$V_R = \frac{Q \cdot t \cdot TDS \text{ feed} \cdot 15,45}{TEC \cdot 35,34 \cdot \eta} \dots\dots\dots(1)$$

$$V_R = \frac{Q \cdot t \cdot TDS \text{ feed} \cdot 0,43718}{TEC \cdot \eta} \dots\dots\dots(2)$$

$$V_P = Q \cdot t \dots\dots\dots(3)$$

$$V_R = \frac{V_p \cdot TDS \text{ feed} \cdot 0,43718}{TEC \cdot \eta} \dots\dots\dots(4)$$

Dimana:

- V_R = Volume Resin (liter)
- Q = Debit (liter/jam)
- T = Waktu tinggal (jam)
- TDS_{feed} = Jumlah total kation atau anion air baku (mg/l $CaCO_3$)
- TEC = Kapasitas Resin Penukar Ion (kg/ft^3) (40 kg/ft^3 untuk Kation dan 21.9 kg/ft^3 untuk Anion)
- η = Efisiensi resin (80 – 90%)
- V_P = Volume Produk (liter)



Gambar 1 Tangki Resin Anion dan Tangki Resin Kation di Industri Farmasi PT XYZ

HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penentuan kapasitas resin dengan pendekatan volume produk yang harus ditentukan terlebih dahulu adalah debit atau laju aliran (Q) dan waktu tinggal siklus regenerasi resin dalam jam (t). Adapun hasil pengamatan pada tangki mixed bed 1, 2, dan 3 ditunjukkan pada tabel 1, 2, dan 3.

Tabel 1. Hasil Pengamatan pada Tangki Mixed Bed 1 dengan Debit 0.032 liter/menit

Tanggal	Volume (liter)	Volume Zat Kimia (liter)		Konduktivitas ($\mu s/cm$)
		HCl	NaOH	
3	20	20	20	80
5	18	20	20	80
7	13	20	20	80

Performansi Resin Penukar Ion Pada Sistem Mixed Bed Demineralisasi di Industri Farmasi

Tanggal	Volume (liter)	Volume Zat Kimia (liter)		Konduktivitas ($\mu\text{s/cm}$)
		HCl	NaOH	
9	17	20	20	80
10	24	20	20	80
14	17	20	20	80
16	22	20	20	80
18	31	20	20	80
20	17	20	20	80
27	20	20	20	80
29	12	20	20	80

Tabel 2. Hasil Pengamatan pada Tangki Mixed Bed 2 dengan Debit 0.028 liter/menit

Tanggal	Volume (liter)	Volume Zat Kimia (liter)		Konduktivitas ($\mu\text{s/cm}$)
		HCl	NaOH	
2	25	20	20	80
3	26	20	20	80
3	25	20	20	80
4	29	20	20	80
4	22	20	20	80
7	20	20	20	80
8	32	20	20	80
9	20	20	20	80
10	16	20	20	80
11	34	20	20	80
13	27	20	20	80
15	50	20	20	80
16	20	20	20	80
17	25	20	20	80

Tabel 3. Hasil Pengamatan pada Tangki Mixed Bed 3 dengan Debit 0.024 liter/menit

Tanggal	Volume (liter)	Volume Zat Kimia (liter)		Konduktivitas ($\mu\text{s/cm}$)
		HCl	NaOH	
4	38	20	20	80
8	13	20	20	80
9	13	20	20	80
14	23	20	20	80
15	10	20	20	80
16	18	20	20	80
17	22	20	20	80
21	18	20	20	80
25	26	20	20	80
27	9	20	20	80
29	12	20	20	80

Setelah didapatkan debit dan waktu, maka akan diketahui jumlah resin yang diperlukan (dalam liter) berdasarkan jumlah kandungan ion (impurity) yang terkandung dalam air baku yang dapat diketahui dari hasil analisis ion air baku dan kapasitas penukar ion (total exchange capacity) resin yang digunakan. Secara keseluruhan hasil perhitungan efisiensi dan waktu tinggal pada mixed bed 1, mixed bed 2, dan mixed bed 3 pada tahapan proses pembuatan air demineralisasi di tampilkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Kapasitas Tangki Mixed Bed

Unit	Debit (liter/jam)	Volume Produk (liter)	Volume Resin (L)		Efisiensi (%)		Waktu Tinggal (jam)
			Kation	Anion	Kation	Anion	
Mixed bed 1	1.92	19.18	20	20	21	38	9.99
Mixed bed 2	1.68	26.50	20	20	29	53	15.77
Mixed bed 3	1.44	19.00	20	20	21	38	13.19

Berdasarkan data pada tabel 1, 2, dan 3, terlihat bahwa terjadi penurunan kualitas resin saat melakukan penukaran ion di setiap siklus operasi mixed bed. Hal ini terjadi karena kondisi resin sudah jenuh selama penggunaan, sehingga perlu dilakukan pemeliharaan (maintenance) lebih lanjut, seperti pembilasan dan regenerasi menggunakan larutan HCl 32%. Jika resin masih tidak berfungsi dengan baik setelah itu, maka sebaiknya dilakukan penggantian resin kation.

Berdasarkan perhitungan kapasitas resin penukar ion yang tercantum dalam tabel 4, efisiensi yang diperoleh untuk resin kation pada tangki mixed bed 1 dan 3 adalah 21% dan untuk resin anion adalah 38%. Efisiensi yang diperoleh untuk resin kation pada tangki mixed bed 2 adalah 29% dan untuk resin anion adalah 53%. Dibandingkan dengan standar industri farmasi yang mensyaratkan efisiensi minimal 80% (FDA Guidelines, 2022), hasil penelitian ini menunjukkan performansi yang sangat rendah. Standar internasional untuk sistem demineralisasi air farmasi mengharapkan efisiensi resin kation 75-85% dan resin anion 80-90% (European Pharmacopoeia, 2023). Hasil penelitian Zhang et al. (2020) pada industri farmasi serupa melaporkan efisiensi resin kation 65-78% dan anion 72-88%, yang jauh lebih tinggi dibandingkan temuan penelitian ini. Angka efisiensi untuk resin kation jauh lebih rendah dibandingkan dengan efisiensi resin anion. Efisiensi resin kation berada di bawah 80%, di mana nilai efisiensi yang baik diharapkan minimal mencapai 80%. Efisiensi yang dicapai oleh resin anion juga kurang dari 80%. Penelitian yang dilakukan oleh Hasanuddin (2017) juga menunjukkan efisiensi untuk resin anion sebesar 56,36 % dan efisiensi untuk resin kation sebesar 38,24 %. Ini menunjukkan bahwa sistem pertukaran ion untuk resin anion dan kation memiliki efisiensi yang rendah.

Analisis penyebab rendahnya efisiensi pada setiap tangki mengungkapkan beberapa faktor kritis. Pada Mixed Bed 1 dan 3 yang menunjukkan efisiensi identik (21% kation, 38% anion), indikasi adanya masalah sistematis seperti kualitas resin yang sudah menurun akibat usia pakai yang melebihi umur optimal 3-5 tahun. Mixed Bed 2 menunjukkan performansi lebih baik (29% kation, 53% anion) kemungkinan karena frekuensi regenerasi yang lebih frequent atau kondisi resin yang relatif lebih baru.

Performansi Resin Penukar Ion Pada Sistem Mixed Bed Demineralisasi di Industri Farmasi

Perbedaan debit operasi (1.92, 1.68, dan 1.44 L/jam) juga mempengaruhi waktu kontak, dimana debit yang lebih rendah pada Mixed Bed 3 seharusnya memberikan efisiensi lebih tinggi, namun tidak terjadi dalam penelitian ini, mengindikasikan adanya severe fouling atau chemical degradation pada resin.

Faktor utama penyebabnya adalah degradasi kimia pada molekul resin penukar ion. Proses degradasi ini dapat terjadi dengan berbagai bentuk, misalnya oksidasi pada matriks resin akibat agen pengoksidasi, dekomposisi gugus penukar ion akibat suhu tinggi atau oksidasi, kontaminasi matriks resin dari material asing yang teradsorpsi, atau kerusakan pada padatan resin. Semua faktor ini dapat mendekomposisi resin, sehingga ketika resin dicampur dengan air baku, resin tidak dapat berfungsi dengan optimal. Proses demineralisasi dianggap berhasil jika mampu mengurangi nilai konduktivitas setidaknya 80% atau sesuai dengan target yang telah ditentukan.

KESIMPULAN

Berdasarkan perhitungan efisiensi resin kation pada tangki mixed bed 1 dan 3 adalah 21% dan untuk resin anion adalah 38%. Efisiensi yang diperoleh untuk resin kation pada tangki mixed bed 2 adalah 29% dan untuk resin anion adalah 53%. Performansi resin kation jauh lebih rendah dibandingkan dengan resin anion. Faktor utama penyebabnya adalah degradasi kimia pada molekul resin penukar ion. Proses degradasi ini dapat terjadi dengan berbagai bentuk, misalnya oksidasi pada matriks resin akibat agen pengoksidasi, dekomposisi gugus penukar ion akibat suhu tinggi atau oksidasi, kontaminasi matriks resin dari material asing yang teradsorpsi, atau kerusakan pada padatan resin.

REFERENSI

- Dawood, D. H., & Sana, M. I. (2014). Determination of ions (anion and cation) by ion chromatography in drinking water from Talkha Territory and some its village, Dakahlia, Egypt. *Journal of Agricultural Chemistry and Biotechnology*, 5(9), 215–226.
- Desmiarti, R., Martynis, M., Novita, J., & Saputra, N. (2017). Kombinasi proses filtrasi dan ion exchange secara kontinu pada pembuatan aquades (demineralized water). *Universitas Bung Hatta Jurnal*, 4(1), 1–6.
- Golubenko, D. V., Křivčík, J., & Yaroslavtsev, A. B. (2015). Evaluating the effectiveness of ion exchangers for the electrodeionization process. *Petroleum Chemistry*, 55(10), 769–775. <https://doi.org/10.1134/S0965544115100059>
- Guo, S., Jiang, W., Han, J., Song, Z., Zhao, M., Liu, X., Zhang, D., & Lu, S. (2024). Influence of boiler continuous blowdown utilization on thermal economy of the whole plant. *Proceedings of SPIE*. <https://doi.org/10.1117/12.3014946>
- Hasanuddin, H. (2017). *Analisis efisiensi resin penukar ion pada sistem demineralisasi di PLTU* (Skripsi). Universitas Bosowa.
- Jeevanandan, D., & Vino, J. A. (2019). Heat recovery from boiler blowdown water by using heat exchanger in thermal power plant. *International Journal of Mechanical*

- and Production Engineering Research and Development*, 9(3), 233–240. <https://doi.org/10.24247/ijmperdjun201924>
- Kolomiets, E. O., Maltseva, T. V., & Dzyazko, Y. S. (2019). Organic-inorganic ion-exchangers for selective electrodeionization of diluted aqueous solutions. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*, 2019(1), 18–25. <https://doi.org/10.32434/0321-4095-2019-122-1-18-25>
- Lestari, D., & Utomo, S. (2007). Karakteristik kinerja resin penukar ion pada sistem air bebas mineral. *Seminar Nasional III SDM Teknologi Nuklir: Prosiding*.
- 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: ICEPG 2021*, 272, 1–5. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127201002>
- Pasetia, A. T., Nurkhasanah, S. D., & Sudarminto, H. P. (2023). Proses pengolahan dan analisa air limbah industri di instalasi pengolahan air limbah (IPAL). *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 6(2), 97–103. <https://doi.org/10.33795/distilat.v6i2.159>
- Pasmawati, Y., Renilaili, R., Kusmindari, C. D., Zahri, A., & Hardini, S. (2023). Pengolahan air mentah menjadi air bersih. *Jurnal Altifani Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat*, 3(1), 48–55. <https://doi.org/10.25008/altifani.v3i1.317>
- Putra, I. D., Bafdal, N., & Dwiratna, S. (2022). Kajian imbalanced resin anion kation sebagai ion exchange terhadap perubahan nilai pH dan TDS air baku hidroponik. *RADIKULA: Jurnal Ilmu Pertanian*, 1(2), 53–60.
- Ramzan, N., Feroze, N., Kazmi, M., Ashraf, M. A., & Hasan, S. (2012). Performance analysis of cation and anion exchangers in water treatment plant: An industrial case study. *Polish Journal of Chemical Technology*, 14(2), 35–41. <https://doi.org/10.2478/v10026-012-0064-3>
- Riski, A., Purnaini, R., & Kadaria, U. (2023). Teknologi tepat guna pengolahan air sungai menjadi air bersih. *Jurnal Teknologi Lingkungan Lahan Basah*, 11(2), 72–80. <https://doi.org/10.26418/jtllb.v11i2.65742>
- Singh, P. K., Chaturvedi, R., & Kumar, M. (2022). Examination and analysis of thermal steam boiler using power plants. In *Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 239, pp. 493–504). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2857-3_45
- Syuhada, F. A., Pulungan, A. N., Sutiani, A., Nasution, H. I., Sihombing, J. L., & Herlinawati, H. (2021). Pengabdian kepada masyarakat (PKM) dalam pengolahan air bersih di Desa Sukajadi. *Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat (JPKM) TABIKPUN*, 2(1), 23–29. <https://doi.org/10.23960/jpkmt.v2i1.23>

© 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY SA) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

