

Analisis *Fouling* Silika dalam Resin dan Efektivitas Regenerasi Kimia pada Unit *Mixed Bed Demin Plant*

Muhammad Genta Zuan Nur Illyasa¹, Sinardi^{2*}

Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Fajar, Makassar, Sulawesi Selatan

*Corresponding author.

*Email: sinardi@unifa.ac.id

Abstrak

Analisis *Fouling* Resin dan Efektivitas Regenerasi Kimia pada Unit *Mixed Bed Demin Plant*. Kebutuhan air untuk berbagai aktivitas, seperti Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), mewajibkan kualitas air berupa air bebas mineral (air demineralisasi) yang diperoleh melalui proses demineralisasi dengan *mixed bed*. Seiring dengan seringnya pemakaian, resin akan mengalami kejenuhan karena adanya penumpukan kontaminan (*fouling*) yang terikat oleh resin yang menyebabkan menurunnya kualitas air. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi jenis *fouling* pada resin berdasarkan kualitas air dan pengamatan visual resin, serta menganalisis efektivitas regenerasi kimia. Metode penelitian yang digunakan yaitu analisis kualitas air di laboratorium dan pengamatan visual resin. Selanjutnya, proses regenerasi kimia menggunakan metode asam-basa (HCl dan NaOH). Hasil penelitian menunjukkan kualitas air pengolahan demineralisasi memiliki rata-rata nilai silika, kesadahan total, dan konduktivitas secara berturut-turut sebesar 16,71 ppb, 0 ppb, dan 0,159 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dengan efisiensi penurunan sebesar 98,32%, 100%, dan 96,79%. Namun, pada pengujian terakhir diperoleh nilai silika yang melebihi standar < 20 ppb. Hal tersebut menjadi indikasi adanya kebocoran silika (*silica leakage*) pada air *outlet*. Selain itu, perubahan warna resin anion yang semula berwarna putih menjadi merah muda menunjukkan adanya masalah *fouling* pada resin anion. Hasil regenerasi kimia menunjukkan persentase efektivitas terhadap nilai silika sebesar 67,43% dan konduktivitas sebesar 35,22%, sehingga kualitas air kembali sesuai dengan standar. Dapat disimpulkan bahwa proses regenerasi kimia dengan NaOH dan HCl mampu mengembalikan kemampuan resin dalam meningkatkan kualitas air.

Kata kunci: Demineralisasi, Mixed Bed, Silika, *Fouling*, Regenerasi Kimia

Abstract

Analysis of Resin Fouling and Chemical Regeneration Effectiveness in Mixed Bed Demineralization Units. Water requirements for various activities, such as Steam Power Plants, require water quality in the form of mineral-free water (demineralized water) obtained through a demineralization process using a mixed bed. Along with frequent use, the resin will reach saturation due to the accumulation of contaminants (*fouling*) bound by the resin, which leads to a decrease in water quality. This research aims to identify the type of fouling in resin based on water quality and visual observation of the resin, as well as to analyze the effectiveness of chemical regeneration. The research methods used were water quality analysis and visual observation of the resin. Furthermore, the chemical regeneration process used an acid-base method (HCl and NaOH). The results showed that the water quality had average values for silica, total hardness, and conductivity of 16.71 ppb, 0 ppb, and 0.159 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectively, with a removal efficiency of 98.32%, 100%, and 96.79%. However, the final test showed silica values exceeding the standard of < 20 ppb. This indicates silica leakage in the outlet water. Furthermore, the color change from white to pink indicates fouling in the anion resin. The chemical regeneration results showed an effectiveness percentage of 67.43% for silica values and 35.22% for conductivity, bringing the water quality back into compliance with the standards. It can be concluded that the chemical regeneration process with NaOH and HCl is able to restore the resin's ability to improve water quality.

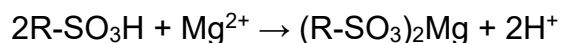
Keywords: Demineralization, Mixed Bed, Silica, Fouling, Chemical Regeneration

PENDAHULUAN

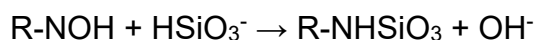
Air merupakan salah satu komponen penting dalam kehidupan yang digunakan untuk berbagai aktivitas. Air digunakan untuk konsumsi, mencuci, keperluan industri, dan pertanian/perkebunan (Mardika et al., 2025). Di industri, air digunakan untuk pembersihan, pemanasan, sanitasi, proses, dan pembuatan uap (Widiyanto et al., 2023). Oleh karena itu, perlu adanya penanganan dan pengolahan agar kebutuhan air dapat tercukupi dan kualitasnya sesuai dengan yang dibutuhkan. Air dengan kualitas tingkat kemurnian tinggi seperti air bebas mineral (*demineralized water*) merupakan aspek utama untuk mendukung keberlanjutan operasional industri, khususnya pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU). PLTU menggunakan air demineral sebagai bahan baku dalam memproduksi uap untuk menggerakkan turbin sehingga menghasilkan energi listrik (Hasmawaty et al., 2025).

Air demineral diperoleh melalui proses demineralisasi menggunakan teknologi pertukaran ion (*ion exchange*) dengan resin penukar kation dan anion, baik di dalam dua tabung terpisah atau satu tabung secara bersamaan, yang disebut *mixed bed* (Kosim et al., 2021). Unit *mixed bed* digunakan pada tahap akhir pengolahan air yang berfungsi untuk mengurangi sisa ion-ion mineral yang tidak dibutuhkan dalam air hingga menghasilkan air dengan tingkat konduktivitas $< 0,2 \mu\text{S}/\text{cm}$ dan silika terlarut $< 20 \text{ ppb}$ (Amim et al., 2024).

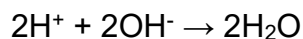
Fouling pada resin merupakan suatu masalah yang sering terjadi pada proses demineralisasi dengan *mixed bed*. Kemampuan tukar resin penukar ion dapat menurun dalam mempertukarkan ion-ion pengotor dalam air yang disebabkan oleh masalah *fouling* ini sehingga berdampak pada penurunan kualitas air produk (Ayuningtiyas et al., 2022). Selain itu, *fouling* sangat berdampak pada aspek ekonomi perusahaan karena adanya peningkatan penggunaan bahan kimia dan volume air pada proses regenerasi resin, serta kerusakan pada komponen pipa *boiler* akibat kualitas air yang tidak memenuhi standar (Husnawati et al., 2021). Oleh karena itu, penting untuk dilakukan penanganan pada masalah *fouling* tersebut. Terdapat reaksi yang terjadi ketika resin mengikat kontaminan dalam air. Berikut merupakan salah satu contoh reaksi yang terjadi.



Resin kation yang bermuatan negatif mengikat kation dari air dan melepaskan ion H^+ .



Resin anion yang bermuatan positif mengikat anion dari air dan melepaskan ion OH^- .



Ion H^+ dan OH^- membentuk H_2O (air) murni, sedangkan kation dan anion yang terikat pada resin akan dilepaskan/dihilangkan melalui proses regenerasi resin.

Umumnya, regenerasi kimia merupakan metode standar yang digunakan untuk mengembalikan kemampuan resin yang telah jenuh akibat *fouling*. Regenerasi pada resin kation menggunakan larutan asam (HCl atau H_2SO_4), sedangkan resin anion menggunakan larutan basa (NaOH) (Ratnasari et al., 2021) (Amim et al., 2024). Berikut merupakan salah satu contoh reaksi yang terjadi selama proses regenerasi.



Namun, efektivitas regenerasi ini bergantung pada jenis dan tingkat *fouling* yang terjadi. Pada penelitian ini akan mengidentifikasi jenis *fouling* yang terjadi pada resin dalam *mixed bed* dan mengevaluasi efektivitas regenerasi kimia yang diterapkan saat ini. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai potensi masalah yang mungkin muncul pada proses demineralisasi dengan *mixed bed* sehingga strategi penanganannya dapat ditentukan sedini mungkin.

METODE

Waktu dan Tempat

Penelitian ini dilakukan di Subdivisi *Water Treatment Plant - Power Plant* PT Wanatiara Persada. Penelitian ini dilakukan pada bulan Januari – April 2026.

Alat dan Bahan

1. Alat

Unit *Mixed Bed* Resin Anion dan Kation, Silika Meter, Konduktivimeter, Botol Sampel, Botol Plastik, Erlenmeyer, *Beaker* Plastik, Pipet Volumetrik, Gelas Ukur, dan Buret.

2. Bahan

Air *Inlet* dan *Outlet* Unit *Mixed Bed*, Asam Amonium Molibdat, Asam Oksalat 10%, Amonium Besi (II) Sulfat, *Buffer* Boraks, Trietanolamin, Indikator Krom K Biru, Etilenadiaminatetraasetat (EDTA) 0,001 mol/L, Air Demineralisasi, HCl 32%, dan NaOH 48%.

Prosedur Penelitian

Prosedur yang dilakukan pada penelitian ini, antara lain analisis kualitas air dengan parameter pengujian silika, kesadahan total, dan konduktivitas yang dilakukan setiap hari terhadap sampel air *inlet* dan *outlet* olahan demineralisasi dengan *mixed bed*. Kondisi operasi yang digunakan pada komponen *mixed bed* tersebut diatur pada laju alir air sebesar 45 m³/jam, tekanan air *inlet* & *outlet* sebesar 0,09 MPa & 0,05 MPa, dan suhu air sebesar 25°C. Berikut merupakan prosedur pengujian kualitas air dengan parameter silika, kesadahan total, dan konduktivitas.

Analisis Silika

Analisis silika dilakukan menggunakan metode molibdosilikat (kolorimetri). Pertama-tama, sampel air *inlet* dan *outlet* unit *mixed bed* masing-masing 100 mL ditambahkan 3 mL asam amonium molibdat dengan waktu tunggu selama 5 menit. Selanjutnya, sampel ditambahkan 3 mL asam oksalat 10% dengan waktu tunggu selama 1 menit. Lalu, ditambahkan 2 mL amonium besi (II) sulfat dengan waktu tunggu selama 8 menit. Terakhir, sampel dituangkan ke dalam alat silika meter, ditunggu hingga hasil pengukuran stabil, dan dicatat hasil pengukuran.

Analisis Kesadahan Total

Analisis kesadahan total dilakukan menggunakan metode titrasi kompleksometri dengan larutan penitar EDTA. Sampel air *inlet* dan *outlet* unit *mixed bed* masing-masing

100 mL ditambahkan 1 mL *buffer* boraks, 2 mL trietanolamin, dan 3 – 4 tetes indikator asam krom k biru (larutan berwarna merah keunguan). Kemudian, masing-masing sampel dititar menggunakan larutan EDTA 0,001 mol/L hingga titik akhir berwarna biru ungu. Dicatat volume penitar dan dilakukan perhitungan nilai kesadahan total.

Analisis Konduktivitas

Analisis konduktivitas dilakukan menggunakan metode elektrokimia. Disiapkan sampel air *inlet* dan *outlet* unit *mixed bed* masing-masing 90 mL dalam *beaker* plastik. Kemudian, elektroda konduktivimeter dicelupkan ke dalam masing-masing sampel dan ditunggu hingga hasil pengukuran stabil.

Regenerasi Kimia

Resin dalam unit *mixed bed* yang telah jenuh diregenerasi menggunakan metode regenerasi asam-basa. Pertama-tama, resin kation dan anion dalam *mixed bed* dipisahkan menggunakan cara pencucian balik (*backwash*). Resin yang telah terpisah diregenerasi selama ± 1 jam secara bersamaan (simultan) menggunakan HCl 2 – 3% untuk resin kation dan NaOH 2,7 – 3,3% untuk resin anion. Setelah selesai, resin dibilas menggunakan air demineralisasi hingga bebas asam dan basa (pH netral). Kemudian, resin kation dan anion dicampurkan kembali menggunakan udara bertekanan. Selanjutnya, resin dialirkan air hasil pengolahan hingga kadar silika pada air *outlet* < 20 ppb.

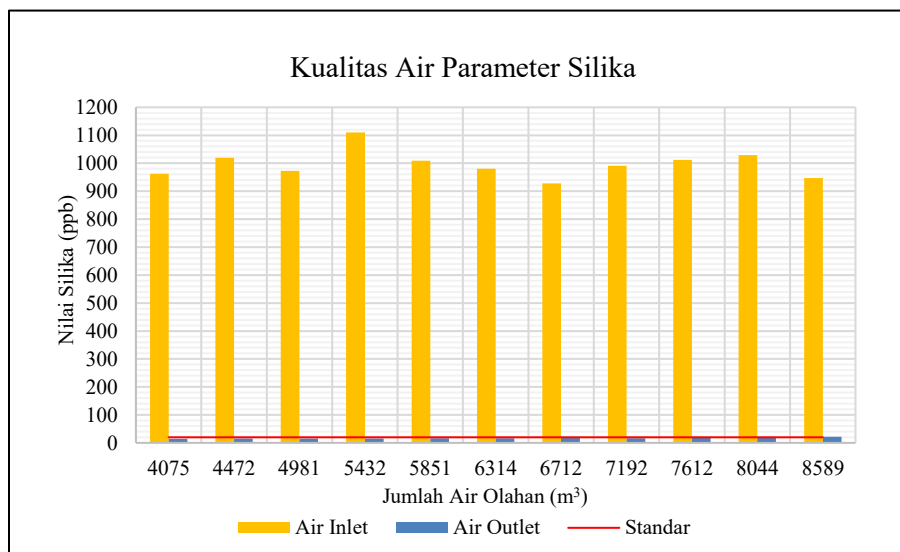
HASIL DAN PEMBAHASAN

Berikut merupakan hasil dari penelitian dengan menggunakan teknologi *mixed bed* dalam pengolahan air demineralisasi dengan kondisi operasi laju alir air sebesar 45 m³/jam, temperatur air sebesar 25°C, tekanan air *inlet* dan *outlet* masing-masing sebesar 0,09 MPa dan 0,05 MPa, serta pengujian kualitas air setelah waktu kontak air dengan resin yaitu 30 – 60 menit.

Analisis Silika

Dalam sistem pengolahan air demineralisasi, silika merupakan kontaminan yang perlu dikendalikan karena dapat menyebabkan *fouling*. Silika yang terkandung dalam air berasal dari air danau yang digunakan sebagai air baku pada pengolahan air. Kandungan silika dalam air danau disebabkan karena jumlahnya yang melimpah dan merupakan

unsur mineral paling banyak kedua yang ditemukan di kerak bumi (Haque et al., 2024). Analisis kadar silika dalam air dapat dilakukan dengan metode molibdosilikat (kolorimetri). Hasil analisis silika dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Grafik Hasil Analisis Silika

Berdasarkan hasil analisis kualitas air di laboratorium, diperoleh nilai silika air *inlet* berada dalam rentang 928 – 1.110 ppb dengan rata-rata sebesar 996,36 ppb, sedangkan nilai silika air *outlet* berada dalam rentang 13,9 – 21,8 ppb dengan rata-rata sebesar 16,71 ppb. Namun, pengujian terakhir menunjukkan titik *breakthrough* resin anion karena terjadi peningkatan nilai silika dari 17,7 ppb menjadi 21,8 ppb, di mana nilai tersebut tidak sesuai dengan standar, yaitu < 20 ppb.

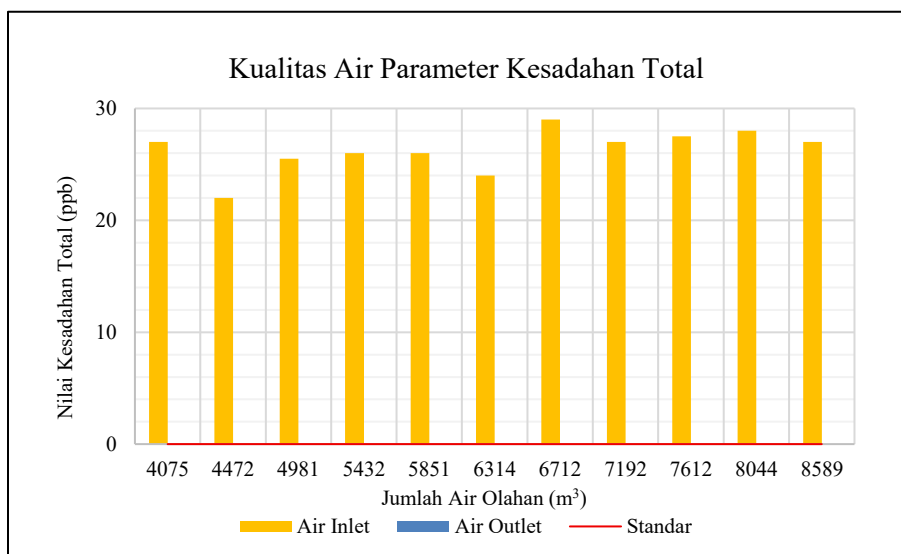
Peningkatan nilai silika pada air outlet tersebut mengindikasikan terjadi kebocoran silika (*silica leakage*) pada resin. Sesuai dengan teori afinitas anion, silika memiliki tingkat afinitas yang lebih rendah pada resin SBA dibandingkan dengan anion lain seperti sulfat atau klorida. Ketika kapasitas tukar ion menurun dan resin mulai jenuh, silika terelusi pertama kali ke dalam air dan ditukar oleh anion lain menyebabkan nilai silika pada air *outlet* meningkat (Lautan Air Indonesia, 2025).

Peningkatan nilai silika tersebut disebabkan oleh nilai silika pada air *inlet* yang cukup tinggi dengan rata-rata sebesar 996,4 ppb. Tingginya nilai silika pada air *inlet* secara langsung mempercepat penurunan kapasitas tukar ion, karena terjadi akumulasi

silika pada resin yang menyebabkan resin menjadi cepat jenuh, yang ditunjukkan oleh volume air olahan yang hanya mencapai 8.589 m³.

Analisis Kesadahan Total

Parameter kesadahan total pada pengujian kualitas air merupakan salah satu indikator penting, khususnya air yang akan digunakan sebagai air umpan *boiler*. Kesadahan total merupakan jumlah total konsentrasi ion Ca²⁺ dan Mg²⁺ yang larut dalam air (Mogi & Hero, 2025). Ketika ion Ca²⁺ dan Mg²⁺ bereaksi dengan karbon dioksida (CO₂) dalam air, akan membentuk kalsium karbonat (CaCO₃) atau magnesium karbonat (MgCO₃) yang menyebabkan air menjadi sadah (Nurisnaini & Purnamasari, 2022). Saat kesadahan dalam air tinggi, dapat membentuk endapan putih yang, ketika digunakan sebagai air umpan *boiler* dapat menyebabkan terbentuknya kerak pada *boiler* yang disebabkan oleh adanya pengendapan (Husnawati et al., 2021). Analisis kesadahan total dalam air dapat dilakukan dengan metode titrasi kompleksometri menggunakan larutan penitar EDTA. Hasil analisis kesadahan total dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2 Grafik Hasil Analisis Kesadahan Total

Berdasarkan hasil analisis kualitas air di laboratorium, diperoleh nilai kesadahan total air *inlet* berada dalam rentang 22 – 29 ppb dengan rata-rata sebesar 26,27 ppb, sedangkan nilai kesadahan total air *outlet* sebesar 0 ppb dari awal pengujian. Nilai kesadahan total air *outlet* tersebut sesuai dengan standar mutu yang telah ditetapkan,

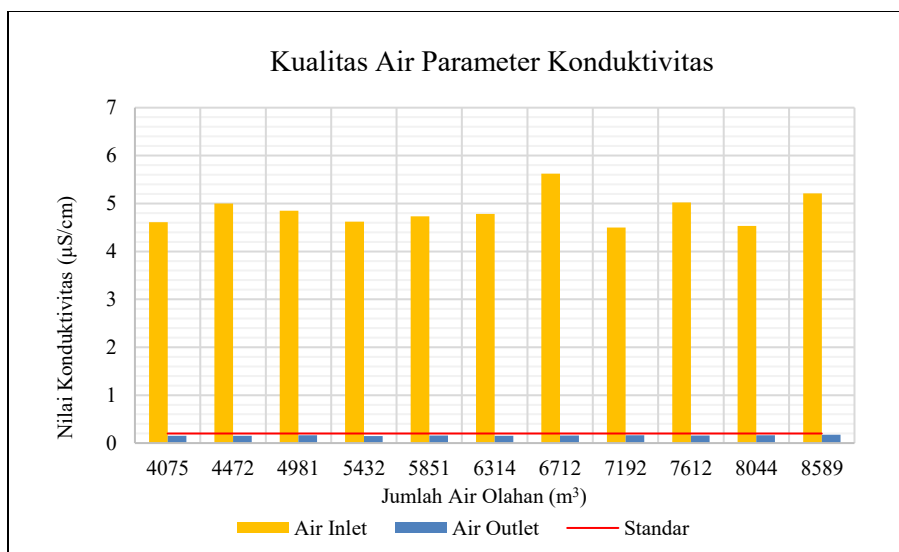
yaitu 0 ppb. Nilai kesadahan total tersebut masih terus sama meskipun jumlah air olahan telah mencapai 8.589 m³.

Dari hasil tersebut diperoleh nilai efisiensi penurunan yang sempurna sebesar 100%. Hal ini menunjukkan bahwa resin kation asam kuat (SAC) yang digunakan memiliki kemampuan tukar ion yang baik. Hal tersebut dipengaruhi oleh tingkat afinitas resin terhadap kation bivalen (valensi dua) seperti Ca²⁺ dan Mg²⁺ yang lebih tinggi, sehingga Ca²⁺ dan Mg²⁺ terikat sempurna oleh resin dan sulit mengalami kebocoran (*leakage*) selama resin belum benar-benar jenuh (Soldatov et al., 2021). Selain itu, rendahnya konsentrasi kesadahan total air *inlet* dari pengolahan dengan RO mengurangi beban resin kation dalam proses pertukaran ion, sehingga umur kapasitas tukar ionnya lebih lama.

Proses regenerasi resin kation yang dilakukan secara bersamaan dengan resin anion memberikan kelebihan bagi resin kation. Meskipun resin kation belum mengalami kejenuhan, regenerasi tersebut mencegah terjadinya *fouling* kesadahan dan memastikan kondisi resin kation kembali optimal.

Analisis Konduktivitas

Konduktivitas merupakan salah satu parameter utama dalam pemantauan kualitas air hasil demineralisasi dan efektivitas resin penukar ion (Aji & Sutarto, 2025). Konduktivitas atau daya hantar listrik merupakan ukuran kemampuan suatu larutan untuk menghantarkan arus listrik, yang disebabkan oleh adanya ion terlarut (garam, mineral, atau bahan kimia anorganik) dalam air dengan satuan nilai $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nilai konduktivitas ini berbanding lurus dengan banyaknya ion terlarut dan akan meningkat seiring dengan kenaikan jumlah ion terlarut yang dapat terionisasi (Suryani et al., 2022). Nilai konduktivitas hasil demineralisasi yang tinggi dan melebihi standar menunjukkan banyaknya ion terlarut dalam air yang dapat menyebabkan korosi dan *fouling* (Syarif & Iryani, 2025). Pengukuran nilai konduktivitas air dapat dilakukan dengan metode elektrokimia menggunakan konduktivimeter. Hasil analisis konduktivitas dapat dilihat pada Gambar 3.



Gambar 3 Grafik Hasil Analisis Konduktivitas

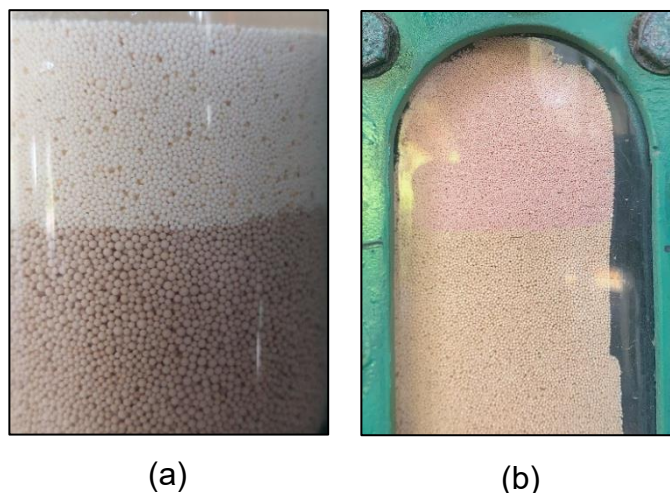
Berdasarkan hasil analisis kualitas air di laboratorium, diperoleh nilai konduktivitas air *inlet* berada dalam rentang 4,50 – 5,62 $\mu\text{S/cm}$ dengan rata-rata sebesar 4,95 $\mu\text{S/cm}$, sedangkan nilai konduktivitas air *outlet* berada dalam rentang 0,148 – 0,176 $\mu\text{S/cm}$ dengan rata-rata sebesar 0,159 $\mu\text{S/cm}$. Seluruh nilai konduktivitas air *outlet* masih berada di bawah batas standar yang ditetapkan, yaitu $<0,2 \mu\text{S/cm}$, dengan persentase efisiensi pengolahan sebesar 96,79%. Hal ini membuktikan bahwa mekanisme pertukaran ion unit *mixed bed* masih optimal tanpa adanya kebocoran ion. Namun, konduktivitas yang rendah tersebut berbanding terbalik dengan nilai silika karena sensitivitasnya yang rendah berupa ion lemah.

Nilai konduktivitas air *outlet* yang stabil dengan rata-rata 0,159 $\mu\text{S/cm}$ menunjukkan bahwa kapasitas tukar ion resin masih sangat baik. Rendahnya nilai konduktivitas tersebut diperoleh dari sistem *mixed bed* itu sendiri yang menyatukan resin kation dan anion, sehingga proses pembentukan air murni melalui ribuan tahap dalam resin. Selain itu, nilai konduktivitas air *inlet* yang rendah dari proses RO mengurangi beban ionik yang ditanggung oleh resin dalam *mixed bed*.

Analisis Fouling Resin

Berdasarkan pengamatan visual pada Gambar 4, terlihat adanya perubahan warna pada resin baru yang semula putih kekuningan menjadi merah muda setelah digunakan. Perubahan warna ini diduga sebagai indikasi terjadinya *fouling* akibat

akumulasi kontaminan yang terperangkap dalam resin akibat pemakaian berulang. Meskipun kondisi resin pascaregenerasi terlihat bersih, perubahan warna yang bersifat permanen tersebut mengindikasikan kemungkinan adanya kontaminan yang teradsorpsi sangat kuat pada resin (*irreversible fouling*) sehingga tidak terelusi secara optimal selama proses regenerasi, sehingga memerlukan metode regenerasi khusus.



Gambar 4 Visualisasi Warna Resin. (a) Resin Baru, (b) Resin Lama

Penentuan kondisi *fouling* resin tersebut tidak hanya berdasarkan pengamatan visual, melainkan didukung dengan analisis kualitas air hasil proses demineralisasi. Berikut merupakan hasil analisis kualitas air pada pengujian terakhir saat jumlah air olahan mencapai 8.589 m³.

Tabel 1 Hasil Pengujian Terakhir Analisis Kualitas Air

Parameter	Nilai	Keterangan	Penyebab
Silika	21,8 ppb	Tidak sesuai standar	Akumulasi SiO ₂ pada resin anion
Kesadahan total	0 ppb	Sesuai standar	-
Konduktivitas	0,176 μ S/cm	Sesuai standar	-

Setelah dilakukan analisis kimia dengan parameter silika, kesadahan total, dan konduktivitas, diperoleh hasil bahwa hanya parameter silika yang tidak sesuai dengan standar. Peningkatan nilai silika pada air *outlet* menunjukkan bahwa resin SBA

mengalami penurunan kapasitas tukar ion, sehingga kemampuan resin dalam mengikat silika menjadi berkurang yang ditandai dengan terjadinya *silica leakage*. Beban silika yang tinggi pada air *inlet* menyebabkan terjadinya *fouling* silika akibat berkurangnya kapasitas tukar ion resin. Kapasitas tukar ion yang semakin kecil menyebabkan kemampuan resin dalam mengikat silika menjadi berkurang, sehingga silika akan ikut terbawa oleh air *outlet*.

Selain itu, silika yang memiliki tingkat afinitas lebih rendah dibandingkan anion lain cenderung lebih mudah terelusi dan digantikan oleh anion lain dengan tingkat afinitas yang lebih tinggi. Akumulasi silika pada resin anion selama siklus pengolahan demineralisasi air yang berulang diduga menyebabkan berkurangnya ukuran pori gugus aktif resin dan penurunan kapasitas tukar ion. Beban silika pada air *inlet* yang cukup tinggi turut mempercepat proses tersebut hingga mempercepat terjadinya *fouling* silika pada resin.

Efektivitas Regenerasi Kimia

Proses regenerasi kimia dilakukan setelah diperoleh hasil analisis kualitas air. Hasil analisis menunjukkan kualitas air parameter silika telah melewati standar yang ditetapkan pada saat jumlah olahan air mencapai 8.589 m³, sehingga perlu dilakukan regenerasi pada resin anion. Proses regenerasi resin ini dilakukan secara simultan antara resin kation dan anion karena menggunakan sistem *mixed bed* di mana resin dicampurkan dalam satu tangki/kolom. Proses regenerasi ini menggunakan larutan HCl 2 – 3% untuk resin kation dan larutan NaOH 2,7 – 3,3% untuk resin anion. Setelah dilakukan regenerasi kimia, diperoleh hasil kualitas air *outlet* sebagai berikut.

Tabel 2 Efektivitas Regenerasi Kimia

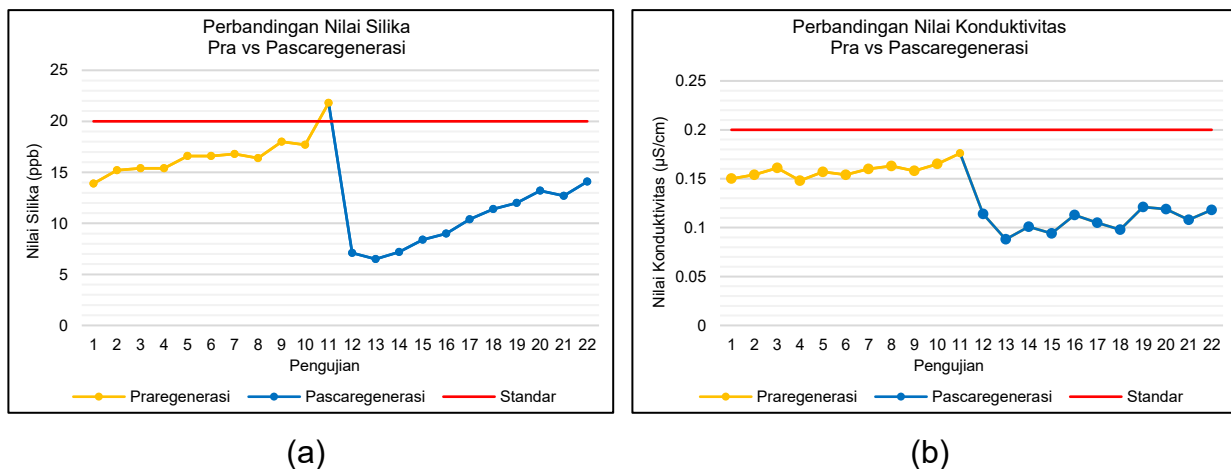
Parameter	Praregenerasi	Pascaregenerasi	Efektivitas
Silika	21,8 ppb	7,1 ppb	67,43%
Kesadahan total	0 ppb	0 ppb	-
Konduktivitas	0,176 μ S/cm	0,114 μ S/cm	35,22%

Berdasarkan data hasil regenerasi, diperoleh persentase efektivitas sebesar 67,43% untuk nilai silika dan 35,22% untuk nilai konduktivitas. Persentase efektivitas

kesadahan total tidak sah karena kesadahan total praregenerasi dan pascaregenerasi sebesar 0 ppb. Persentase efektivitas tersebut diperoleh dari perbandingan nilai praregenerasi dan pascaregenerasi.

Rendahnya persentase efektivitas regenerasi tersebut mengindikasikan adanya kontaminan silika yang teradsorpsi kuat atau mengalami polimerisasi sehingga tidak terelusi secara optimal selama proses regenerasi. Hal tersebut menunjukkan kemungkinan terjadinya *irreversible fouling* silika. *Irreversible fouling* dapat diperparah oleh faktor lain seperti keberadaan ion sulfat dan karbonat yang dapat membentuk deposit dengan silika, sehingga memperkuat ikatan silika pada resin yang sulit terelusi dan dapat menghambat ion kontaminan untuk berikatan dengan gugus aktif resin.

Meskipun nilai tersebut cukup rendah, kualitas air yang dihasilkan pascaregenerasi masih sesuai standar, bahkan cukup jauh dengan standar yang ditetapkan. Selain itu, proses demineralisasi air pascaregenerasi berlangsung cukup optimal yang ditunjukkan dengan kualitas air yang masih sesuai meskipun jumlah air olahan terus meningkat hingga 4.562 m³. Berikut merupakan grafik perbandingan kualitas air yang diperoleh pra dan pascaregenerasi resin.



Gambar 5 Perbandingan Kualitas Air Pra vs Pascaregenerasi. (a) Silika, (b) Konduktivitas

Uji Statistik

Uji statistik merupakan suatu teknik analisis data yang digunakan untuk menguji hipotesis dan membuat keputusan/kesimpulan berdasarkan data yang diambil dari sampel (Ima, 2025). Uji statistik diawali dengan uji normalitas dan dilanjutkan dengan uji T menggunakan perangkat lunak (*software*) *Statistical Package for the Social Sciences* (SPSS) data silika air *outlet* praregenerasi dan pascaregenerasi kimia. Data analisis statistik deskriptif disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3 Data Analisis Statistik Deskriptif

Kelompok	n	Mean	SD	Median	Min	Max
Praregenerasi	11	16,71	2,06	16,6	13,9	21,8
Pascaregenerasi	11	10,18	2,69	10,4	6,5	14,1

Uji normalitas dilakukan untuk mengetahui data sampel yang digunakan pada penelitian terdistribusi normal atau tidak, sebagai syarat uji statistik parametrik seperti uji t agar hasil analisis valid. Metode pengujian yang digunakan adalah metode *Shapiro-Wilk Test*, karena jumlah sampel yang digunakan kecil ($n < 50$). Hasil uji normalitas disajikan pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4 Hasil Uji Normalitas *Shapiro-Wilk Test*

Kelompok	W-Statistik	p-value	Kesimpulan
Praregenerasi	0,876	0,093	Normal
Pascaregenerasi	0,933	0,441	Normal

Berdasarkan tabel di atas, menunjukkan hasil uji normalitas *Shapiro-Wilk* dari kedua kelompok data yaitu terdistribusi normal ($p > 0,05$), sehingga memenuhi syarat untuk dilakukan uji t. Uji T yang dilakukan menggunakan jenis *Paired Sample T-Test*, yang bertujuan untuk menentukan adanya perbedaan secara signifikan dari proses regenerasi resin *mixed bed* terhadap kualitas air dari proses demineralisasi. Hasil uji t disajikan pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5 Hasil Uji T *Paired T-Test*

Parameter	Mean	t	df	p-value	Kesimpulan
Silika	6,53	14,74	10	< 0,001	Signifikan

Uji statistik menunjukkan nilai silika praregenerasi rata-rata sebesar 16,71 ppb turun menjadi 10,18 ppb pascaregenerasi. Berdasarkan tabel di atas, setelah dilakukan uji *Paired Sample T-Test* dengan parameter silika diperoleh hasil *p-value* < 0,001 (< 0,05) menolak hipotesis nol, maka dapat dikatakan bahwa terdapat perbedaan yang sangat signifikan antara nilai silika praregenerasi dan pascaregenerasi. Berdasarkan uji statistik yang dilakukan dapat disimpulkan bahwa regenerasi kimia terbukti efektif untuk mengurangi tingkat *fouling* silika yang terjadi pada resin anion dan memulihkan kemampuan resin dalam mengikat ion pengotor dalam air.

KESIMPULAN

Kualitas air yang diperoleh dari proses demineralisasi dengan *mixed bed* secara keseluruhan telah memenuhi standar *boiler feed water* yang ditetapkan oleh industri. Proses demineralisasi tersebut rata-rata meningkatkan kualitas air pada parameter silika dari 996,4 menjadi 16,7 ppb, parameter kesadahan total dari 26,27 menjadi 0 ppb, dan parameter konduktivitas dari 4,95 menjadi 0,159 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dengan efisiensi penurunan berturut-turut sebesar 98,32%, 100%, dan 96,79%. Namun, seiring dengan meningkatnya jumlah air olahan, nilai silika pada pengujian terakhir meningkat dari 17,7 menjadi 21,8 ppb, di mana angka tersebut telah melewati standar yang ditetapkan.

Nilai silika yang mencapai 21,8 ppb tersebut menjadi indikasi terjadinya *fouling* silika pada resin anion. Peningkatan tersebut disebabkan oleh tingginya nilai silika pada air *inlet*, sehingga terjadi akumulasi silika pada resin dan mengurangi kapasitas tukar resin anion yang menyebabkan resin anion menjadi cepat jenuh. Resin anion yang telah jenuh tersebut tidak mampu lagi mengikat silika dalam air yang memiliki afinitas yang rendah, sehingga silika ikut terbawa oleh air *outlet*. Selain itu, setelah dilakukan pengamatan visual dengan membandingkan resin baru dengan resin yang telah digunakan, terjadi perubahan warna pada resin anion yang semula berwarna putih menjadi merah muda. Hal tersebut terjadi akibat adanya akumulasi kontaminan pada

resin anion yang telah berulang kali digunakan dan proses regenerasi yang tidak sesuai sehingga kontaminan pada resin anion tidak terelusi sempurna.

Masalah *fouling* tersebut diatasi dengan proses regenerasi kimia menggunakan larutan NaOH untuk resin anion dan HCl untuk resin kation. Proses regenerasi tersebut terbukti efektif dapat mengembalikan kemampuan resin dalam mengeliminasi ion-ion dalam air. Hal tersebut dibuktikan dengan kualitas air olahan kembali sesuai dengan standar. Parameter silika berhasil meningkatkan kualitas air dari 21,8 menjadi 7,1 ppb dengan tingkat efektivitas mencapai 67,43%, parameter kesadahan total dari 0 ppb tetap 0 ppb, dan parameter konduktivitas dari 0,159 menjadi 0,114 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dengan tingkat efektivitas sebesar 35,22%. Selain itu, hasil uji statistik *T-Test* menunjukkan adanya perbedaan (penurunan) yang signifikan pada nilai silika setelah dilakukan regenerasi resin, sehingga resin dapat digunakan kembali dalam proses demineralisasi.

DAFTAR REFERENSI

- Aji, A. A. W., & Sutarto, E. (2025). Studi Eksperimental Peningkatan Kinerja Demine Water System pada Regenerasi Cation Menggunakan Metode Mixing Tank. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Ronggolawe (SENATOR)*, 1. <https://stt-ronggolawe.ac.id/jurnal/index.php/senator/article/download/648/332>
- Amim, M. M., Rulianah, S., & Yulianto, E. (2024). Efektivitas Perubahan Setting Waktu Step Rinsing pada Proses Regenerasi Mixed Bed di Water Treatment Plant Unit 7,8 PT. POMI. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 10(1), 91–102. <https://doi.org/10.33795/distilat.v10i1.4876>
- Ayuningtiyas, K. K., Hidayah, E. N., & Aussie Amalia. (2022). Kapasitas Resin Immobilized Photocatalyst Technology (RIPT) untuk Menurunkan Parameter Bod Limbah Cair Industri Tahu. *INSOLOGI: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 1(5), 595–602. <https://doi.org/10.55123/insologi.v1i5.1002>
- Haque, M. Z., Afiati, N., & Jati, O. E. (2024). Kadar Silika (SiO_2) terhadap Kelimpahan Diatom Bentik di Sungai Jamblang Kabupaten Cirebon. *Bioscientist: Jurnal Ilmiah Biologi*, 12(1), 14. <https://doi.org/10.33394/bioscientist.v12i1.9192>

- Hasmawaty, Yulistia, E., & Nurjaya. (2025). Analisis Kualitas Air Bersih untuk Kebutuhan Domestik dan Non Domestik PLTU Baturaja. *Chemical Engineering Journal Storage*, 5(4), 483–498. <https://doi.org/10.29103/cejs.v5i4.22646>
- Husnawati, Bhernama, B. G., & Tarmizi. (2021). Analisis Air Boiler dengan Parameter pH, Alkalinitas, TDS, Hardness dan Silika di PT. Beurata Subur Persada. *AMINA*, 3, 62–68. <https://doi.org/10.22373/amina.v3i2.2002>
- Ima. (2025). *Uji Statistik: Pengertian, Jenis, dan Aplikasinya dalam Penelitian*. TESIS.ID. <https://tesis.id/blog/uji-statistik-pengertian-jenis-dan-aplikasinya-dalam-penelitian/>
- Kosim, M. E., Prambudi, D., & Siskayanti, R. (2021). Analisis Efisiensi Penukar Ion Sistem Demineralisasi Pada Pengolahan Air di Proses Produksi Electroplating. *Seminar Nasional Sains Dan Teknologi*, 1–8. <https://jurnal.umj.ac.id/index.php/semnastek/article/view/11456/6507>
- Lautan Air Indonesia. (2025). *Mengapa Air Demineralisasi Masih Mengandung Silika*. <https://www.lautanairindonesia.com/id/publication/demineralized-water-still-contains-silica/>
- Mardika, M. S. H., Zakaria, M., Fitria, N. W., Salsabila, S., Kinanti, C., Mulyana, R., & Wardana, N. (2025). Analisis Kebutuhan dan Ketersediaan Air Bersih di Wilayah Medan Amplas. *Jurnal Media Akademik (JMA)*, 3(6), 3031–5220. <https://jurnal.mediaakademik.com/index.php/jma/article/download/2239/1802>
- Mogi, A., & Hero, T. A. F. (2025). Analisis Kesadahan Total Berdasarkan Kadar CaCO_3 pada Air PDAM di Wilayah Waioti, Kabupaten Sikka Menggunakan Metode Titrasi Kompleksometri. *Jurnal Penelitian Ilmu Kesehatan Dan Farmasi*, 2(2). <https://jurnal1.akfarstfransiskusxaverius.ac.id/index.php/jikf/article/view/22>
- Nurisnaini, R., & Purnamasari, A. P. (2022). Uji Kadar Kesadahan Total Air Danau Universitas Negeri Surabaya Ketintang Secara Titrimetri. *Indonesian Chemistry and Application Journal*, 5(2). <https://doi.org/10.26740/icaaj.v5i2.23210>

- Ratnasari, B. Y., Fadillah, N., Astuti, D. H., & Sani. (2021). Penurunan Kadar Ion Logam Berat pada Air Sungai Karah Surabaya dengan Resin Kation. *Journal of Chemical and Process Engineering ChemPro Journal*, 02(3), 7–12. <https://doi.org/10.33005/chempro.v2i03.79>
- Soldatov, V. S. ergeevich, Vonsovich, N. V., & Korshunova, T. A. (2021). Equilibrium of Ion Exchange of Calcium, Magnesium and Potassium for Proton on Fibrous Carboxylic Ion Exchanger. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus Chemical Series* 57(2), 135–143. <https://doi.org/10.29235/1561-8331-2021-57-2-135-143>
- Suryani, F., Madagaskar, & Moulita, R. A. N. (2022). Analisis Pengaruh Waktu dan Tekanan Terhadap Demineralisasi Air Buangan AC dengan Metode Reverse Osmosis. *Jurnal Redoks*, 7(1), 1. <https://jurnal.univpgri-palembang.ac.id/index.php/redoks/article/download/7924/5904>
- Syarif, N. R., & Iryani, A. S. (2025). Analisis PengaruhpH, Konduktivitas, dan PO4 pada Kualitas Air Boiler di PT Merdeka Tsingshan Indonesia. *Journal of Scientech Research and Development*, 7(1). <https://doi.org/10.56670/jsrd.v7i1.929>
- Widianto, Y. T., Hendrawati, N., Suharti, P. H., & Wulan, D. R. (2023). Perhitungan Efisiensi Total Kebutuhan Air di Unit Utilitas pada Industri Air Minum dalam Kemasan. *DISTILAT: Jurnal Teknologi Separasi*, 9(4), 443–452. <https://doi.org/10.33795/distilat.v9i4.4385>