

ANALISIS KINERJA *MIXED BED* PADA PLTU PT YTL JAWA TIMUR: STUDI KAPASITAS TUKAR ION, STRUKTUR MIKROSKOPIS, DAN *THROUGHPUT* RESIN

Sephira Nanda Maheswari¹, Windi Zamrudy¹, Asalil Mustain¹, Erry Nabil²

¹Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Malang, Jl. Soekarno Hatta No. 9, Malang 65141, Indonesia

²PT YTL Jawa Timur Jl. Raya Surabaya Situbondo KM. 141, Desa Binor, Kabupaten Probolinggo 67291, Indonesia

sephirananda@gmail.com, [windi.zamrudy@polinema.ac.id]

ABSTRAK

PLTU PT YTL Jawa Timur memanfaatkan air laut sebagai sumber utama air proses, yang kemudian diolah melalui sistem *mixed bed* menggunakan resin penukar ion untuk menghasilkan air demineral. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kondisi resin dalam unit *mixed bed* 01 guna mengidentifikasi adanya *resin degradation* dan resin *fouling* sebagai penyebab penurunan performa sistem. Metode yang digunakan adalah pengambilan sampel resin dari beberapa titik *mixed bed*, dilanjutkan dengan analisis mikroskopis dan perhitungan kapasitas tukar ion (TEC), serta *throughput* eksperimental dan aktual. Variabel utama yang dianalisis adalah kapasitas tukar ion resin kation dan anion serta efisiensi penurunan ion terlarut. Hasil menunjukkan bahwa resin kation mengalami degradasi sebesar 21% dan resin anion sebesar 7%, ditandai dengan keretakan dan pecahnya struktur resin, terutama pada resin kation. Namun demikian, tidak ditemukan tanda-tanda *fouling* pada resin berdasarkan hasil observasi visual dan mikroskopis. Selain itu, *throughput* aktual yang mendekati 20.000 ton lebih besar dari desain awal 6.500 ton, menunjukkan bahwa penurunan performa bukan disebabkan oleh degradasi resin.

Kata kunci: *mixed bed, resin degradation, resin fouling, resin penukar ion.*

ABSTRACT

The PT YTL Jawa Timur Steam Power Plant utilizes seawater as its primary water source, which is treated using a *mixed bed* system with ion exchange resins to produce demineralized water. This study aims to analyze the condition of resins in the *mixed bed* unit 01 to identify potential *resin degradation* and *resin fouling* as factors in system performance decline. The methodology involved sampling resin from several points within the *mixed bed*, followed by microscopic observation and calculations of total exchange capacity (TEC), as well as experimental and actual *throughput*. The primary variables analyzed are the ion exchange capacity of both cation and anion resins and the effectiveness of ion removal. The results show that cation resin degradation reached 21% and anion resin 7%, marked by cracking and structural damage, particularly in cation resins. However, no signs of *fouling* were observed based on visual and microscopic analysis. Furthermore, the actual *throughput* of approximately 20,000 tons exceeded the design *throughput* of 6,500 tons, indicating that performance decline was not due to resin degradation.

Keywords: *mixed bed, resin degradation, resin fouling, ion exchange resin.*

1. PENDAHULUAN

Resin penukar ion merupakan material yang memiliki peran penting dalam pengolahan air, terutama dalam sistem demineralisasi seperti pada *water treatment plant* (WTP) di PLTU. Resin ini mampu menghilangkan ion-ion terlarut dalam air melalui proses pertukaran ion, sehingga dapat memenuhi standar kualitas air umpan *boiler* [1,2]. Dalam praktiknya, resin anion dan resin kation ditempatkan secara bersamaan dalam kolom *mixed bed* untuk meningkatkan efisiensi pertukaran ion dan menghasilkan air dengan konduktivitas sangat rendah, ideal untuk aplikasi industri [3,4].

PT YTL Jawa Timur merupakan perusahaan pembangkit listrik tenaga uap (PLTU) swasta yang bergerak dalam bidang pengoperasian dan perawatan PLTU untuk unit 5 dan 6 yang berbahan bakar batubara dengan kapasitas 2 x 610 MW, total 1220 MW untuk memenuhi kebutuhan listrik di Jawa, Bali dan Madura melalui perjanjian jual listrik (PPA) dengan PT PLN Persero selama 30 tahun [1]. Salah satu kebutuhan utama pada PLTU adalah air yang digunakan sebagai air proses (air umpan *boiler*), air pendingin pada kondensor dan air *potable*. Penggunaan air laut sebagai sumber air harus melalui proses pengolahan terlebih dahulu. Air laut mengandung ion-ion dalam jumlah yang besar dan konduktivitas yang tinggi (52.000 μS) yang dapat membahayakan peralatan pada *water steam cycle* yaitu bahaya korosi dan *scaling* (kerak) sehingga diperlukan *treatment* pada air laut agar diperoleh air dengan persyaratan tertentu [5].

Water treatment plant merupakan proses pengolahan air baku menjadi air proses (bebas mineral/demineral) [6]. Dalam hal ini, material penukar ion (*ion exchanges*) merupakan bahan umum untuk pemurnian berbagai aliran air [2,7]. dimana digunakan unit resin penukar ion yang terdiri dari resin penukar anion dan resin penukar kation pada tangki kolom *mixed bed* resin [7]. Desain *mixed bed* di PT YTL Jawa Timur memiliki *throughput* 6.500 ton yang dapat menghasilkan air demin dengan parameter konduktivitas air demin <0,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dan silika <5 ppb. *Throughput* ini mengacu pada total volume air yang dapat diproses oleh unit *mixed bed* dalam satu siklus operasi sebelum dilakukan regenerasi resin. Nilai *throughput* menjadi indikator penting dalam menentukan kapasitas operasional sistem, karena semakin besar *throughput* maka semakin tinggi kemampuan unit dalam mengolah air secara kontinu tanpa penurunan kualitas *output*. Bejana *mixed bed* ini digunakan sebagai tahap akhir dari penghilangan padatan terlarut. Air dari bejana *mixed bed* akan menuju *demineralized water storage tank* yang nantinya akan digunakan sebagai air umpan *boiler* dan diharapkan bahwa air telah memenuhi syarat untuk digunakan dalam siklus air [3].

Penukar ion merupakan elemen kunci dalam menjaga kualitas air dengan menghilangkan kontaminan dan menjaga keseimbangan pH air, penukar ion membantu menjaga operasi yang efisien, meningkatkan umur operasional peralatan, dan mengurangi risiko kerusakan dan *downtime* yang dapat mengganggu produksi energi listrik [4,8,9]. Teknologi resin penukar ion terus mengalami pengembangan, termasuk penggunaan resin berbasis nanopartikel dan resin dengan modifikasi permukaan untuk meningkatkan kapasitas dan ketahanan terhadap *fouling* [10].

Ion-ion yang ada di dalam resin bertukar dengan ion-ion yang ada di dalam air dimana resin merupakan polimerisasi dari *divinyl benzene* dan stirena serta ditambah dengan gugus aktif, dan gugus aktif ini yang membedakan jenis resin [11]. Resin ada dua macam yaitu kation resin yang memiliki gugus aktif H^+ dan anion resin yang memiliki gugus OH^- [12]. Resin kation

akan mengikat ion-ion positif yang terdapat dalam air, sedangkan anion resin mengikat ion-ion negatif yang terdapat dalam air [13]. Setelah keluar dari *mixed bed*, konduktivitas air menjadi 0,05-0,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Apabila nilai konduktivitas *outlet mixed bed* lebih dari 0,25 $\mu\text{S}/\text{cm}$, maka dapat disebabkan karena resin yang jenuh, sehingga perlu dilakukan regenerasi resin. Kondisi kejenuhan ini berkaitan langsung dengan kapasitas tukar ion (*ion exchange capacity*), yaitu jumlah maksimum ion yang dapat ditukar oleh resin per satuan volume atau massa resin. Kapasitas ini biasanya dinyatakan dalam satuan eq/L atau meq/g dan menjadi parameter utama dalam menentukan efektivitas resin. Semakin tinggi kapasitas tukar ion, semakin banyak ion yang dapat diikat sebelum resin mencapai kondisi jenuh, sehingga memperpanjang waktu operasi dan meningkatkan efisiensi sistem.

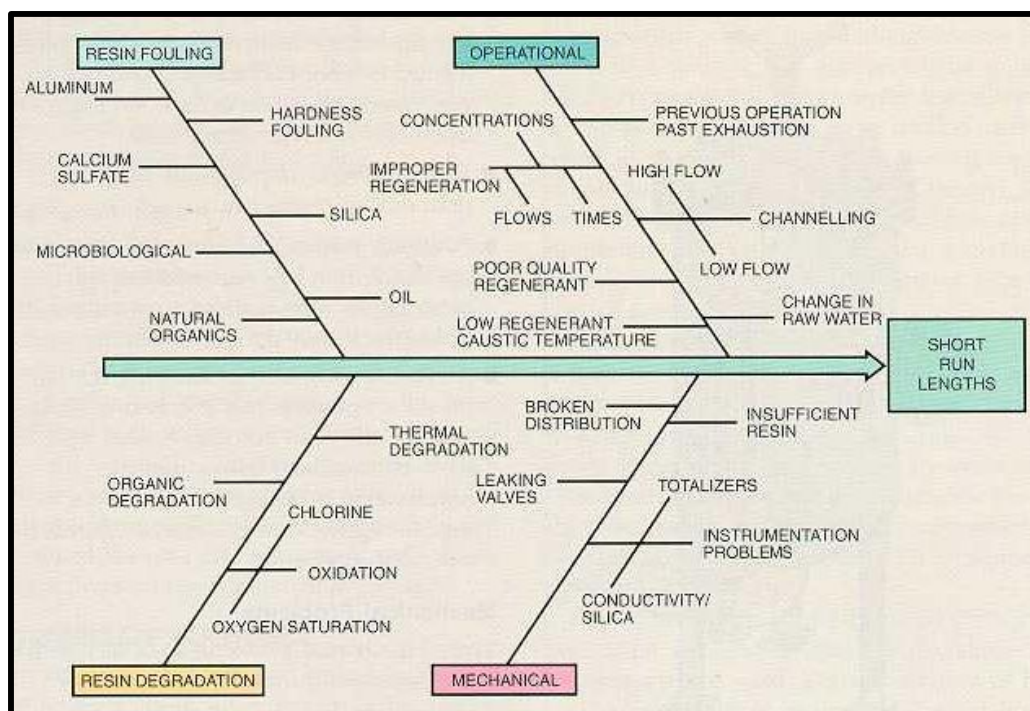
Performa resin yang digunakan dalam jangka panjang akan mengalami penurunan akibat degradasi fisik dan kimia, serta potensi terjadinya *fouling* akibat penumpukan kontaminan pada permukaan resin. Resin *fouling* merupakan kondisi dimana terjadi akumulasi zat pengotor seperti bahan organik, koloid, minyak, maupun mikroorganisme pada permukaan dan pori-pori resin, sehingga menghambat difusi ion ke dalam situs aktif resin. *Fouling* ini menyebabkan penurunan laju pertukaran ion, peningkatan tekanan operasi, serta penurunan kualitas air hasil. Selain itu, *resin degradation* mengacu pada kerusakan struktur resin baik secara fisik maupun kimia, seperti pecahnya butiran resin (*attrition*), oksidasi, maupun kerusakan gugus fungsi aktif akibat paparan suhu tinggi, bahan kimia regenerasi, atau oksidator kuat. Degradasi ini bersifat permanen dan menyebabkan penurunan kapasitas tukar ion secara irreversibel. Studi terbaru menunjukkan bahwa *fouling* dan keausan permukaan resin secara signifikan mempengaruhi kinerja resin dalam jangka panjang, terutama pada sistem air laut dan limbah industri yang kompleks [14]. Penurunan performa ini juga berdampak langsung pada berkurangnya kapasitas tukar ion efektif serta menurunnya *throughput* operasional, sehingga siklus regenerasi menjadi lebih sering dan biaya operasional meningkat [15].

Penelitian ini difokuskan pada analisis permasalahan yang timbul pada kapasitas daya tukar resin yaitu dari sisi resin *degradation* dan resin *fouling* yang terjadi dibandingkan dengan awal penggunaan resin pada *mixed bed*. Data yang dianalisis mencakup hasil pengujian laboratorium terhadap resin anion dan kation, serta evaluasi terhadap performa *mixed bed* berdasarkan data operasi aktual. Efisiensi *mixed bed* juga dihitung dengan mempertimbangkan kapasitas aktual resin, untuk menilai apakah penurunan performa *mixed bed* disebabkan oleh degradasi resin atau faktor operasional lainnya seperti laju alir, beban ion, atau frekuensi regenerasi yang tidak optimal. Selain itu, berbagai studi terbaru mendukung pentingnya evaluasi performa resin berbasis parameter teknis seperti kapasitas tukar total (TEC), efisiensi pertukaran ion, serta analisis mikroskopik terhadap struktur resin [16,17]. Dengan demikian, penelitian ini juga memanfaatkan pendekatan komprehensif dengan mempertimbangkan aspek fisik, kimia, dan operasional dalam menganalisis penyebab penurunan performa *mixed bed* di PT YTL Jawa Timur.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi penyebab penurunan performa sistem *mixed bed* 01 di PT YTL Jawa Timur, yang secara signifikan terjadi sebelum mencapai kapasitas desain *throughput* 6.500 ton. Permasalahan yang diidentifikasi berfokus pada

kemungkinan kerusakan resin akibat dua faktor utama, yaitu *resin degradation* dan resin *fouling*, sebagaimana divisualisasikan melalui diagram *fishbone* yang ditunjukkan oleh Gambar 1. Model penelitian yang digunakan bersifat deskriptif-analitis dengan pendekatan studi kasus, menggunakan data aktual operasional serta pengamatan langsung terhadap karakteristik resin yang digunakan di lapangan. Pendekatan *fishbone* diagram dipilih sebagai alat bantu analisis sebab-akibat untuk mengelompokkan sumber masalah berdasarkan faktor proses, bahan, metode, dan lingkungan.



Gambar 1. Pemecahan masalah dengan *fishbone diagram*

Teknik pengumpulan data dalam penelitian ini mencakup observasi lapangan, wawancara teknis dengan operator, dokumentasi data operasional *mixed bed* (seperti catatan *throughput*, konduktivitas, dan kadar silika), serta pengambilan sampel resin anion dan kation untuk dilakukan analisis di laboratorium. Data laboratorium meliputi pengujian fisik resin menggunakan mikroskop cahaya guna mengamati kondisi permukaan resin, warna, dan kemungkinan *fouling*. Sementara itu, pengujian kimia dilakukan untuk mengukur kapasitas tukar ion (*Total Exchange Capacity/TEC*) sebagai indikator degradasi resin, melalui metode titrasi setelah perlakuan dengan larutan regenerasi standar seperti HCl, NaOH, dan NaCl.

Resin degradation dalam penelitian ini didefinisikan sebagai penurunan kapasitas pertukaran ion akibat perubahan kimia dan fisik resin yang disebabkan oleh faktor lingkungan, termasuk suhu tinggi (*thermal degradation*), oksidasi oleh oksigen terlarut maupun klorin, serta paparan senyawa organik yang merusak struktur polimer resin. Resin *fouling* didefinisikan sebagai penurunan efisiensi resin akibat terhalangnya permukaan aktif oleh kontaminan seperti aluminium, kalsium sulfat, silika, senyawa organik (humus, asam humat), mikroorganisme, atau minyak. Variabel utama dalam penelitian ini adalah kapasitas

tukar ion (TEC) dan *throughput* aktual yang dicapai sebelum resin gagal mempertahankan parameter kualitas air (konduktivitas <0,1 µS/cm dan silika <5 ppb).

Analisis data dilakukan secara kuantitatif dan kualitatif. Nilai TEC dibandingkan dengan spesifikasi awal pabrikan untuk mengetahui derajat degradasi resin. Sementara itu, *throughput* aktual dihitung berdasarkan volume air yang berhasil diolah sebelum kualitas air turun di bawah standar. Data visual mikroskopis digunakan untuk mendukung identifikasi *fouling* secara morfologis. Dengan menggabungkan hasil uji laboratorium dan data operasional, dapat disimpulkan apakah penurunan performa disebabkan oleh *resin degradation*, *resin fouling*, atau keduanya secara simultan.

2.1. Metode Perhitungan

Dalam penelitian ini digunakan beberapa metode perhitungan untuk mengevaluasi kondisi dan kapasitas kerja resin *mixed bed*.

a) Perhitungan *Salt Splitting Capacity*

Perhitungan SSC menggunakan persamaan :

$$SSC = \frac{V_t \times C_t}{V_r} \quad (1)$$

Keterangan:

SSC = *salt splitting capacity* (mEq/mL)

V_t = volume titran (mL)

C_t = konsentrasi titran (mL)

V_r = volume resin (mL)

(Sumber: PT YTL Jawa Timur)

Diketahui:

V_t = 3 mL

C_t = 0,46 N

V_r = 10 mL

Maka,

$$\begin{aligned} SSC &= \frac{3 \text{ mL} \times 0,46 \text{ N}}{10 \text{ mL}} \\ &= 0,138 \text{ mEq/mL resin} \end{aligned}$$

b) Perhitungan *Weak Base Capacity*

Perhitungan WBC menggunakan persamaan :

$$WBC = \frac{(20 - V_t) \times C_t}{V_r} \quad (2)$$

Keterangan:

WBC = *weak base capacity* (mEq/mL)

V_t = volume titran (mL)

C_t = konsentrasi titran (mL)

V_r = volume resin (mL)

(Sumber: PT YTL Jawa Timur)

Diketahui:

V_t = 1,25 mL

C_t = 0,52 N

$$V_r = 10 \text{ mL}$$

Maka,

$$\begin{aligned} \text{WBC} &= \frac{(20-1,25) \text{ mL} \times 0,52 \text{ N}}{10 \text{ mL}} \\ &= 0,975 \text{ mEq/mL resin} \end{aligned}$$

c) Perhitungan Total Exchange Capacity (TEC)

Terdapat perbedaan perhitungan TEC untuk resin anion dan kation, perhitungan TEC untuk masing-masing resin menggunakan persamaan:

$$\text{TEC resin anion} = \text{SSC} + \text{WBC} \quad (3)$$

Keterangan:

TEC = *total exchange capacity* (mEq/mL)

WBC = *weak base capacity* (mEq/mL)

SSC = *salt splitting capacity* (mEq/mL)

(Sumber: PT YTL Jawa Timur)

Diketahui:

$$\text{SSC} = 0,138 \text{ mEq/mL resin}$$

$$\text{WBC} = 0,975 \text{ mEq/mL resin}$$

Maka,

$$\begin{aligned} \text{TEC} &= 0,138 \text{ mEq/mL resin} + 0,975 \text{ mEq/mL resin} \\ &= 1,113 \text{ mEq/mL resin} \end{aligned}$$

$$\text{TEC resin kation} = \frac{V_t \times C_t}{V_r} \quad (4)$$

Keterangan:

V_t = volume titran (mL)

C_t = konsentrasi titran (mL)

V_r = volume resin (mL)

(Sumber: PT YTL Jawa Timur)

Diketahui:

$$V_t = 27,5 \text{ mL}$$

$$C_t = 0,52 \text{ N}$$

$$V_r = 10 \text{ mL}$$

Maka,

$$\begin{aligned} \text{TEC} &= \frac{27,5 \text{ mL} \times 0,52 \text{ N}}{10 \text{ mL}} \\ &= 1,43 \text{ mEq/mL resin} \end{aligned}$$

d) Percent of Original Capacity

Perhitungan beban *mixed bed* menggunakan persamaan :

$$\% \text{ original capacity} = \frac{\text{TEC}}{C_0} \times 100\% \quad (5)$$

Keterangan:

% *original capacity* = persentase kapasitas awal resin yang masih tersisa (%)

TEC = *total exchange capacity* (mEq/mL)

C₀ = kapasitas resin baru (mEq/mL)

(Sumber: PT YTL Jawa Timur)

Diketahui:

TEC = 1,43 mEq/mL resin

C₀ = 1,8 mEq/mL resin

Maka,

$$\begin{aligned} \text{Percent of original capacity} &= \frac{1,43 \text{ mEq/mL resin}}{1,8 \text{ mEq/mL resin}} \times 100\% \\ &= 79,4\% \end{aligned}$$

e) Perhitungan Beban Resin *Mixed Bed*

Perhitungan beban resin *mixed bed* menggunakan persamaan:

$$B = Q \times C \quad (6)$$

Keterangan:

B = beban *mixed bed* (mEq/jam)

Q = laju alir air yang diproses (ton/jam)

C = kapasitas pertukaran resin (mEq/ton)

(Sumber: PT YTL Jawa Timur)

Diketahui:

Q = 47,3 ton/jam

C = 90,44 mEq/ton

Maka,

$$\begin{aligned} \text{Beban} &= 47,3 \text{ ton/jam} \times 90,44 \text{ mEq/ton} \\ &= 4.277,8846 \frac{\text{mEq}}{\text{jam}} \end{aligned}$$

f) Perhitungan *Throughput Mixed Bed* Eksperimen

Perhitungan beban *mixed bed* menggunakan persamaan :

$$TP_{eks} = \frac{Q_r}{B} \times Q \quad (7)$$

Keterangan:

TP_{eks} = *throughput* eksperimen (ton)

Q_r = jumlah muatan ion yang dimiliki resin (mEq)

B = beban *mixed bed* (mEq/jam)

Q = laju alir (ton/jam)

(Sumber: PT YTL Jawa Timur)

Diketahui:

Jumlah muatan ion kation = 2.288.000 mEq

Beban kation *mixed bed* = 4.277,8846 mEq/jam

Laju alir = 47,3 ton/jam

Maka,

$$\begin{aligned}\text{Throughput eksperimen} &= \frac{2.288.000 \text{ mEq}}{4.277,8846 \text{ mEq/jam}} \times 47,3 \text{ ton/jam} \\ &= 25.298,11 \text{ ton}\end{aligned}$$

g) Perhitungan Efisiensi Kerja Aktual *Mixed Bed*

Perhitungan efisiensi kerja aktual *mixed bed* menggunakan persamaan :

$$\eta = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (8)$$

Keterangan:

η = efisiensi kerja *mixed bed* (%)
 C_{in} = konsentrasi ion pada *inlet* (ppb)
 C_{out} = konsentrasi ion pada *outlet* (ppb)

(Sumber: PT YTL Jawa Timur)

Diketahui:

$C_{in \text{ flouride}}$ = 112,639 ppb

$C_{out \text{ flouride}}$ = 94,482 ppb

Maka,

$$\begin{aligned}\eta &= \frac{112,639 \text{ ppb} - 94,486 \text{ ppb}}{112,639 \text{ ppb}} \times 100\% \\ &= 16\%\end{aligned}$$

h) Perhitungan *Throughput Mixed Bed* Aktual

Perhitungan *throughput* aktual *mixed bed* menggunakan persamaan :

$$TP_{aktual} = TP_{eks} \times \eta_{rata-rata} \quad (9)$$

Keterangan:

TP_{aktual} = *throughput* aktual (ton)
 TP_{eks} = *throughput* eksperimen (ton)
 $\eta_{rata-rata}$ = rata-rata efisiensi kerja *mixed bed* (%)

(Sumber: PT YTL Jawa Timur)

Diketahui:

TP_{eks} = 25.298,11 ton

$\eta_{rata-rata}$ = 77%

Maka,

$$\begin{aligned}TP_{aktual} &= 25.298,11 \text{ ton} \times 77\% \\ &= 19.477,63 \text{ ton}\end{aligned}$$

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

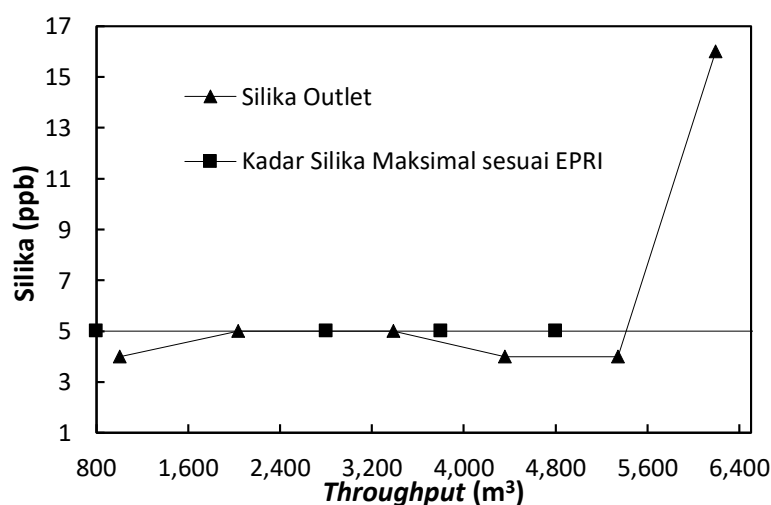
Permasalahan utama yang terjadi pada unit *mixed bed* 01 di PT YTL Jawa Timur adalah ketidaksesuaian antara kapasitas desain *throughput* dengan performa aktual di lapangan. Berdasarkan spesifikasi awal, sistem ini didesain mampu memproses air demineralisasi hingga 6.500 ton per siklus dengan parameter kualitas air memenuhi batas konduktivitas <0,1 $\mu\text{S/cm}$ dan kadar silika <5 ppb. Namun, hasil pengamatan menunjukkan bahwa ketika *throughput* mendekati 6.000 ton, kadar silika sudah melebihi ambang batas yang ditetapkan oleh *Electric*

Power Research Institute (EPRI), yaitu 5 ppb. Hal ini mengindikasikan bahwa resin telah mengalami penurunan daya tukar ion lebih cepat dari seharusnya, yang dikenal dengan fenomena *short run length*. Menurut Boyer, dkk (2021), fenomena ini dapat meningkatkan risiko *scaling* pada peralatan *boiler* jika tidak dikendalikan [1].

Tabel 1. Data operasional *mixed bed* mengenai konduktivitas dan kandungan silika pada masukan dan keluaran air *mixed bed* 01 PT YTL Jawa Timur

Tanggal	Throughput (m ³)	Konsentrasi Silika Inlet (ppb)	Konsentrasi Silika Outlet (ppb)	Konduktivitas (μS/cm)
12/12/2023	1.006	16	4	0,06
13/12/2023	2.037	13	5	0,06
14/12/2023	3.386	15	5	0,06
15/12/2023	4.356	13	4	0,08
16/12/2023	5.342	12	4	0,06
17/12/2023	6.193	16	16	0,13

Data historis yang dikumpulkan pada beberapa siklus regenerasi *mixed bed* menunjukkan tren menurunnya performa resin. Tabel 1 menunjukkan nilai *throughput* dan kadar silika yang diukur selama beberapa siklus penggunaan resin.



Gambar 2. Kadar silika pada *outlet mixed bed* sebagai fungsi *throughput* dengan referensi batas maksimum silika EPRI

Selama lima hari pertama (12–16 Desember 2023), kadar silika pada air hasil olahan *mixed bed* masih berada dalam batas standar EPRI, yaitu kurang dari 5 ppb. Kondisi ini menunjukkan bahwa resin masih mampu menahan silika dari air baku dengan cukup baik. Namun, pada hari keenam terjadi lonjakan kadar silika hingga mencapai 16 ppb, meskipun volume *throughput* masih berada di bawah kapasitas desain yaitu 6.500 m³. Kenaikan ini juga disertai dengan peningkatan konduktivitas dari 0,07 μS/cm menjadi 0,13 μS/cm. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa kapasitas resin dalam menukar ion telah menurun dan sistem mendekati titik jenuh.

Data tersebut menunjukkan bahwa kadar silika mulai melampaui batas 5 ppb saat *throughput* mencapai kisaran 6.000 ton. Hal ini mengindikasikan bahwa kapasitas pertukaran ion resin sudah mulai habis sebelum *throughput* menyentuh angka desain, dan kualitas air tidak lagi memenuhi standar untuk digunakan sebagai air umpan *boiler*.

Untuk mengevaluasi kinerja aktual *mixed bed*, langkah awal dilakukan dengan mengukur konsentrasi ion pada sisi masukan dan keluaran *mixed bed*, serta menghitung efisiensi kerja penurunan ion. Data ini menjadi dasar penting untuk mengetahui efektivitas resin dalam menurunkan ion-ion terlarut selama proses pertukaran ion. Hasil pengujian ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Kandungan ion dan efisiensi kerja aktual *mixed bed* 01 PT YTL Jawa Timur

Jenis Ion	Ion	Konsentrasi Ion pada Masukan <i>Mixed bed</i> (ppb)	Konsentrasi Ion pada Keluaran <i>Mixed bed</i> (ppb)	Efisiensi Kerja (%)
Anion	<i>Fluoride</i>	112,639	94,482	16
	<i>Cloride</i>	3.893,161	28,345	99
	<i>Sulphate</i>	2,211	1,904	14
	<i>Silica</i>	13	0	100
	<i>Sodium</i>	1950,516	91,023	95
Kation	<i>Ammonium</i>	75,894	16,335	78
	<i>Magnesium</i>	0,3852	0	100
	<i>Calcium</i>	0,834	0	100
	<i>Pottasium</i>	52,508	5,332	90
		Rata-rata		77

Hasil efisiensi kerja *mixed bed* menunjukkan bahwa ion dominan seperti *cloride* dan *sodium* berhasil diturunkan dengan sangat baik, masing-masing hingga 99% dan 95%, menandakan bahwa resin masih sangat efektif dalam menurunkan konsentrasi ion utama dari air laut. Demikian pula untuk ion *magnesium* dan *calcium* yang menunjukkan efisiensi 100%, menandakan resin kation masih optimal terhadap ion divalen. Namun demikian, efisiensi yang rendah tercatat pada *fluoride* dan *sulphate*, hanya 16% dan 14%.

Rata-rata efisiensi kerja sistem *mixed bed* saat ini adalah 77%. Data efisiensi ini akan menjadi dasar dalam perhitungan *throughput* aktual, karena kapasitas pertukaran ion pada kondisi lapangan tidak mencerminkan kondisi ideal 100%. Oleh karena itu, langkah selanjutnya adalah menghitung jumlah air aktual yang dapat diolah oleh resin, berdasarkan kapasitas pertukaran ion yang tersisa.

Untuk memperoleh informasi lebih lanjut mengenai penyebab rendahnya performa sistem, dilakukan analisis terhadap kondisi resin di dalam *mixed bed*. Proses analisis dimulai dari pengambilan sampel resin dari beberapa titik dalam tangki *mixed bed*, yang kemudian diuji melalui reaksi dengan larutan standar dan titrasi untuk mendapatkan TEC. Analisis resin anion menggunakan larutan standar NaCl 1 N, setelah dibersihkan terlebih dahulu dengan NaOH agar pH kembali optimal dan ion sisa terlepas dari gugus resin [17]. Nilai TEC resin anion diperoleh dari penjumlahan antara SSC dan WBC, dua parameter yang mencerminkan kemampuan resin dalam menukar ion anorganik dan asam lemah [18,19].

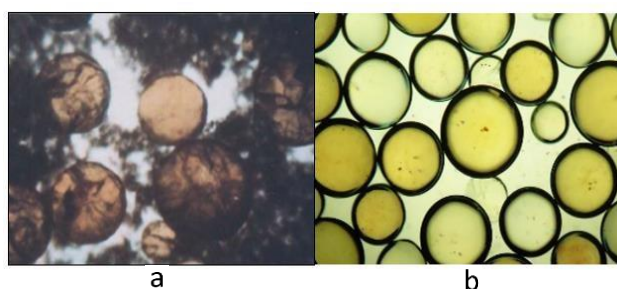
Resin kation dianalisis dengan cara yang serupa, menggunakan larutan standar NaCl 1 N setelah dibersihkan menggunakan HCl 1 N [20]. Berbeda dengan resin anion, resin kation tidak memiliki WBC karena bekerja dengan gugus fungsional asam kuat [3]. TEC resin kation hanya menggambarkan kapasitas pertukaran terhadap ion kation positif seperti Na^+ dan Ca^{2+} . Perhitungan TEC digunakan untuk menghitung persentase kapasitas awal (*percent of original capacity*), yang mencerminkan sisa kapasitas tukar ion dibandingkan dengan saat pertama kali digunakan.

Tabel 3. Data hasil analisis dan pengukuran resin *mixed bed* 01 PT YTL Jawa Timur

Resin	TEC	New Resin Capacity (mEq/mL resin)	Percent of original capacity (%)	Percent of degradation (%)	Beban Mixed Bed (mEq/jam)	Throughput Eksperimen (ton)
Anion	1,113	1,2	92,8	7,2	5.480,063	23.114,47
Kation	1,43	1,8	79,4	20,6	4.277,840	25.298,11

Berdasarkan hasil analisis laboratorium, resin anion dalam *mixed bed* dapat mengolah air sebesar 17.796,40 ton, sedangkan resin kation sebesar 19.477,63 ton seperti ditunjukkan oleh Tabel 3. Nilai ini jauh lebih besar dibandingkan kapasitas desain *mixed bed* sebesar 6.500 ton. Nilai persentase kapasitas awal menunjukkan bahwa resin anion mengalami degradasi sekitar 7%, sedangkan resin kation mengalami degradasi yang lebih signifikan, yakni sekitar 21%. Hasil ini sesuai dengan studi Dixit, dkk. (2021), yang menyebutkan bahwa umur panjang dan paparan kimia dapat menyebabkan kerusakan fisik pada struktur resin [5]. Pengamatan mikroskopik mendukung hasil tersebut, di mana resin kation tampak lebih banyak yang pecah dan retak dibandingkan resin anion, yang relatif masih utuh meskipun telah digunakan lebih dari sepuluh tahun.

Walaupun terjadi degradasi pada kedua jenis resin, hasil perhitungan menunjukkan bahwa kapasitas aktual resin masih mencukupi untuk menghasilkan *throughput* yang melebihi desain awal. Namun, degradasi resin tidak menjadi penyebab utama turunnya *throughput*. Gambar 3b menunjukkan bahwa resin dalam *mixed bed* tidak mengalami *fouling* yang ditandai oleh perubahan warna atau penumpukan lapisan asing seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3a. Hasil ini selaras dengan temuan Ma, dkk. (2023) dan Tian, dkk. (2016), yang menyatakan bahwa *fouling* pada resin dapat menurunkan efisiensi pertukaran ion secara drastis dan terlihat secara visual [2,21].



Gambar 3. a) Resin yang mengalami *fouling*; b) resin pada *mixed bed* 01 (Sumber: PT YTL Jawa Timur)

Berdasarkan perbandingan teori dan temuan aktual, ditemukan bahwa penurunan kinerja *mixed bed* lebih disebabkan oleh faktor operasional seperti kualitas bahan kimia regenerasi, distribusi aliran air yang tidak merata (*channeling*), dan waktu regenerasi yang tidak optimal. Hal ini diperkuat oleh Pidoux, dkk. (2022), yang menunjukkan pentingnya pengaturan beban resin dalam menjaga keseimbangan pertukaran ion, serta Shahab dan Setiorini (2023), yang menekankan pentingnya evaluasi volume resin dalam mempertahankan efisiensi kerja unit demin [3,6].

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis dan perhitungan yang telah dilakukan, diperoleh bahwa resin anion dalam *mixed bed* 01 PT YTL Jawa Timur memiliki kapasitas pengolahan air sebesar 17.796,40 ton, sementara resin kation sebesar 19.477,63 ton. Perhitungan persentase kapasitas awal menunjukkan bahwa resin kation mengalami degradasi hingga 21%, sedangkan resin anion mengalami degradasi sekitar 7%, sebagaimana juga didukung oleh hasil observasi mikroskopik. Meskipun demikian, nilai kapasitas aktual kedua resin masih lebih tinggi dibandingkan desain *throughput* awal sebesar 6.500 ton, sehingga degradasi resin tidak menjadi penyebab utama menurunnya kinerja *mixed bed*. Selain itu, hasil pengamatan visual menunjukkan bahwa resin tidak mengalami *fouling*, karena tidak ditemukan indikasi perubahan warna maupun penumpukan material asing pada permukaan resin. Dengan demikian, penyebab rendahnya *throughput* dan terjadinya *short run length* diperkirakan berasal dari faktor lain di luar degradasi dan *fouling* resin.

Sebagai tindak lanjut, disarankan agar evaluasi kinerja *mixed bed* dilanjutkan dengan pendekatan yang lebih menyeluruh, salah satunya dengan melakukan analisis menggunakan metode diagram *fishbone* yang mencakup aspek mekanik dan operasional, seperti distribusi aliran dalam kolom, sistem injeksi regenerasi, tekanan operasi, dan ketidaksesuaian prosedur regenerasi. Penelitian lanjutan juga perlu dilakukan untuk mengkaji dampak ketidakseimbangan beban alir dan kemungkinan terjadinya *channeling* yang tidak terdeteksi secara visual, agar dapat dilakukan perbaikan sistem dan optimalisasi kinerja *mixed bed* sesuai dengan kapasitas desain yang telah ditetapkan.

REFERENSI

- [1] T. H. Boyer, Y. Fang, A. Ellis, R. Dientz, Y. J. Choi, C. E. Schaefer, C. P. Higgins, dan T. J. Strathmann, "Anion exchange resin removal of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) from impacted water: A critical review," *Water Research*, vol. 200, hal. 117244, 2021.
- [2] Q. Ma, J. Mu, X. Lu, J. Meng, H. Cui, Y. Qiu, H. Ruan, dan J. Shen, "Sustainable Recovery of Ionic Resources from Resin Regeneration Wastewater: Long-Term Evaluation, Membrane Fouling Analysis, and Cleaning," *ACS Environmental Science & Technology Water*, vol. 3, no. 7, hal. 1855–1864, Jul 2023.
- [3] A. Shahab dan 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," *Journal of Innovation Research and Knowledge*, vol. 2, no. 3, hal. 310–324, 2023.
- [4] M. A. Ghony, R. M. D. Putra, dan M. K. Tama, "Pengelolaan Penyimpanan Bahan Kimia

- Berbahaya dan Beracun pada Water Treatment Plant PLTU 3x10 MW (PT. BEST),” *Jurnal Ilmu Teknologi dan Sains*, vol. 2, no. 1, hal. 33–38, 2024.
- [5] F. Dixit, R. Dutta, B. Barbeau, P. Berube, dan M. Mohseni, “PFAS removal by ion exchange resins: A review,” *Chemosphere*, vol. 272, hal. 129777, 2021.
 - [6] L. Pidoux, H. Shorney-Darby, E. Vaudevire, B. Martijn, P. Jarvis, dan I. Carra, “Impact of resin loading on ion exchange equilibrium for removal of organic matter and inorganic ions,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 431, no. 128530, hal. 1–33, 2022
 - [7] G. Tiago, M. B. Cristóvão, A. P. Marquez, R. Huertas, I. Merino-Garcia, V. J. Pereira, J. G. Crespo dan S. Velizarov “A Study on Biofouling and Cleaning of Anion Exchange Membranes for Reverse Electrodialysis,” *Membranes (Basel)*., vol. 12, no. 7, 2022.
 - [8] A. R. Wahyudin, A. Raihan, M. F. Adrian, R. Agustian, M. A. Darian, F. Paundra, dan Y. Ito “Analisis Dan Perawatan Pada Water Treatment Plant (WTP) Pltu X,” *Perwira Journal of Science & Engineering*, vol. 4, no. 2, hal. 86–93, 2024.
 - [9] F. Z. Murfid dan M. S. R. Pratama, “Pengaruh Iradiasi Gamma terhadap Efektivitas Penukar Ion Jenis Amberlite 410,” *Jurnal Ilmu Teknik*, vol. 1, no. 2, hal. 419–424, 2024.
 - [10] H. J. Park, Y. K. Park, dan J. S. Kim, “Influence of reaction conditions and the char separation system on the production of bio-oil from radiata pine sawdust by fast pyrolysis,” *Fuel Processing Technology*, vol. 89, no. 8, hal. 797–802, 2008.
 - [11] T. H. Bui, S. P. Hong, dan J. Yoon, “Development of nanoscale zirconium molybdate embedded anion exchange resin for selective removal of phosphate,” *Water Research*, vol. 134, hal. 22–31, 2018.
 - [12] J. T. M. Amphlett, S. Choi, S. A. Parry, E. M. Moon, C. A. Sharrad, dan M. D. Ogden, “Insights on uranium uptake mechanisms by ion exchange resins with chelating functionalities: Chelation vs. anion exchange,” *Chemical Engineering Journal*, vol. 392, hal. 123712, 2020.
 - [13] M. A. McKenzie, L. M. Simkins, S. M. Principato, dan S. Munevar Garcia, “Streamlined subglacial bedform sensitivity to bed characteristics across the deglaciated Northern Hemisphere,” *Earth Surface Processes and Landforms*, vol. 47, no. 9, hal. 2341–2356, 2022.
 - [14] L. Guo, J. Wan, J. Alemán, Y. Wang, dan Y. Zhou, “Gel-type resin loaded with nano-hydrated ferric oxide for the removal of anions from papermaking wastewater,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 12, no. 6, hal. 114567, 2024.
 - [15] E. Ramírez, M. Iborra, dan J. Tejero, “Catalysts: Advances in the Catalytic Behavior of Ion-Exchange Resins,” *Catalysts*, vol. 14, no. 10, 2024.
 - [16] K. Zimmermann, W. S.-W. Chen, J. Wright, dan M. Mohseni, “Design considerations for biological ion exchange drinking water filters: Resin selection, backwash, and regenerations,” *AWWA Water Science*, vol. 5, no. 5, hal. 1356, 2023.
 - [17] H. Zhang, A. Li, W. Zhang, dan C. Shuang, “Combination of Na-modified zeolite and anion exchange resin for advanced treatment of a high ammonia-nitrogen content municipal effluent,” *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 468, hal. 128–135, 2016.
 - [18] N. P. G. N. Chandrasekara dan R. M. Pashley, “Study of a new process for the efficient regeneration of ion exchange resins,” *Desalination*, vol. 357, hal. 131–139, 2015.
 - [19] J. Irving, “Overview: Ion Exchange,” *Encyclopedia of Separation Science*, hal. 4469–

- 4477, 2000.
- [20] H. Saroso, "Optimalisasi Pemakaian NaOH dan HCl untuk Regenerasi Resin Two Bed Water Treatment Plant," *Prosiding SENTIA 2016*, vol. 8, hal. 17–22, 2016.
- [21] Z. Tian, X. Li, Y. Ma, T. Chen, D. Xu, B. Wang, Y. Gao, dan Y. Qu., "Quantitatively Intrinsic Biomimetic Catalytic Activity of Nanocerias as Radical Scavengers and Their Ability against H₂O₂ and Doxorubicin-Induced Oxidative Stress," *ACS Applied Materials & Interfaces*, vol. 9, no. 28, hal. 23342–23352, 2017.