



Evaluasi Kinerja Ion Exchange dalam Menurunkan TDS dan Kesadahan Air pada Variasi Konsentrasi Regeneran

Evaluation of Ion Exchange Performance in Reducing TDS and Water Hardness at Various Regenerant Concentrations

Claudia Shinta Octa Wibowo^{1*}, Hendrini Pujiastuti¹, Nisa Aina Fauziah², Muhammad Ihsan²

¹Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, Cilegon, Banten, Indonesia

²Jurusan Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Universitas Al-Khairiyah, Cilegon, Banten, Indonesia

*Email: claudia.shinta@untirta.ac.id

Abstrak

Proses ion exchange merupakan metode pengolahan air yang digunakan untuk menurunkan ion terlarut dan ion penyebab kesadahan melalui pertukaran ion pada resin. Penelitian berbasis praktikum ini bertujuan mengevaluasi pengaruh konsentrasi regeneran terhadap penurunan *total dissolved solids* (TDS) dan kesadahan air menggunakan kolom resin penukar ion. Percobaan diawali dengan kalibrasi laju alir berdasarkan variasi bukaan valve. Percobaan utama dilakukan pada bukaan valve 50° dengan laju alir 25,00 mL/s selama 90 menit menggunakan variasi konsentrasi regeneran 2%, 4%, dan 6%. Hasil menunjukkan bahwa konsentrasi regeneran 2% memberikan kinerja paling stabil, dengan penurunan TDS dari 50,15 ppm menjadi 29,80 ppm dan kesadahan dari 8,21 ppm menjadi 3,20 ppm sebagai CaCO₃. Efisiensi penyisihan akhir masing-masing sebesar 40,58% dan 60,98%. Konsentrasi 4% menunjukkan ketidakstabilan dengan efisiensi akhir negatif, sedangkan konsentrasi 6% menghasilkan penurunan yang lebih rendah dibandingkan 2%. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi regeneran tidak selalu meningkatkan efektivitas ion exchange.

Kata kunci: *Ion Exchange*; TDS; Kesadahan; Regeneran

Abstract

Ion exchange is a water treatment method used to reduce dissolved ions and hardness-causing ions through ion exchange mechanisms on resin surfaces. This practice-based study aimed to evaluate the effect of regenerant concentration on the reduction of total dissolved solids (TDS) and water hardness using an ion exchange resin column. The experiment began with flow rate calibration based on valve opening variations. The main experiment was conducted at a valve opening of 50° with a flow rate of 25.00 mL/s for 90 minutes using regenerant concentrations of 2%, 4%, and 6%. The results showed that the 2% regenerant concentration provided the most stable performance, reducing TDS from 50.15 ppm to 29.80 ppm and hardness from 8.21 ppm to 3.20 ppm as CaCO₃. The final removal efficiencies were 40.58% and 60.98%, respectively. These findings indicate that increasing regenerant concentration does not always improve ion exchange effectiveness under the laboratory operating conditions.

Keywords: *Ion Exchange*; TDS; Hardness; Regenerant

Pendahuluan

Kualitas air merupakan parameter penting dalam proses industri karena kandungan mineral terlarut, terutama ion kalsium dan magnesium, dapat menyebabkan pembentukan kerak, menurunkan efisiensi perpindahan panas, serta mengganggu kinerja peralatan proses [1]. Salah satu metode yang banyak digunakan untuk menurunkan kandungan ion terlarut dan kesadahan air adalah proses *ion exchange*. Metode ini bekerja melalui pertukaran ion antara fase cair dan gugus aktif pada resin, sehingga ion-ion penyebab kesadahan maupun sebagian ion terlarut dapat disisihkan dari air [1]. Selain itu, resin

penukar ion dapat digunakan kembali melalui proses regenerasi, sehingga metode ini sesuai untuk aplikasi pengolahan air secara berulang, baik pada skala laboratorium maupun industri [2].

Keberhasilan proses *ion exchange* dipengaruhi oleh beberapa faktor operasi, antara lain laju alir, waktu kontak, kondisi resin, beban ion dalam air umpan, serta proses regenerasi [1]. Regenerasi bertujuan mengembalikan kemampuan resin setelah mengalami kejenuhan akibat pertukaran ion selama proses berlangsung. Namun, konsentrasi regeneran yang digunakan perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi kestabilan kinerja resin [2], [3]. Konsentrasi

regenerasi yang terlalu rendah dapat menyebabkan regenerasi kurang optimal, sedangkan konsentrasi yang lebih tinggi belum tentu menghasilkan penyisihan yang lebih baik apabila proses pembilasan resin tidak sempurna atau masih terdapat ion sisa regenerasi yang terbawa ke aliran keluaran. Kondisi tersebut dapat memengaruhi nilai *total dissolved solids* (TDS) dan kesadahan air hasil proses [2], [3].

Dalam konteks pembelajaran Operasi Teknik Kimia, praktikum *ion exchange* tidak hanya bertujuan mengukur parameter kualitas air, tetapi juga melatih mahasiswa untuk memahami hubungan antara variabel operasi dan kinerja proses. Melalui praktikum ini, mahasiswa dapat mengamati pengaruh laju alir, waktu kontak, kondisi resin, dan konsentrasi larutan regenerasi terhadap kemampuan resin dalam menurunkan TDS dan kesadahan air. Oleh karena itu, data praktikum dapat dikembangkan menjadi evaluasi eksperimental skala laboratorium untuk menilai kinerja proses *ion exchange* berdasarkan perubahan parameter kualitas air selama waktu operasi.

Artikel ini bertujuan mengevaluasi pengaruh variasi konsentrasi regenerasi 2%, 4%, dan 6% terhadap penurunan TDS dan kesadahan air pada praktikum *ion exchange*. Evaluasi dilakukan melalui perhitungan efisiensi penyisihan, analisis tren perubahan TDS dan kesadahan terhadap waktu operasi, serta identifikasi ketidakstabilan data yang dapat digunakan sebagai bahan pembelajaran dalam memahami kinerja resin penukar ion. Dengan demikian, artikel ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai efektivitas variasi konsentrasi regenerasi serta menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi regenerasi tidak selalu menghasilkan kinerja penyisihan yang lebih baik.

Teori

Kesadahan air terutama disebabkan oleh keberadaan ion kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}) yang terlarut dalam air. Ion-ion tersebut dapat menyebabkan pembentukan kerak pada permukaan peralatan proses, terutama pada sistem perpindahan panas, boiler, pipa, dan peralatan industri lainnya. Pembentukan kerak dapat menurunkan efisiensi perpindahan panas, meningkatkan hambatan aliran, serta mengganggu kinerja operasi. Oleh karena itu, penurunan kesadahan air menjadi salah satu tahap penting dalam proses pengolahan air, baik untuk kebutuhan industri maupun air bersih [1]. Selain kesadahan, kualitas air juga dapat dievaluasi melalui nilai *total dissolved solids* (TDS), yaitu

jumlah zat padat terlarut dalam air, baik berupa ion anorganik maupun senyawa terlarut lainnya. Nilai TDS yang tinggi menunjukkan semakin banyaknya komponen terlarut dalam air, sehingga dapat digunakan sebagai indikator awal untuk menilai kandungan ion dalam sampel air[5].

Proses *ion exchange* merupakan metode pengolahan air yang bekerja berdasarkan pertukaran ion antara ion dalam larutan dengan ion aktif yang terikat pada resin. Resin penukar ion umumnya tersusun dari matriks polimer yang memiliki gugus fungsional aktif. Gugus fungsional inilah yang menentukan kemampuan resin dalam menukar ion tertentu dari larutan. Berdasarkan jenis ion yang ditukar, resin penukar ion dibedakan menjadi resin kation dan resin anion. Resin kation berfungsi menukar ion positif seperti Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , dan ion logam lainnya, sedangkan resin anion berfungsi menukar ion negatif seperti Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} , dan ion anion lainnya [3]. Pada proses pelunakan air, resin kation berperan penting dalam menurunkan ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} sebagai penyebab utama kesadahan air [1], [4].

Mekanisme pertukaran ion terjadi ketika air umpan dialirkan melalui unggun resin. Ion-ion yang terdapat dalam air akan bergerak menuju permukaan resin, kemudian mengalami pertukaran dengan ion aktif yang berada pada gugus fungsional resin. Sebagai contoh, ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} dalam air dapat menggantikan ion aktif pada resin kation, sehingga konsentrasi ion penyebab kesadahan dalam air menurun. Pada sistem demineralisasi, penggunaan resin kation dan resin anion secara berurutan dapat membantu menurunkan kandungan ion positif maupun ion negatif dalam air, sehingga nilai TDS juga dapat mengalami penurunan. Efektivitas proses ini dipengaruhi oleh jumlah sisi aktif resin, afinitas ion terhadap resin, konsentrasi ion dalam air umpan, laju alir, waktu kontak, tinggi unggun resin, pH larutan, serta kondisi resin setelah proses regenerasi [1], [5].

Seiring bertambahnya waktu operasi, kemampuan resin dalam menukar ion akan menurun karena sebagian besar sisi aktif resin telah ditempati oleh ion dari air umpan. Kondisi ini disebut sebagai kejenuhan resin. Resin yang telah jenuh perlu diregenerasi agar kemampuan pertukaran ionnya dapat dikembalikan. Regenerasi dilakukan dengan mengalirkan larutan regenerasi tertentu sesuai jenis resin yang digunakan. Pada resin kation, larutan asam seperti HCl dapat digunakan untuk mengembalikan ion aktif pada resin, sedangkan pada resin anion,

larutan basa seperti NaOH dapat digunakan untuk mengembalikan gugus aktif resin anion. Penggunaan HCl dan NaOH sebagai regeneran telah dilaporkan dapat membantu mengembalikan kemampuan resin demineralisasi, dengan efektivitas yang dipengaruhi oleh konsentrasi regeneran dan waktu kontak regenerasi [2].

Konsentrasi regeneran merupakan salah satu faktor penting yang memengaruhi keberhasilan regenerasi resin. Konsentrasi regeneran yang terlalu rendah dapat menyebabkan proses regenerasi tidak berlangsung optimal karena jumlah ion regeneran tidak cukup untuk menggantikan ion yang telah terikat pada resin. Sebaliknya, konsentrasi regeneran yang lebih tinggi tidak selalu menghasilkan kinerja penyisihan yang lebih baik. Apabila proses pembilasan resin tidak sempurna, sisa ion dari larutan regeneran dapat tertinggal pada resin dan terbawa ke aliran keluaran. Kondisi ini dapat menyebabkan nilai TDS atau kesadahan effluent meningkat, sehingga efisiensi penyisihan menjadi rendah bahkan bernilai negatif [2], [3].

Efisiensi penyisihan TDS dan kesadahan dapat dihitung berdasarkan perbandingan antara konsentrasi awal dan konsentrasi pada waktu operasi tertentu. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi penyisihan}(\%) = \left(\frac{C_0 - C_t}{C_0} \right) \times 100\% \quad [6].$$

dengan C_0 merupakan konsentrasi awal dan C_t merupakan konsentrasi pada waktu operasi tertentu. Jika nilai C_t lebih kecil daripada C_0 , maka efisiensi bernilai positif dan menunjukkan adanya penurunan parameter. Sebaliknya, jika nilai C_t lebih besar daripada C_0 , maka efisiensi bernilai negatif dan menunjukkan bahwa konsentrasi parameter pada air keluaran lebih tinggi dibandingkan kondisi awal. Nilai efisiensi ini digunakan untuk mengevaluasi kinerja resin dalam menurunkan TDS dan kesadahan air pada setiap variasi konsentrasi regeneran.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan deskriptif-kuantitatif berbasis data praktikum *ion exchange*. Data yang dianalisis berasal dari hasil praktikum Kelompok 40 pada modul *ion exchange* Operasi Teknik Kimia. Penelitian dilakukan untuk mengevaluasi pengaruh variasi konsentrasi regeneran terhadap penurunan *total dissolved solids* (TDS) dan kesadahan air menggunakan rangkaian kolom resin penukar ion skala laboratorium.

Rangkaian alat yang digunakan terdiri atas kolom penukar kation dan kolom penukar anion. Resin yang digunakan mengacu pada modul praktikum, yaitu resin kation Lewatit S80 dan resin anion Monoplus M500. Resin kation diregenerasi menggunakan larutan HCl, sedangkan resin anion diregenerasi menggunakan larutan NaOH. Variasi konsentrasi regeneran yang digunakan adalah 2%, 4%, dan 6%. Setelah proses regenerasi, resin dibilas menggunakan air hingga pH mendekati netral untuk mengurangi kemungkinan terbawanya sisa regeneran ke dalam air hasil proses.

Sebelum percobaan utama dilakukan, kalibrasi laju alir dilakukan untuk mengetahui hubungan antara bukaan valve dan debit aliran air. Kalibrasi dilakukan dengan mengatur bukaan valve pada variasi 10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, dan 90°. Pada setiap variasi bukaan valve, air keluaran ditampung sebanyak 500 mL, kemudian waktu pengisian dicatat. Pengukuran dilakukan secara duplo, kemudian waktu rata-rata digunakan untuk menghitung laju alir dengan membagi volume air terhadap waktu pengisian.

Percobaan utama dilakukan pada bukaan valve 50° dengan laju alir sebesar 25,00 mL/s. Kondisi ini dipilih karena berada pada rentang tengah variasi bukaan valve, sehingga aliran tidak terlalu lambat maupun terlalu cepat. Air sampel dialirkan melalui rangkaian kolom penukar ion yang telah diregenerasi sesuai variasi konsentrasi regeneran. Sampel keluaran diambil pada waktu operasi 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, dan 90 menit. Setiap variasi konsentrasi regeneran dianalisis berdasarkan perubahan nilai TDS dan kesadahan selama waktu operasi.

Parameter yang dianalisis dalam penelitian ini adalah TDS dan kesadahan air. Nilai TDS diukur menggunakan TDS meter, sedangkan kesadahan dianalisis menggunakan metode titrasi EDTA dan dinyatakan sebagai mg/L CaCO_3 . Data hasil pengukuran kemudian digunakan untuk menghitung efisiensi penyisihan TDS dan kesadahan berdasarkan perbandingan antara konsentrasi awal dan konsentrasi pada waktu operasi tertentu.

Hasil dan Pembahasan

Kalibrasi Laju Alir

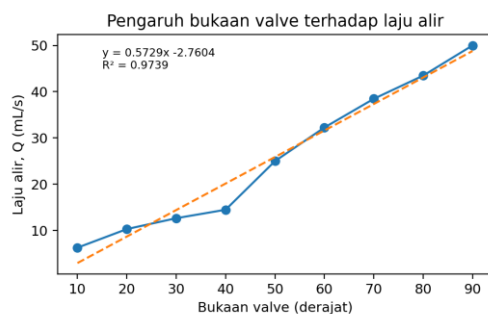
Laju alir merupakan salah satu parameter operasi penting pada proses *ion exchange* karena berhubungan langsung dengan waktu kontak antara air sampel dan resin penukar ion. Waktu kontak yang cukup memungkinkan ion-ion dalam air berdifusi menuju permukaan resin dan mengalami pertukaran dengan ion aktif pada

gugus fungsional resin. Sebaliknya, laju alir yang terlalu tinggi dapat menurunkan waktu kontak sehingga proses pertukaran ion tidak berlangsung optimal [1]. Oleh karena itu, sebelum percobaan utama dilakukan, kalibrasi laju alir diperlukan untuk mengetahui hubungan antara bukaan valve dan debit aliran air yang melewati kolom resin.

Kalibrasi dilakukan dengan mengatur bukaan valve pada beberapa variasi sudut, yaitu 10° hingga 90°. Pada setiap variasi bukaan valve, air keluaran ditampung sebanyak 500 mL dan waktu pengisian dicatat. Data waktu tersebut digunakan untuk menghitung laju alir berdasarkan perbandingan antara volume air yang tertampung dan waktu pengambilan sampel. Hasil kalibrasi ini digunakan sebagai dasar penentuan kondisi operasi pada percobaan utama *ion exchange*.

Tabel 1. Data kalibrasi bukaan valve terhadap laju alir

Bukaan valve (derajat)	t rata-rata (s)	Volume (mL)	Q (mL/s)
10	79,5	500	6,29
20	48,5	500	10,31
30	39,5	500	12,66
40	34,5	500	14,49
50	20,0	500	25,00
60	15,5	500	32,26
70	13,0	500	38,46
80	11,5	500	43,48
90	10,0	500	50,00



Gambar 1. Hubungan bukaan valve terhadap laju alir pada kalibrasi alat ion exchange

Berdasarkan Tabel 1 dan Gambar 1, peningkatan bukaan valve menunjukkan kecenderungan peningkatan laju alir air yang melewati kolom *ion exchange*. Pada bukaan valve 10°, waktu rata-rata yang dibutuhkan untuk menampung 500 mL air adalah 79,5 s, sehingga diperoleh laju alir sebesar 6,29 mL/s. Ketika bukaan valve dinaikkan hingga 90°, waktu pengambilan sampel menurun menjadi 10,0 s dan laju alir meningkat menjadi 50,00 mL/s. Kenaikan laju alir ini terjadi karena semakin besar bukaan valve, hambatan aliran yang diberikan oleh valve

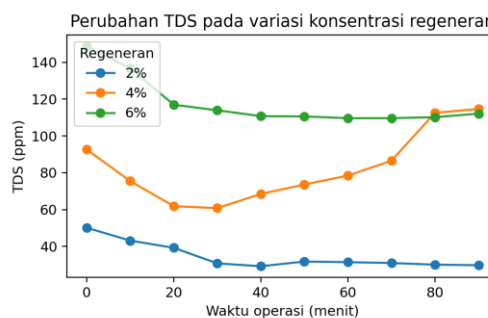
semakin kecil, sehingga air dapat mengalir lebih cepat melalui sistem.

Hubungan antara bukaan valve dan laju alir menunjukkan kecenderungan linier dengan nilai koefisien determinasi R^2 sebesar 0,9739. Nilai R^2 yang mendekati 1 menunjukkan bahwa bukaan valve memiliki hubungan yang kuat dengan perubahan laju alir. Dengan demikian, bukaan valve dapat digunakan sebagai pendekatan praktis untuk mengatur laju alir pada percobaan *ion exchange* skala laboratorium. Pada percobaan utama, digunakan bukaan valve 50° dengan laju alir 25,00 mL/s. Kondisi ini dipilih karena berada pada rentang tengah variasi bukaan valve, sehingga aliran tidak terlalu lambat maupun terlalu cepat. Laju alir yang terlalu tinggi dapat menurunkan waktu kontak antara air dan resin, sedangkan laju alir yang terlalu rendah dapat memperpanjang waktu operasi. Oleh karena itu, pemilihan bukaan valve 50° dinilai cukup representatif untuk mengevaluasi penurunan TDS dan kesadahan air pada variasi konsentrasi regeneran.

Total Dissolved Solids

Total dissolved solids (TDS) merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menggambarkan jumlah padatan atau ion terlarut dalam air. Pada proses *ion exchange*, penurunan TDS dapat terjadi karena sebagian ion terlarut dalam air ditukar dengan ion aktif yang terdapat pada gugus fungsional resin. Oleh karena itu, perubahan nilai TDS selama waktu operasi dapat digunakan sebagai indikator awal untuk mengevaluasi kinerja resin penukar ion dalam menurunkan kandungan ion terlarut. Efektivitas proses pertukaran ion dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain konsentrasi ion dalam air umpan, kondisi regenerasi resin, waktu kontak, serta kestabilan resin setelah proses pencucian atau pembilasan [1], [2].

Gambar 2. Perubahan TDS terhadap waktu operasi pada variasi konsentrasi regeneran

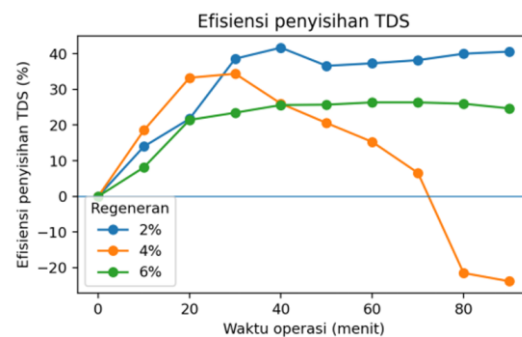


pada variasi konsentrasi regeneran

Berdasarkan Gambar 2, nilai TDS awal pada setiap variasi konsentrasi regeneran menunjukkan nilai yang berbeda. Pada konsentrasi regeneran 2%, TDS awal sebesar 50,15 ppm, sedangkan pada konsentrasi regeneran 4% dan 6% masing-masing sebesar 92,65 ppm dan 148,85 ppm. Perbedaan nilai awal ini menunjukkan bahwa kondisi awal sistem pada setiap variasi belum sepenuhnya seragam. Kondisi tersebut dapat dipengaruhi oleh karakteristik sampel awal, kondisi resin setelah regenerasi, atau kemungkinan masih adanya ion sisa regeneran yang belum seluruhnya hilang pada tahap pembilasan.

Pada konsentrasi regeneran 2%, nilai TDS mengalami penurunan relatif stabil dari 50,15 ppm menjadi 29,80 ppm pada menit ke-90. Pola ini menunjukkan bahwa resin masih mampu menurunkan kandungan ion terlarut secara konsisten selama waktu operasi. Kestabilan penurunan TDS pada variasi ini mengindikasikan bahwa kondisi resin setelah regenerasi cukup baik dan proses pertukaran ion berlangsung relatif efektif. Pada konsentrasi regeneran 4%, TDS turun dari 92,65 ppm menjadi 60,80 ppm pada menit ke-30, tetapi kemudian meningkat kembali hingga mencapai 114,70 ppm pada menit ke-90. Kenaikan TDS pada akhir operasi menunjukkan bahwa proses penyisihan ion tidak berlangsung stabil. Kondisi ini dapat disebabkan oleh pelepasan kembali ion dari resin, proses pembilasan resin yang belum sempurna setelah regenerasi, atau adanya ion sisa regeneran yang terbawa ke aliran keluaran [2]. Pada konsentrasi regeneran 6%, TDS turun dari 148,85 ppm menjadi nilai minimum 109,65 ppm pada menit ke-60 sampai 70, kemudian sedikit meningkat menjadi 112,15 ppm pada menit ke-90. Pola ini menunjukkan bahwa resin masih mampu menurunkan TDS, tetapi penurunannya tidak sebesar variasi 2%. Nilai TDS awal yang lebih tinggi pada variasi ini juga menunjukkan bahwa beban ion terlarut yang harus ditukar oleh resin lebih besar, sehingga kemampuan penyisihan menjadi lebih terbatas.

Selain melihat perubahan nilai TDS aktual, kinerja resin juga dapat dievaluasi melalui efisiensi penyisihan TDS. Efisiensi ini menunjukkan persentase penurunan TDS terhadap nilai awal masing-masing variasi konsentrasi regeneran, sehingga dapat digunakan untuk membandingkan kemampuan penyisihan antarperlakuan.



Gambar 3. Efisiensi penyisihan TDS terhadap waktu operasi

Berdasarkan Gambar 3, konsentrasi regeneran 2% menunjukkan peningkatan efisiensi penyisihan TDS yang relatif stabil dari awal operasi hingga mencapai 40,58% pada menit ke-90. Peningkatan ini menunjukkan bahwa resin masih bekerja cukup konsisten hingga akhir pengamatan. Dengan demikian, variasi regeneran 2% memberikan performa paling stabil dalam menurunkan TDS dibandingkan variasi lainnya.

Pada konsentrasi regeneran 4%, efisiensi penyisihan TDS meningkat pada awal operasi dan mencapai sekitar 34,38% pada menit ke-30. Namun, setelah itu efisiensi menurun tajam dan bernilai negatif pada menit ke-80 dan ke-90. Nilai negatif menunjukkan bahwa TDS keluaran lebih tinggi dibandingkan TDS awal. Kondisi ini memperkuat indikasi adanya ketidakstabilan proses, baik akibat pelepasan ion dari resin, pembilasan resin yang belum sempurna, maupun terbawanya sisa ion regeneran ke dalam air keluaran [2], [3].

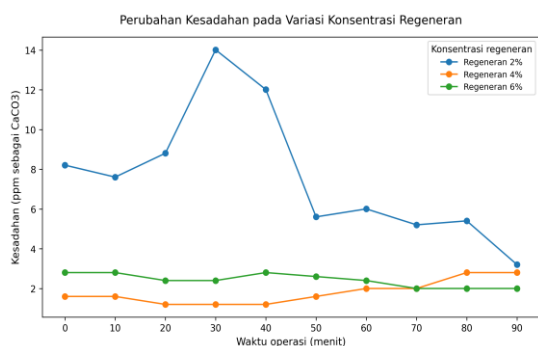
Pada konsentrasi regeneran 6%, efisiensi penyisihan TDS meningkat pada awal operasi dan kemudian cenderung stabil pada kisaran sekitar 23–26%. Meskipun konsentrasi regeneran 6% masih mampu menurunkan TDS, efisiensi penyisihannya tidak lebih besar dibandingkan konsentrasi regeneran 2%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi regeneran tidak selalu menghasilkan efisiensi penyisihan TDS yang lebih tinggi.

Secara keseluruhan, kombinasi Gambar 2 dan Gambar 3 menunjukkan bahwa konsentrasi regeneran 2% memberikan kinerja paling stabil dalam penurunan TDS. Konsentrasi regeneran 4% menunjukkan penurunan TDS yang baik pada awal operasi, tetapi tidak stabil pada akhir percobaan. Sementara itu, konsentrasi regeneran 6% menunjukkan penurunan TDS yang moderat dan cenderung stabil, tetapi efisiensinya lebih rendah dibandingkan konsentrasi regeneran 2%. Dengan demikian, efektivitas proses *ion exchange* tidak hanya ditentukan oleh konsentrasi

regeneran, tetapi juga oleh kestabilan resin, kecukupan proses pembilasan setelah regenerasi, waktu kontak, dan beban ion terlarut dalam air.

Kesadahan

Selain TDS, parameter lain yang dianalisis dalam praktikum *ion exchange* adalah kesadahan air. Analisis kesadahan penting dilakukan karena proses *ion exchange* banyak digunakan untuk menurunkan ion-ion penyebab kesadahan, terutama ion kalsium (Ca^{2+}) dan magnesium (Mg^{2+}). Pada proses pelunakan air, ion Ca^{2+} dan Mg^{2+} dapat ditukar dengan ion aktif yang terdapat pada resin kation, sehingga nilai kesadahan air diharapkan mengalami penurunan setelah melewati kolom resin [1]. Dengan demikian, evaluasi kinerja resin tidak hanya dilihat dari penurunan TDS, tetapi juga dari kemampuan resin dalam menurunkan kesadahan air selama waktu operasi.



Gambar 4. Perubahan kesadahan terhadap waktu operasi pada variasi konsentrasi regeneran

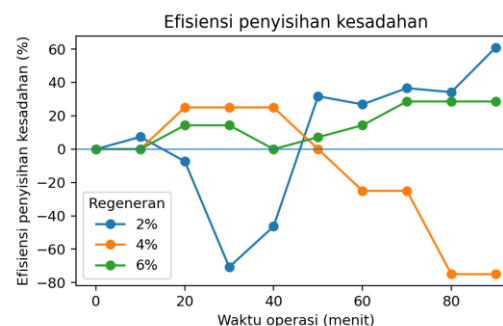
Berdasarkan Gambar 4, perubahan kesadahan menunjukkan pola yang berbeda pada setiap variasi konsentrasi regeneran. Pada konsentrasi regeneran 2%, kesadahan awal sebesar 8,21 ppm sebagai CaCO_3 . Nilai kesadahan sempat meningkat hingga mencapai 14,01 ppm pada menit ke-30, kemudian menurun secara bertahap hingga 3,20 ppm pada menit ke-90. Peningkatan kesadahan pada awal operasi menunjukkan bahwa proses pertukaran ion belum berlangsung stabil. Kondisi ini dapat disebabkan oleh ketidakseragaman sampel, sisa ion yang masih terbawa dari resin setelah regenerasi, atau proses pembilasan resin yang belum sempurna [2], [3]. Namun, penurunan kesadahan setelah menit ke-30 menunjukkan bahwa resin mulai bekerja lebih efektif dalam menurunkan ion penyebab kesadahan.

Pada konsentrasi regeneran 4%, nilai kesadahan awal relatif rendah, yaitu 1,60 ppm sebagai CaCO_3 . Selama waktu operasi, kesadahan cenderung berada pada rentang rendah, tetapi pada

menit akhir meningkat menjadi 2,80 ppm. Peningkatan ini menyebabkan kesadahan akhir lebih tinggi dibandingkan kesadahan awal. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa pada konsentrasi regeneran 4%, resin tidak memberikan penurunan kesadahan pada akhir operasi. Kenaikan kesadahan dapat mengindikasikan adanya pelepasan ion dari resin atau masih adanya ion sisa regeneran yang terbawa ke air hasil.

Pada konsentrasi regeneran 6%, nilai kesadahan awal sebesar 2,80 ppm sebagai CaCO_3 dan mengalami penurunan menjadi 2,00 ppm pada menit ke-90. Pola penurunan pada variasi ini tidak terlalu tajam, tetapi relatif lebih stabil dibandingkan konsentrasi regeneran 4%. Hal ini menunjukkan bahwa resin masih mampu menurunkan kesadahan, meskipun kemampuan penyisihannya tidak sebesar konsentrasi regeneran 2%.

Selain melihat perubahan nilai kesadahan aktual, kinerja resin juga dapat dianalisis melalui efisiensi penyisihan kesadahan. Efisiensi ini menunjukkan persentase penurunan kesadahan terhadap nilai awal pada masing-masing variasi konsentrasi regeneran. Dengan demikian, grafik efisiensi dapat memperjelas apakah penurunan kesadahan berlangsung stabil atau justru mengalami kenaikan kembali selama waktu operasi.



Gambar 5. Efisiensi penyisihan kesadahan terhadap waktu operasi

Berdasarkan Gambar 5, konsentrasi regeneran 2% menghasilkan efisiensi penyisihan kesadahan akhir paling tinggi, yaitu sebesar 60,98% pada menit ke-90. Meskipun pada awal operasi sempat terjadi penurunan efisiensi akibat meningkatnya nilai kesadahan, efisiensi kemudian meningkat setelah menit ke-30. Pola ini menunjukkan bahwa resin mulai bekerja lebih stabil setelah tahap awal operasi dan mampu menurunkan ion penyebab kesadahan hingga akhir pengamatan.

Pada konsentrasi regeneran 4%, efisiensi penyisihan kesadahan meningkat hingga sekitar 25% pada menit ke-20 sampai ke-40. Akan tetapi, setelah itu efisiensi menurun dan menjadi negatif pada menit ke-60 sampai ke-90. Efisiensi akhir sebesar -75,00% menunjukkan bahwa kesadahan akhir lebih tinggi dibandingkan kesadahan awal. Hal ini menunjukkan bahwa perlakuan regeneran 4% tidak memberikan kinerja penyisihan kesadahan yang baik pada akhir operasi. Kenaikan kesadahan dapat mengindikasikan adanya pelepasan ion dari resin atau terbawanya ion sisa regeneran ke dalam air keluaran [2].

Pada konsentrasi regeneran 6%, efisiensi penyisihan kesadahan cenderung lebih stabil dibandingkan konsentrasi regeneran 4%. Efisiensi meningkat secara bertahap dan mencapai 28,57% pada akhir operasi. Meskipun efisiensi ini tidak setinggi konsentrasi regeneran 2%, pola yang terbentuk menunjukkan bahwa resin masih mampu menurunkan kesadahan secara relatif konsisten. Namun, nilai efisiensi yang lebih rendah dibandingkan konsentrasi regeneran 2% menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi regeneran tidak selalu meningkatkan kemampuan resin dalam menyisihkan kesadahan.

Secara keseluruhan, Gambar 4 dan Gambar 5 menunjukkan bahwa konsentrasi regeneran 2% memberikan kinerja terbaik dalam menurunkan kesadahan air, meskipun sempat mengalami

ketidakstabilan pada awal operasi. Konsentrasi regeneran 4% menunjukkan performa paling rendah karena efisiensi akhirnya bernilai negatif. Sementara itu, konsentrasi regeneran 6% memberikan efisiensi yang lebih stabil dibandingkan 4%, tetapi masih lebih rendah dibandingkan 2%. Hasil ini menunjukkan bahwa kemampuan resin dalam menurunkan kesadahan tidak hanya dipengaruhi oleh konsentrasi regeneran, tetapi juga oleh kestabilan resin setelah regenerasi, kecukupan proses pembilasan, dan kondisi air sampel selama percobaan.

Setelah perubahan TDS, efisiensi penyisihan TDS, perubahan kesadahan, dan efisiensi penyisihan kesadahan dianalisis, perbandingan performa akhir setiap variasi konsentrasi regeneran dirangkum pada Tabel 2. Tabel ini digunakan untuk memperjelas kondisi awal dan akhir dari masing-masing parameter, sehingga dapat ditentukan variasi konsentrasi regeneran yang memberikan kinerja paling baik pada praktikum *ion exchange*. Efisiensi penyisihan dihitung berdasarkan perbandingan antara penurunan nilai parameter terhadap nilai awalnya. Nilai efisiensi positif menunjukkan adanya penurunan TDS atau kesadahan, sedangkan nilai efisiensi negatif menunjukkan bahwa nilai parameter akhir lebih tinggi dibandingkan kondisi awal.

Tabel 2. Ringkasan performa penyisihan TDS dan kesadahan

Konsentrasi	TDS awal (ppm)	TDS akhir (ppm)	Ef. TDS akhir	Kesadahan awal (ppm sbg CaCO_3)	Kesadahan akhir (ppm sbg CaCO_3)	Ef. kesadahan akhir
2%	50,15	29,80	40,58%	8,21	3,20	60,98%
4%	92,65	114,70	-23,80%	1,60	2,80	-75,00%
6%	148,85	112,15	24,66%	2,80	2,00	28,57%

Berdasarkan Tabel 2, konsentrasi regeneran 2% menunjukkan performa akhir terbaik dibandingkan variasi lainnya. Pada kondisi ini, TDS menurun dari 50,15 ppm menjadi 29,80 ppm dengan efisiensi penyisihan sebesar 40,58%. Kesadahan juga menurun dari 8,21 ppm menjadi 3,20 ppm sebagai CaCO_3 dengan efisiensi penyisihan sebesar 60,98%. Hasil ini menunjukkan bahwa pada konsentrasi regeneran 2%, resin mampu bekerja lebih stabil dalam menurunkan ion terlarut maupun ion penyebab kesadahan selama waktu operasi.

Pada konsentrasi regeneran 4%, TDS akhir meningkat dari 92,65 ppm menjadi 114,70 ppm, sehingga efisiensi penyisihan TDS bernilai negatif sebesar -23,80%. Kesadahan juga meningkat dari

1,60 ppm menjadi 2,80 ppm sebagai CaCO_3 dengan efisiensi akhir sebesar -75,00%. Nilai negatif pada kedua parameter tersebut menunjukkan bahwa proses *ion exchange* tidak memberikan penurunan pada akhir operasi. Kondisi ini memperkuat dugaan adanya ketidakstabilan proses, seperti pelepasan ion dari resin, pembilasan resin yang belum sempurna setelah regenerasi, atau terbawanya ion sisa regeneran ke dalam air keluaran [2], [3].

Pada konsentrasi regeneran 6%, TDS mengalami penurunan dari 148,85 ppm menjadi 112,15 ppm dengan efisiensi akhir sebesar 24,66%. Kesadahan juga menurun dari 2,80 ppm menjadi 2,00 ppm sebagai CaCO_3 dengan efisiensi sebesar 28,57%. Meskipun terjadi penurunan pada

kedua parameter, efisiensi yang diperoleh masih lebih rendah dibandingkan konsentrasi regeneran 2%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan konsentrasi regeneran tidak selalu menghasilkan penyisihan yang lebih efektif. Beban ion terlarut yang lebih besar serta kemungkinan ketidakseimbangan kondisi resin setelah regenerasi dapat membatasi kemampuan resin dalam melakukan pertukaran ion secara optimal.

Secara keseluruhan, Tabel 2 memperkuat hasil pada grafik sebelumnya bahwa konsentrasi regeneran 2% memberikan kinerja paling baik dan

Kesimpulan

Berdasarkan hasil praktikum *ion exchange*, kalibrasi laju alir menunjukkan bahwa peningkatan bukaan valve menyebabkan peningkatan laju alir air yang melewati kolom resin. Hubungan antara bukaan valve dan laju alir menunjukkan kecenderungan linier dengan nilai R^2 sebesar 0,9739. Percobaan utama dilakukan pada bukaan valve 50° dengan laju alir 25,00 mL/s karena kondisi tersebut berada pada rentang tengah variasi laju alir dan dinilai cukup representatif untuk proses pertukaran ion.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa konsentrasi regeneran 2% memberikan kinerja paling baik dan stabil dalam menurunkan TDS serta kesadahan air. Pada kondisi ini, TDS menurun dari 50,15 ppm menjadi 29,80 ppm dengan efisiensi akhir sebesar 40,58%, sedangkan kesadahan menurun dari 8,21 ppm menjadi 3,20 ppm sebagai CaCO_3 dengan efisiensi akhir sebesar 60,98%. Konsentrasi regeneran 4% menunjukkan performa terendah karena nilai TDS dan kesadahan akhir lebih tinggi dibandingkan kondisi awal, sehingga efisiensi akhirnya bernilai negatif. Sementara itu, konsentrasi regeneran 6% masih mampu menurunkan TDS dan kesadahan, tetapi efisiensinya lebih rendah dibandingkan konsentrasi 2%.

Secara keseluruhan, peningkatan konsentrasi regeneran tidak selalu menghasilkan efisiensi penyisihan yang lebih tinggi. Kinerja proses *ion exchange* dipengaruhi oleh kondisi resin setelah regenerasi, kecukupan proses pembilasan, waktu kontak antara air dan resin, serta beban ion terlarut dalam air sampel. Oleh karena itu, pada praktikum ini konsentrasi regeneran 2% dapat dianggap sebagai kondisi paling efektif dibandingkan variasi 4% dan 6%.

Ucapan Terima Kasih

stabil dalam menurunkan TDS serta kesadahan air. Konsentrasi regeneran 4% menunjukkan performa paling rendah karena nilai TDS dan kesadahan akhir justru lebih tinggi daripada kondisi awal. Sementara itu, konsentrasi regeneran 6% masih mampu menurunkan TDS dan kesadahan, tetapi efisiensinya tidak sebesar konsentrasi regeneran 2%. Dengan demikian, efektivitas praktikum *ion exchange* tidak hanya ditentukan oleh konsentrasi regeneran, tetapi juga oleh kondisi resin, kecukupan proses pembilasan, waktu kontak, dan beban ion dalam air sampel.

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Laboratorium Operasi Teknik Kimia, Jurusan Teknik Kimia, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa, atas fasilitas dan dukungan yang diberikan selama pelaksanaan praktikum *ion exchange*. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pengampu, asisten laboratorium, serta seluruh pihak yang telah membantu dalam proses pengambilan data, analisis hasil, dan penyusunan artikel ini.

Daftar Pustaka

- [1] S. Sadeghi, M. Abbasi, S. Osfour, M. J. Dianat, and J. Khodaveisi, "Application of ion exchange resins to reduce hardness and scaling of drinking water: Experimental and modeling," *Membrane and Water Treatment*, vol. 12, no. 6, pp. 271–284, 2021, doi: 10.12989/mwt.2021.12.6.271.
- [2] I. Ramadhan, L. Kurniasari, and I. Hartati, "Optimization of the utilization of NaOH & HCl for aqua-demineralization resin regeneration," *Journal of Chemical Process and Material Technology*, vol. 4, no. 1, 2025, doi: 10.36499/jcpmt.v4i1.14535.
- [3] S.-Y. Yeoh, K.-W. Lai, S.-Y. Pung, K.-Y. A. Lin, A. Matsumoto, and F.-Y. Yeoh, "Optimising brine regeneration of ion-exchange resins: Effects of pre-treatment temperature, brine concentration, and ratio," *Clean Technologies and Environmental Policy*, vol. 28, Article 62, 2026, doi: 10.1007/s10098-025-03367-7.
- [4] A. Campanile, B. Liguori, C. Ferone, D. Caputo, and P. Aprea, "Zeolite-based monoliths for water softening by ion exchange/precipitation process," *Scientific Reports*, vol. 12, Article 3686, 2022, doi: 10.1038/s41598-022-07679-2.

- [5] M. F. Irfan, Z. Hossain, M. Ans, B. S. Al-Anzil, and A. Ullah, "Implementation of statistical response surface methodology with desirability function for ion-exchange-based selective demineralization of municipal wastewater and tap water for drinking purposes," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 22, pp. 7753–7768, 2025, doi: 10.1007/s13762-024-06087-5.
- [6] M. von Sperling, C. A. de Lemos Chernicharo, and F. L. de Oliveira, *Assessment of Treatment Plant Performance and Water Quality Data: A Guide for Students, Researchers and Practitioners*. London: IWA Publishing, 2020.