

## STUDI PENGARUH DOSIS *FERRIC CHLORIDE* TERHADAP KENAIKAN *DIFFERENT PRESSURE* PADA *SEA WATER REVERSE* *OSMOSIS (SWRO) UNIT 7,8 PT POMI*

Firmandhana Krishna Panduwinata<sup>1</sup>, Yanty Maryanty<sup>1</sup>, Erwan Yulianto<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>PT. POMI Paiton, Jl. Raya Surabaya-Situbondo KM 141, Bhinor, Probolinggo, 67291, Indonesia  
firemoonadhanak@gmail.com ; [yantymaryanty@polinema.ac.id]

### ABSTRAK

Metode reverse osmosis (RO) pada sistem sea water reverse osmosis (SWRO) digunakan untuk mengolah air laut menjadi portable water maupun air umpan *boiler*. Permasalahan utama pada membran SWRO adalah terjadinya *fouling* dan *scaling* akibat tingginya kandungan Total Dissolved Solid (TDS), yang dapat menyumbat pori-pori membran serta memengaruhi laju alir (flowrate) dan differential pressure (DP). DP merupakan parameter kritis karena peningkatannya dapat menurunkan efisiensi sistem, meningkatkan biaya operasional, dan memperpendek umur membran. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh DP terhadap kinerja SWRO serta mengoptimalkan dosis koagulan untuk meminimalkan permasalahan tersebut. Koagulan yang digunakan adalah ferric chloride karena efektif menurunkan partikel tersuspensi dan bahan organik sebelum air memasuki membran serta memiliki biaya yang relatif ekonomis. Penelitian dilakukan melalui uji coba dosis injeksi ferric chloride sebesar 10 ppm dan 5 ppm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan dosis dari 10 ppm menjadi 5 ppm mampu menurunkan nilai DP rata-rata dari 6% menjadi 3%. Hasil ini menunjukkan bahwa optimasi dosis koagulan berperan penting dalam menjaga efisiensi sistem dan memperpanjang umur membran. Dengan demikian, pemilihan dan penyesuaian dosis ferric chloride yang tepat menjadi faktor kunci dalam meningkatkan kinerja dan keberlanjutan operasi SWRO.

**Kata kunci:** air laut, *different pressure*, *ferric chloride*, SWRO

### ABSTRACT

The reverse osmosis (RO) method in a sea water reverse osmosis (SWRO) system is used to treat seawater into potable water as well as boiler feed water. One of the main challenges in SWRO membranes is fouling and scaling caused by the high concentration of Total Dissolved Solids (TDS) in seawater. These deposits can clog membrane pores and affect the Flow Rate and differential pressure (DP). DP is a critical operational parameter because its increase can reduce system efficiency, raise operational costs, and shorten membrane lifespan. This study aims to analyze the effect of DP on SWRO performance and to optimize coagulant dosage in order to minimize these issues. The coagulant used in this research is ferric chloride, selected for its effectiveness in reducing suspended particles and organic matter before the water reaches the membrane, as well as its relatively economical cost. The study was conducted through a dosage injection trial using ferric chloride concentrations of 10 ppm and 5 ppm. The results show that reducing the dosage from 10 ppm to 5 ppm decreased the average DP from 6% to 3%. These findings indicate that optimizing coagulant dosage plays a significant role in maintaining system efficiency and extending membrane lifespan. Therefore, proper selection and adjustment of ferric chloride dosage are essential to improve SWRO performance and operational sustainability.

**Keywords:** seawater, *different pressure*, *ferric chloride*, SWRO

## 1. PENDAHULUAN

PT. Paiton Operation and Maintenance Indonesia (PT. POMI) merupakan salah satu industri dibidang pembangkit listrik yang mensuplai listrik untuk wilayah Jawa dan Bali. Dalam memproduksi listrik, PT. POMI unit 3, 7, dan 8 masing-masing mempunyai turbo generator berbahan bakar batubara sebagai penghasil uap panas dengan kapasitas 1 x 815 NMW [1]. Proses pembentukan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) untuk menghasilkan uap panas memerlukan air yang dipanaskan sampai menjadi uap (*superheater*) selanjutnya tenaga uap tersebut digunakan sebagai penggerak turbin sehingga menimbulkan energi mekanik. Turbin yang telah terhubung dengan generator akan mengubah tenaga uap tersebut menjadi tenaga listrik. Berdasarkan proses kerja PLTU, Air memiliki peranan penting. Uap yang dihasilkan dalam proses kerja PLTU berasal dari pemanasan air murni dengan nilai *conductivity*  $<0,2 \mu\text{s/cm}$ . sedangkan sumber air yang digunakan untuk menghasilkan uap dari industri PT. POMI menggunakan air laut yang mempunyai nilai *conductivity*  $>400 \mu\text{s/cm}$ . Karena air laut memiliki nilai *conductivity* yang tinggi, air laut akan di proses terlebih dahulu dengan berbagai macam metode, diantaranya metode *multiflash stage* (MSF), *multi-effect distillation* (MED), *electrodialysis* (ED), dan *reverse osmosis* (RO).

Metode RO di PT. POMI disebut sebagai *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) dimana memiliki sistem untuk menjadikan air laut menjadi *portable water* maupun air yang diproses lagi sebagai air umpan *boiler*. Banyak peneliti yang melakukan penelitian terkait SWRO karena biaya dan konsumsinya yang rendah dibandingkan dengan metode desalinasi termal. Namun metode SWRO dengan bahan membran, akan berdampak *fouling* karena *Total Suspended Solid* (TSS) dan *scaling* karena *Total Dissolve Solid* (TDS) pada membran sehingga dapat menyumbat pori-pori membran yang mempengaruhi laju alir dan perbedaan tekanan (*different pressure*) jika kualitas air laut tidak diolah terlebih dulu. Sistem pra-pengolahan air laut dapat menggunakan cara koagulasi, flokulasi, dan sedimentasi (*CFS method*) diikuti oleh filtrasi media granular yang biasanya digunakan di unit hulu SWRO [2].

*Ferric Chloride* merupakan salah satu koagulan yang ditambahkan sebelum memasuki tangki *Dissolved Air Flotation Filtered* (DAFF) yang berfungsi sebagai proses pemisahan flok dengan sistem flokulasi dan penyaringan air. Penambahan koagulan *ferric chloride* dengan dosis  $> 1 \text{ mg Fe/L}$  dapat mengurangi terjadinya *fouling* pada membran [3]. Selain itu, loganathan, dkk (2018) juga menjelaskan bahwa penambahan koagulan *ferric chloride* ( $\text{FeCl}_3$ ) dicampur dengan *chitosan* menggunakan dosis  $5 \text{ mg Fe/L}$  dapat menghilangkan mikroalga dengan tingkat efektivitas 94,7% sehingga dapat meningkatkan kualitas SWRO [4]. Koagulan *ferric chloride* dengan kadar  $0,75 \text{ mg/L}$  dan  $7,5 \text{ mg/L}$  juga turut diteliti oleh Alshajami, dkk (2022) menghasilkan penurunan kadar *turbidity* dalam air dengan metode CFS sebesar  $> 99\%$  [5].

Berdasarkan latar belakang di atas maka pada penelitian ini dilakukan studi kualitas untuk menentukan dosis *ferric chloride* antara  $5 \text{ mg/L}$  atau  $10 \text{ mg/L}$  dari pengamatan *Different Pressure* pada SWRO treatment unit 7,8 PT. POMI.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN

Teknik pengumpulan data pada penelitian ini dilakukan secara kuantitatif dengan menggunakan data-data primer PT Paiton Operation and Maintenance Indonesia (PT POMI)

unit 7 dan 8. Dosis koagulan *ferric chloride* menggunakan trial sesuai dengan teori yang ada pada buku panduan penggunaan dosis injeksi SWRO.

Teknik pengumpulan data pada penelitian ini yaitu dilakukan selama 4 bulan (bulan 1/2014 - 4/2014) dengan mengamati pengaruh laju alir dan perbedaan tekanan pada membran SWRO. Variabel pada penelitian menggunakan dosis koagulan *ferric chloride* 5 ppm dan 10 ppm.

**Tabel 1.** Data Pengamatan *Flow Rate* dan *Different Pressure* dengan penambahan *Ferric Chloride* 10 ppm di Bulan Januari 2014

Data ke-	PARAMETER			
	SWRO A		SWRO B	
	<i>Flow Rate</i> (m <sup>3</sup> /jam)	<i>Different Pressure</i> (kPa)	<i>Flow Rate</i> (m <sup>3</sup> /jam)	<i>Different Pressure</i> (kPa)
1	107	197	106	194
2	108	198	105	195
3	109	203	105	195
4	109	198	106	198
5	107	201	106	200
6	110	197	106	202
7	108	202	107	204
8	107	208	106	202
Total	108,13	200,5	105,87	198,75

**Tabel 2.** Data Pengamatan *Flow Rate* dan *Different Pressure* dengan penambahan *Ferric Chloride* 10 ppm di Bulan Februari 2014

Data ke-	PARAMETER			
	SWRO A		SWRO B	
	<i>Flow Rate</i> (m <sup>3</sup> /jam)	<i>Different Pressure</i> (kPa)	<i>Flow Rate</i> (m <sup>3</sup> /jam)	<i>Different Pressure</i> (kPa)
1	291	218	288	205
2	289	218	288	206
3	290	218	288	208
4	288	219	289	207
5	290	218	288	206
6	291	219	288	209
7	288	220	288	209
8	108	224	288	211
Total	266,87	219,25	288,13	207,63

**Tabel 3.** Data Pengamatan *Flow Rate* dan *Different Pressure* dengan penambahan *Ferric Chloride* 5 ppm di Bulan Maret 2014

Data ke-	PARAMETER			
	SWRO A		SWRO B	
	<i>Flow Rate</i> (m <sup>3</sup> /jam)	<i>Different Pressure</i> (kPa)	<i>Flow Rate</i> (m <sup>3</sup> /jam)	<i>Different Pressure</i> (kPa)
1	105	155	102	216
2	106	156	100	218
3	107	154	101	216
4	106	157	101	218

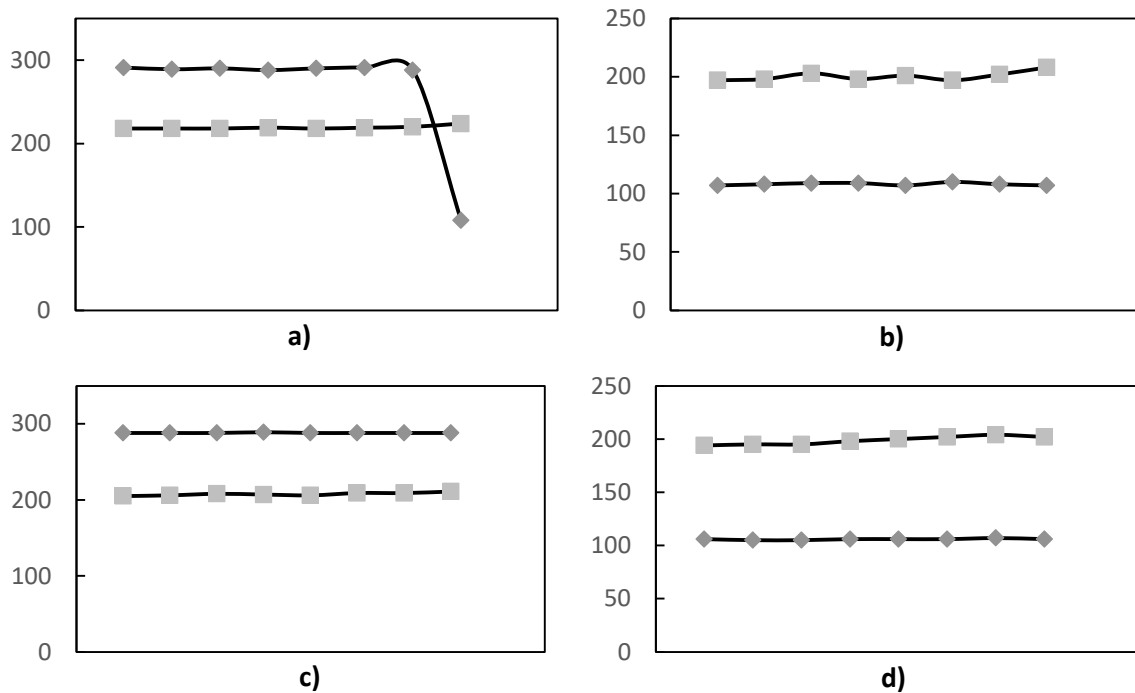
Data ke-	PARAMETER			
	SWRO A		SWRO B	
	<i>Flow Rate</i> (m <sup>3</sup> /jam)	<i>Different Pressure</i> (kPa)	<i>Flow Rate</i> (m <sup>3</sup> /jam)	<i>Different Pressure</i> (kPa)
5	105	155	102	217
6	106	156	100	216
7	107	157	101	218
8	105	154	102	217
Total	105,87	155,5	101,13	217

**Tabel 4.** Data Pengamatan *Flow Rate* dan *Different Pressure* dengan penambahan *Ferric Chloride* 5 ppm di Bulan April 2014

Data ke-	PARAMETER			
	SWRO A		SWRO B	
	<i>Flow Rate</i> (m <sup>3</sup> /jam)	<i>Different Pressure</i> (kPa)	<i>Flow Rate</i> (m <sup>3</sup> /jam)	<i>Different Pressure</i> (kPa)
1	101	157	102	229
2	101	157	101	230
3	102	157	98	232
4	101	157	100	232
5	107	158	96	233
6	108	158	102	228
7	108	160	101	226
8	107	160	96	228
Total	104,38	159,27	100	230

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengamatan didapatkan bahwa prosedur air laut akan dilakukan proses *pretreatment* air. Dalam *water treatment plant* pada PLTU Paiton unit 7/8 terdapat 2 *train* SWRO, yaitu train A dan B. umpan air laut yang dialirkan menuju SWRO mempunyai nilai *Total Dissolve Solid* yang menyebabkan *scaling* serta nilai *Total Suspended Solid* yang dapat menyebabkan *fouling*. Berikut adalah grafik perbedaan antara penambahan *ferric chloride* sebesar 5 ppm pada bulan Februari dan Maret sedangkan 10 ppm pada bulan Januari dan Desember



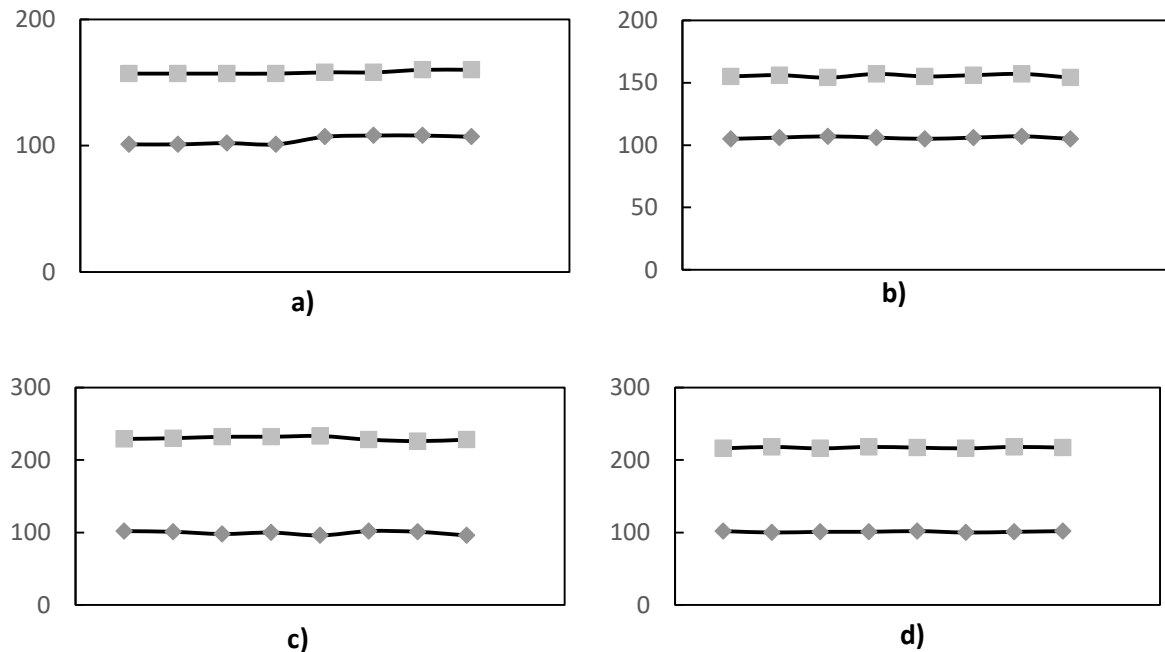
Keterangan Gambar :

- ◆— Flow Rate (m<sup>3</sup>/jam)
- Different Pressure (kPa)

**Gambar 1.** Grafik Flow rate dan Different Pressure pada pengambilan data a) SWRO A Bulan Januari b). SWRO A Bulan Januari c) SWRO B Bulan Februari d) SWRO B Bulan Januari

Berdasarkan data Gambar 1 dan Gambar 2 yang telah diperoleh konsentrasi penambahan *ferric chloride* 10 ppm pada bulan Desember dan Januari mengalami kenaikan rata-rata *Different Pressure* sebesar 6%. Sedangkan pada bulan Februari dan Maret dengan penambahan *ferric chloride* 5 ppm menghasilkan kenaikan rata-rata *Different Pressure* sebesar 3%. Hal ini membuktikan bahwa dosis penambahan *ferric chloride* turut menyumbang kenaikan *Different Pressure* karena *ferric chloride* merupakan partikel yang dapat tersaring pada membran SWRO sehingga pengotor menjadi bertambah. Koagulan memiliki peran penting dalam pembentukan flok karena dengan penambahan konsentrasi koagulan yang berlebih dapat menyebabkan perubahan stabilitas partikel-partikel yang telah terkoagulasi [6]. *Ferric chloride* merupakan garam logam yang digunakan sebagai koagulan karena sifatnya yang dapat melakukan ionisasi di dalam air menjadi kation  $Fe^{3+}$ . Penambahan *ferric chloride* berada pada tangki DAFF yang berfungsi sebagai tahap *pretreatment* untuk meminimalisir terjadinya *fouling* dan *scalant* serta dapat menunjukkan umur membran semakin panjang [7, 8]. Reaksi *ferric chloride* berawal dari kation akan bereaksi dengan alkalinitas dan terhidrolisis menjadi padatan hidroksida logam yang tidak larut dalam air sehingga membentuk koagulan [9]. Pembentukan koagulan yang besar akan mengalami penyumbatan pada SWRO ditandai dengan *Different Pressure* meningkat

sehingga menurunkan *flowrate*. Sistem kerja SWRO menggunakan membran semi permeabel dengan membiarkan atom-atom/molekul-molekul yang berukuran sangat kecil melewati (molekul air, molekul organik berukuran kecil, serta gas).



Keterangan Gambar :

- ◆ Flow Rate (m<sup>3</sup>/jam)
- Different Pressure (kPa)

**Gambar 2** Grafik *Flow Rate* dan *Different Pressure* pada pengambilan data a) SWRO A Bulan Maret b). SWRO A Bulan Maret c) SWRO B Bulan April d) SWRO B Bulan Maret

*Hydrated ion* atau ion-ion yang terlarut dan karenanya dikelilingi molekul-molekul air tertahan oleh membran semi permeabel. Komposisi membran semipermeabel yang biasa digunakan dalam proses RO antara lain *Thin Film Composite*, *Cellulose Acetate*, *Polisulfone* (PSO) [10, 11]. Mekanisme kerja membran semipermeabel dalam proses reverse osmosis (RO) bergantung pada sifat selektif membran dalam memungkinkan molekul air melewati pori-porinya, sambil menahan partikel terlarut seperti garam, ion, dan kontaminan lainnya. Proses ini bekerja dengan menerapkan tekanan pada sisi air umpan (*feed water*), yang memaksa air melewati membran semi-permeabel menuju sisi *permeate*, menghasilkan air murni dengan kandungan garam yang jauh lebih rendah. Tiga jenis membran yang umum digunakan dalam sistem RO adalah *Thin Film Composite* (TFC), *Cellulose Acetate* (CA), dan *Polysulfone* (PSO). Membran TFC terdiri dari beberapa lapisan, dengan lapisan poliamida tipis di bagian atas yang bertanggung jawab atas sifat selektivitas tinggi terhadap ion dan molekul tertentu, sementara lapisan pendukung memberikan kekuatan mekanis. *Cellulose Acetate*, yang terbuat dari serat alami yang dimodifikasi, memiliki keunggulan dalam daya tahan terhadap klorin tetapi lebih rentan terhadap degradasi biologis. Sementara itu, *Polysulfone* (PSO) memiliki struktur polimer dengan cincin aromatik, gugus eter (-O-), dan

sulfon (-SO<sub>2</sub>-), yang memberikan sifat mekanik yang kuat serta ketahanan terhadap pH dan suhu tinggi. Selama proses filtrasi, ion-ion terlarut yang dikelilingi oleh molekul air (hydrated ions) tidak dapat melewati membran karena ukuran dan muatannya, sehingga air bersih dapat dikumpulkan sebagai permeate, sedangkan sisa air dengan konsentrasi garam tinggi dibuang sebagai concentrate. Efektivitas membran RO sangat dipengaruhi oleh faktor seperti tekanan operasi, suhu air, dan tingkat *fouling* yang dapat terjadi akibat akumulasi partikel atau mikroorganisme di permukaan membran. Mekanisme kerja proses RO disebut sebagai difusi garam, dengan membagi aliran salinitas rendah (*permeate*) merupakan produk air hasil filtrasi dan aliran salinitas tinggi (*concentrate*) merupakan air yang memiliki kandungan mineral garam tinggi [12]. Jika membran RO mengalami masalah maka akan berpengaruh terhadap akan berpengaruh terhadap air yang dihasilkan, singkatnya jam operasi, cepatnya pergantian membran, dan naiknya operating costs.

Membran semipermeabel untuk sistem *reverse osmosis* (RO) terdiri dari suatu lapisan tipis film/membran yang direkatkan pada suatu *fabric support*. Membran harus mempunyai permeabilitas terhadap air yang tinggi. Laju alir yang menembus membran (permeabilitas air) harus jauh lebih tinggi dari laju ion terlarut yang menembus membran. Selain itu, membran juga harus stabil pada daerah pH dan temperatur yang tinggi serta mempunyai integritas mekanis yang baik [13, 14]. Hal ini memungkinkan proses pemisahan berlangsung secara efisien, menghasilkan air dengan tingkat kemurnian yang tinggi. Selain itu, laju alir yang menembus membran (permeabilitas air) harus jauh lebih tinggi daripada laju ion terlarut yang melewati membran karena prinsip kerja RO mengandalkan perbedaan tekanan untuk mendorong air melalui membran sambil menahan kontaminan. Perbedaan ukuran molekul antara air dan ion-ion terlarut memungkinkan selektivitas yang tinggi dalam proses penyaringan.

Membran juga harus stabil pada daerah pH dan temperatur yang tinggi karena dalam aplikasi industri, air umpan sering kali memiliki fluktuasi pH dan suhu yang dapat merusak struktur kimia membran jika tidak memiliki ketahanan yang memadai. Stabilitas ini diperoleh dari material membran yang tahan terhadap degradasi kimia dan termal, seperti Thin Film Composite (TFC), Cellulose Acetate (CA), dan Polysulfone (PSO), yang memiliki ketahanan baik terhadap variasi kondisi operasional.

Selain itu, integritas mekanis yang baik sangat penting agar membran mampu menahan tekanan tinggi yang diterapkan selama proses RO tanpa mengalami deformasi atau kebocoran. Ketahanan ini dicapai melalui struktur material yang diperkuat oleh fabric support, yang memastikan membran dapat beroperasi dalam jangka waktu yang lama tanpa mengalami penurunan kinerja.

Masalah yang sering ada dalam penggunaan sistem RO antara lain *fouling* (mikrobiologi, lumpur, *metal oxide*), *scaling* (garam mineral dan silica), hidrolisis dan degradasi (pH, suhu, *oxidants*, *biodegradation*). Adakalanya RO harus dibersihkan. RO akan dibersihkan saat 10-15% penurunan *normalized permeate flowrate* (atau setelah 200 jam operasi pertama), atau 10-15% penurunan *percent salt rejection*, atau 10-15% kenaikan *differential pressure* [15].

#### 4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengolahan data differential pressure dan laju alir pada SWRO Unit 7 dan 8 PT POMI, dapat disimpulkan bahwa penurunan dosis ferric chloride dari 10 ppm menjadi 5 ppm merupakan langkah yang tepat. Hal ini dibuktikan dengan penurunan rata-rata differential pressure dari 6% menjadi 3%, yang menunjukkan peningkatan efisiensi sistem dan potensi perpanjangan umur membran.

Untuk penelitian selanjutnya, perlu dilakukan evaluasi lanjutan terhadap optimasi dosis ferric chloride melalui variasi konsentrasi yang lebih spesifik guna memastikan bahwa dosis 5 ppm merupakan kondisi optimum. Selain itu, kajian literatur dan analisis ekonomi operasional juga diperlukan untuk memperoleh rekomendasi dosis yang lebih komprehensif dalam sistem SWRO.

#### REFERENSI

- [1] A. D. Iffournamasari, S. N. M. Sukmawanta, Y. Maryanty, dan E. Yulianto, "Perhitungan efisiensi high pressure heater pada pembangkit listrik tenaga uap PT POMI Unit 3," *Distilat: Jurnal Teknologi Separasi*, vol. 8, no. 2, hal. 308–314, 2023.
- [2] M. Malaguti, A. F. Novoa, F. Ricceri, M. Giagnorio, J. S. Vrouwenvelder, A. Tiraferri, L. Fortunato, "Control strategies against algal *fouling* in membrane processes applied for microalgae biomass harvesting," *Journal of Water Process Engineering*, vol. 47, hal. 102787, 2022.
- [3] S. F. Anis, R. Hashaikeh, dan N. Hilal, "Reverse osmosis pretreatment technologies and future trends: A comprehensive review," *Desalination*, vol. 452, hal. 159–195, 2019.
- [4] K. Loganathan, J. Saththasivam, dan S. Sarp, "Removal of microalgae from seawater using chitosan-alum/ferric chloride dual coagulations," *Desalination*, vol. 433, hal. 25–32, 2018.
- [5] A. H. Alshahri, M. Giagnorio, A. H. A. Dehwah, M. Obaid, T. M. Missimer, T. Leiknes, N. Ghaffour, dan L. Fortunato, "Advanced coagulation with liquid ferrate as SWRO desalination pretreatment during severe algal bloom: Process performance, environmental impact, and cost analysis," *Desalination*, vol. 537, hal. 115864, 2022.
- [6] M. S. Fadila, M. A. Afandy, dan M. I. Al Fuady, "Studi kinetika dan penentuan dosis optimum koagulan  $\text{FeCl}_3$  dalam menurunkan konsentrasi  $\text{Cu}^{2+}$  pada larutan," *Reactor: Journal of Research on Chemistry and Engineering*, vol. 4, no. 2, hal. 60–67, 2023.
- [7] J. Sohn, R. Valavala, J. Han, N. Her, dan Y. Yoon, "Pretreatment in reverse osmosis seawater desalination: A short review," *Environmental Engineering Research*, vol. 16, no. 4, hal. 205–212, 2011.
- [8] I. I. Sulaksono, "Sistem membran terintegrasi untuk pengolahan air dan desalinasi," hal. 0–12, 2017.
- [9] H. L. D. Umah, N. Rofiatul, dan T. Joko, "Efektivitas dosis ferri klorida dalam menurunkan kadar chemical oxygen demand pada limbah pabrik tahu di Tempelsari Kalikajar Wonosobo," *Jurnal Kesehatan Masyarakat*, vol. 6, hal. 279–289, 2018.
- [10] C. Chen, Y. Kuang, dan L. Hu, "Challenges and opportunities for solar evaporation," *Joule*, vol. 3, no. 3, hal. 683–718, 2019.
- [11] A. A. Ragetisvara dan H. S. Titah, "Studi kemampuan desalinasi air laut menggunakan sistem sea water reverse osmosis (SWRO) pada kapal pesiar," *Jurnal Teknik ITS*, vol.

10, no. 2, 2021.

- [12] A. Rifai, D. Rita, K. Hartaja, O. Sulaeman, dan I. Setiadi, "Pengaruh tekanan pada reverse osmosis terhadap penyisihan kadar ion klorida ( $\text{Cl}^-$ ) dan total dissolved solids (TDS) pada pengolahan air payau," *Jurnal Teknologi Lingkungan*, vol. 25, no. 2, hal. 300–307, 2024.
- [13] N. L. Hanna, "Kelayakan teknologi desalinasi sebagai alternatif penyediaan air minum Kota Surabaya (studi kasus: 50 liter per detik)," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 5, no. 2, 2016.
- [14] T. K. Das, M. Folley, P. Lamont-Kane, dan C. Frost, "Performance of a SWRO membrane under variable flow conditions arising from wave powered desalination," *Desalination*, vol. 571, hal. 117069, 2024.
- [15] A. Jiang, H. Wang, Y. Lin, W. Cheng, dan J. Wang, "A study on optimal schedule of membrane cleaning and replacement for spiral-wound SWRO system," *Desalination*, vol. 404, hal. 259–269, 2017.