

PENGARUH TEKANAN OPERASI SEA WATER REVERSE OSMOSIS TERHADAP KUALITAS PRODUK MELALUI SIMULASI VEOLIA DAN DATA OPERASIONAL DI PLTU PACITAN

Rama Devana Putra¹, Ariani¹, Jati Kamajaya²

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

²PT PLN Nusantara Power Unit Pembangkitan Pacitan Jalan Pacitan – Trenggalek KM 55, Desa Sukorejo, Kec. Sudimoro, Pacitan, Indonesia

ramadevana123@gmail.com; [ariani@polinema.ac.id]

ABSTRAK

Analisis efisiensi membran *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) pada *Water Treatment Plant* di PLTU Pacitan penting dilakukan untuk memastikan kinerja optimal sistem desalinasi dalam menyediakan air umpan berkualitas tinggi bagi proses pembangkitan listrik serta menekan biaya operasional dan meningkatkan keandalan sistem. Penelitian ini menganalisis pengaruh tekanan operasi pada sistem SWRO terhadap konduktivitas produk yang dihasilkan. Analisis dilakukan dengan membandingkan data operasional aktual dengan hasil simulasi menggunakan perangkat lunak bawaan dari pemasok membran, yaitu software Veolia. Data primer berupa konduktivitas diambil pada rentang tekanan 25–47 bar melalui pengukuran permeat kumulatif selama periode September hingga November 2024. Hasil menunjukkan adanya korelasi negatif antara tekanan dan konduktivitas: peningkatan tekanan cenderung menurunkan konduktivitas produk (contoh: pada 47 bar → 754–914 $\mu\text{S}/\text{cm}$; pada 25 bar → 4794–9567 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Namun demikian, ditemukan penyimpangan rata-rata sebesar 66% antara data aktual dan simulasi, yang mengindikasikan adanya penurunan kinerja membran akibat proses penuaan (*aging*), faktor pengotor (*fouling*), serta karena sudah mendekati masa akhir penggunaan (*lifetime*). Temuan ini menekankan pentingnya pemeliharaan membran secara berkala dan membuka peluang peningkatan efisiensi sistem SWRO secara rutin dan berkelanjutan.

Kata kunci: *Sea Water Reverse Osmosis, Konduktivitas Air, Tekanan Operasi, Simulasi Veolia*

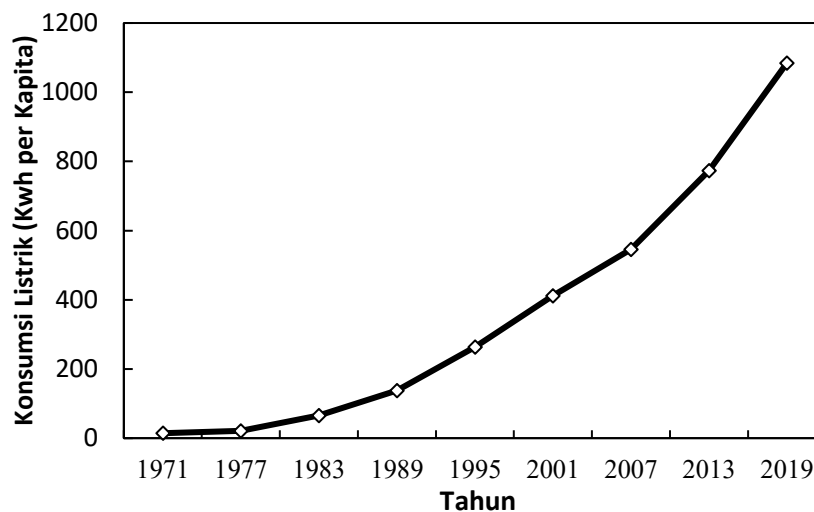
ABSTRACT

The analysis of *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) membrane efficiency at the *Water Treatment Plant* of Pacitan Coal-Fired Power Plant is essential to ensure the optimal performance of the desalination system in supplying high-quality feed water for the power generation process, while also reducing operational costs and improving system reliability. This study examines the effect of operating pressure in the SWRO system on the conductivity of the produced water. The analysis is carried out by comparing actual operational data with simulation results using membrane supplier software, namely Veolia software. Primary data in the form of conductivity were collected within a pressure range of 25–47 bar through cumulative permeate measurements during the period of September to November 2024. The results show a negative correlation between pressure and conductivity: increasing pressure tends to decrease product conductivity (for example, at 47 bar → 754–914 $\mu\text{S}/\text{cm}$; at 25 bar → 4794–9567 $\mu\text{S}/\text{cm}$). However, an average deviation of 66% was found between actual data and simulation results, indicating a decline in membrane performance due to aging, fouling factors, and approaching the end of its service life. These findings highlight the importance of regular membrane maintenance and present opportunities for continuous and sustainable improvements in SWRO system efficiency.

Keywords: *Sea Water Reverse Osmosis, Water Conductivity, Operating Pressure, Veolia Simulation*

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan salah satu energi yang menjadi kebutuhan dasar masyarakat Indonesia sebagai pondasi vital. Listrik tidak hanya menghidupkan industri besar, UMKM, serta infrastruktur transportasi dan komunikasi yang menjadi tulang punggung perekonomian, tetapi juga menjadi kunci dalam mendukung bidang pendidikan, kesehatan, dan aktivitas sosial sehari-hari jutaan penduduk dari perkotaan hingga pelosok desa di Indonesia. Adanya peningkatan pembangunan akibat pertumbuhan penduduk, akan menaikkan konsumsi energi listrik di Indonesia. Fenomena ini dapat direpresentasikan dari tahun ke tahun pada Gambar 1. Peningkatan konsumsi listrik ini juga diprediksi akan mengalami peningkatan sebesar 10% selama 10 tahun ke depan [1] [2].

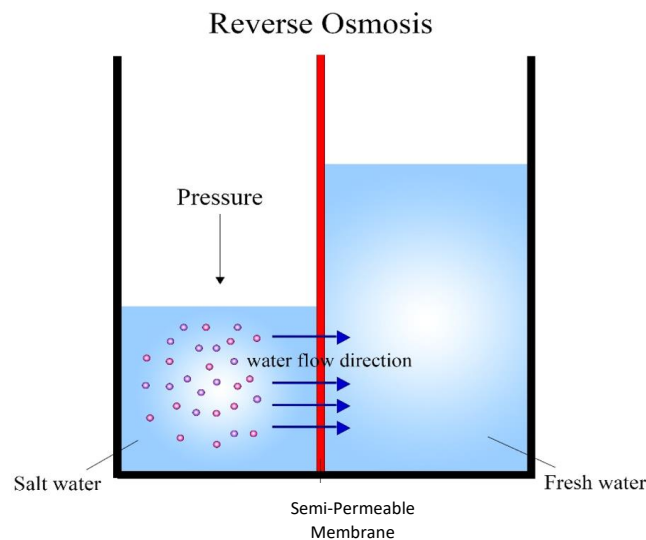


Gambar 1. Peningkatan konsumsi listrik di Indonesia setiap tahun [3].

Salah satu pembangkit listrik yang menyediakan listrik untuk masyarakat Indonesia khususnya pada daerah Jawa adalah PT PLN Nusantara Power UP Pacitan, yang berlokasi di Jalan Pacitan–Treggalek KM 55, Jawa Timur. Unit pembangkitan ini merupakan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) strategis berkapasitas 630 MW (2×315 MW) yang beroperasi sejak 2013 sebagai bagian dari proyek percepatan 10.000 MW nasional (Perpres No. 71/2006) [4], dengan bahan bakar batubara (*Low/Medium Range Coal*) dan sistem transmisi 150 kV yang menyuplai kebutuhan energi Jawa Tengah dan Timur.

Metode yang digunakan oleh PLTU Pacitan untuk memproduksi air demineral yang dijadikan sebagai umpan boiler adalah dengan menggunakan rangkaian sebagai berikut: *Vacuum Filtration* (VAF), *Ultrafiltration Filter* (UF), *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO), *Brackish Water Reverse Osmosis* (BWRO). SWRO dipilih sebagai objek penelitian dikarenakan membran tersebut mengolah air laut dengan kadar garam yang sangat tinggi (± 30.000 – 45.000 ppm). Karena salinitasnya tinggi, sistem ini membutuhkan tekanan operasi yang besar (sekitar 55–80 bar) agar air dapat lolos melewati membran [5]. Akibatnya, konsumsi energi SWRO lebih tinggi dan membrannya dirancang khusus untuk menahan tekanan tinggi serta tingkat fouling yang lebih kompleks. SWRO sendiri merupakan metode yang digunakan untuk memisahkan kontaminan terlarut (terutama dalam bentuk garam dengan ukuran 50-200 dalton [6]) dengan memberikan tekanan tinggi pada kisaran 10-100 bar pada air laut untuk melewati membran semi-permeable [7] [8], skema dari proses SWRO bisa dilihat pada Gambar

2. Metode SWRO memiliki energi yang lebih efisien dan ramah lingkungan, tidak berdampak besar pada lingkungan, serta dapat dipasangkan dengan berbagai sumber energi terbarukan [9]. Sedangkan kekurangan dari proses ini adalah memerlukan energi yang besar akibat kebutuhan tekanan yang besar, adanya *water losses*, dan rentan terhadap *biofouling* [10].



Gambar 2. Skema proses SWRO [11]

Membran semi-permeable yang digunakan pada proses SWRO sendiri dapat mengalami penurunan kualitas yang mengakibatkan adanya penurunan efisiensi alat yang dilihat berdasarkan jumlah garam yang berhasil dipisahkan (*%salt rejection*) [12]. Penurunan efisiensi membran SWRO seiring waktu terutama disebabkan oleh fouling (pengotoran), scaling (pembentukan kerak anorganik), dan penuaan membran (aging) akibat tekanan tinggi serta paparan bahan kimia, yang secara keseluruhan menurunkan permeabilitas dan selektivitas membran [13]. Bagaskara melakukan penelitian mengenai efisiensi membran SWRO pada PLTU Paiton yang mengolah air laut menjadi air tawar sebagai air umpan boiler, sedangkan pada penelitian ini saya lakukan analisa efisiensi disertai dengan perbandingan data pada simulasi Veolia sekaligus menentukan kondisi operasi yang optimal. Penelitian dilakukan dengan membandingkan nilai *salt rejection* dan *salt passage* (persentase garam yang lolos dari membran semi-permeable pada kondisi sebelum dan sesudah dilakukannya proses pembersihan (*cleaning*) membran. Hasil dari penelitian ini adalah Berdasarkan evaluasi kinerja, diketahui bahwa setelah dilakukan proses *cleaning* pada membran RO, persentase *salt rejection* meningkat dari 97,85% menjadi 98,07%, persentase *recovery* permeat naik dari 37,64% menjadi 38,42%, presentase *recovery concentrate* turun dari 62,36% menjadi 61,58%, dan presentase *salt passage* menurun dari 2,15% menjadi 1,93%. Hal ini menunjukkan bahwa proses *cleaning* berjalan baik namun tidak dapat mengembalikan kinerja kerja membran seperti semula, hanya dapat memperpanjang umur membran [14]. Pada penelitian tersebut, penanganan pada membran SWRO masih berfokus pada metode umum yaitu *Cleaning in Place* (CIP). Setelah proses tersebut dilakukan, diperlukan evaluasi lebih lanjut terhadap kondisi operasi SWRO agar diperoleh kualitas produk yang lebih optimal.

Penelitian serupa dilakukan oleh Safitri yang melakukan evaluasi proses SWRO pada PT Sumber Segara Primadaya (PLTU) Cilacap. Penelitian dilakukan dengan mengukur nilai

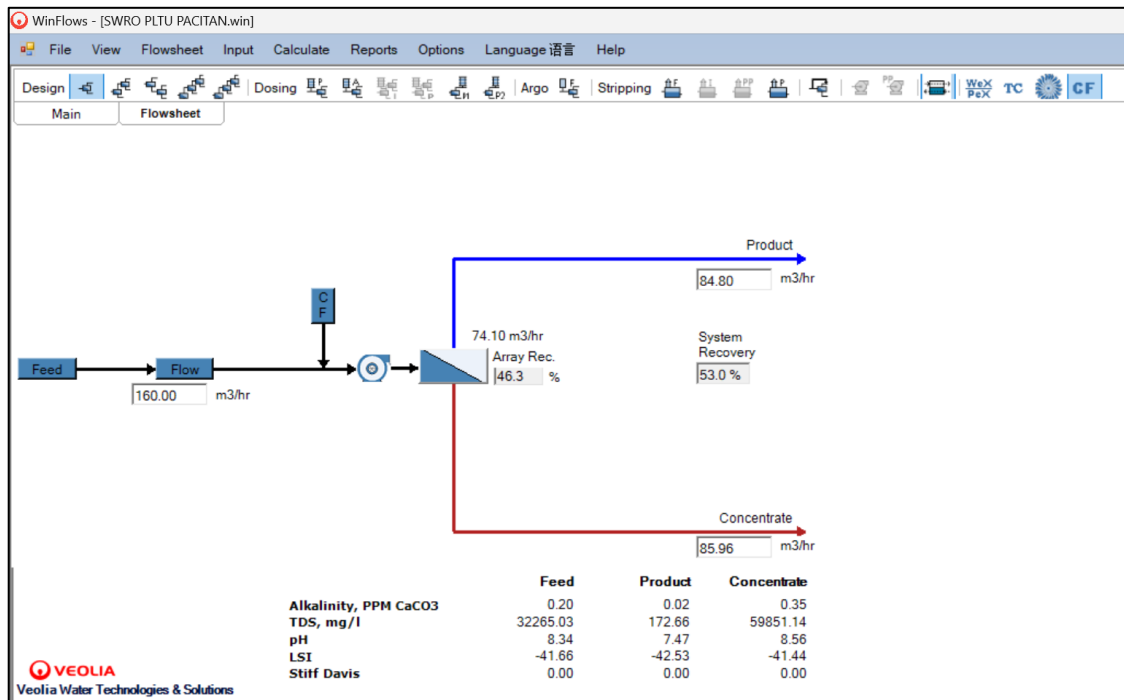
konduktivitas air umpan dengan air keluaran SWRO sehingga didapatkan data *salt rejection*. Berdasarkan hasil penelitian, didapatkan nilai konduktivitas outlet SWRO sebesar 331 - 699 $\mu\text{S}/\text{cm}$ dan rata-rata *salt rejection* sebesar 98.93%. Hal ini menunjukkan bahwa membran yang digunakan pada PT Sumber Segara Primadaya (PLTU) Cilacap masih dalam kondisi efektif apabila dibandingkan dengan standar industri yang mengharuskan nilai *salt rejection* berada di atas 95% [15]. Pada penelitian tersebut mengalami penurunan nilai konduktivitas produk meskipun pada kondisi pressure lebih tinggi sehingga harus dilakukan proses pembersihan membran menggunakan alkali dan acid, sedangkan pada penelitian saya dilakukan pertimbangan juga dilihat dari segi parameter kondisi operasi baik itu *temperature* ataupun *pressure*.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh tekanan operasi terhadap nilai konduktivitas aliran outlet SWRO lalu dibandingkan dengan data simulasi perangkat lunak (*software*) Veolia. Hasil dari penelitian ini diharapkan mampu untuk memberikan gambaran mengenai keefektifan proses SWRO terkini. Data aktual yang sudah didapatkan akan dilakukan perbandingan dengan hasil data pada simulasi Veolia dengan menyesuaikan kondisi operasi dan semua parameter sama. Hal ini dikarenakan simulasi Veolia menghitung nilai konduktivitas outlet SWRO berdasarkan data membran yang masih dalam kondisi baru dipasang, sehingga persen penyimpangan antara data aktual dan data hasil simulasi dapat digunakan untuk memprediksi kondisi membran terkini.

2. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan berdasarkan hasil pengamatan data operasional (data aktual) dan data simulasi. Data pengamatan operasional didapatkan dengan observasi kualitas air hasil proses SWRO pada berbagai tekanan operasi (dalam bar) terhadap konduktivitas air (dalam $\mu\text{S}/\text{cm}$). Pengambilan data dilakukan pada tiga waktu yang berbeda, yaitu pada tanggal 19 September 2024, 31 Oktober 2024, dan 29 November 2024. Sedangkan data pengamatan simulasi Veolia didapatkan dengan menggunakan *software* Veolia untuk melakukan simulasi proses SWRO secara teoretis untuk kemudian dibandingkan dengan data pengaruh tekanan operasi terhadap konduktivitas air secara aktual. Aplikasi *software* Veolia dijalankan dengan menggunakan data aktual berupa tekanan operasi (dalam bar) untuk kemudian dihitung sesuai dengan membran SWRO yang telah terpasang, simulasi Veolia kemudian akan melakukan perhitungan nilai konduktivitas hasil keluaran proses SWRO berdasarkan kondisi membran baru. Untuk *software* simulasi Veolia sendiri merupakan aplikasi bawaan merk membran yang terpakai dan diberikan oleh vendor produk membran kepada pembeli.

Penggunaan simulasi Veolia dilakukan dengan menginput parameter *flow inlet* SWRO berdasarkan data flow meter yang telah diketahui, dengan tekanan (*pressure*) sebagai acuan utama. Penentuan nilai *flow inlet* dilakukan melalui metode *trial and error* hingga diperoleh nilai tekanan yang sesuai dengan variabel yang telah ditetapkan. Hasil simulasi yang diperoleh setelah input nilai flow meliputi parameter alkalinitas, pH, *total dissolved solids* (TDS), *flow* produk, *flow* konsentrat, serta konduktivitas air produk. Nilai *flow inlet* SWRO dimasukkan pada kolom flow (m^3/jam), sebagaimana ditunjukkan pada tampilan simulasi Veolia pada Gambar 3.



Gambar 3. Simulasi Veolia

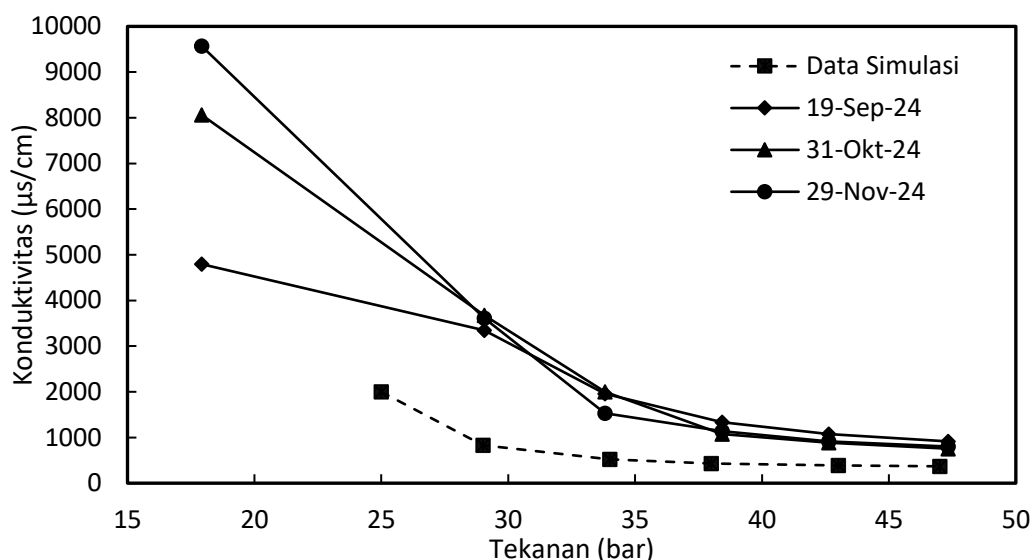
Selanjutnya, data utama yang digunakan adalah nilai konduktivitas produk, yang kemudian dibandingkan dengan data aktual dan dianalisis menggunakan grafik. Pada simulasi Veolia, sebagian besar parameter lainnya telah disesuaikan secara otomatis berdasarkan spesifikasi membran, namun pengguna tetap dapat melakukan penyesuaian terhadap parameter tertentu jika diperlukan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

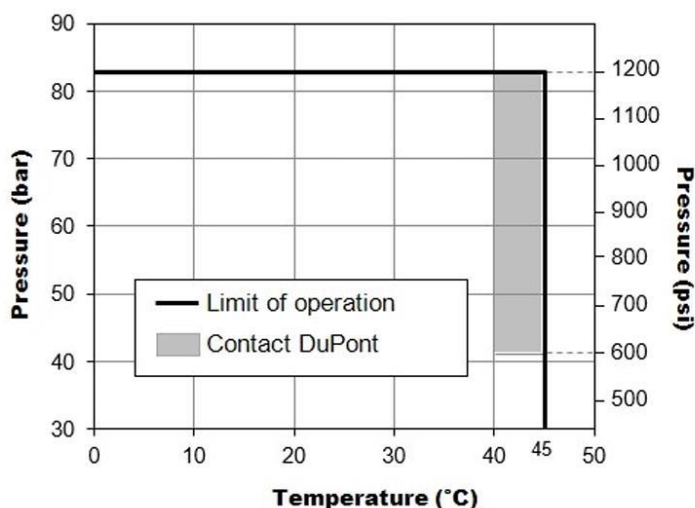
Hasil pengamatan secara aktual berdasarkan data operasional dan simulasi Veolia disajikan sebagai berikut:

3.1. Data Operasional dan Simulasi Veolia

Rekapan data operasional dan simulasi Veolia dapat dilihat pada Gambar Gambar 4. Berdasarkan data yang tertera pada Gambar 4, dapat diketahui bahwa tren dari nilai konduktivitas berbanding terbalik dengan nilai tekanan operasi yang digunakan untuk proses SWRO. Hal ini sudah sesuai dengan teori yang menyatakan bahwa nilai dari konduktivitas outlet SWRO akan berbanding terbalik dengan tekanan operasi SWRO (berbanding lurus dengan nilai *salt rejection*) [16]. Sedangkan apabila dibandingkan berdasarkan hasil simulasi dan hasil pengamatan secara aktual (menggunakan data lapangan) maka dapat diketahui bahwa kondisi membran saat ini berada relatif jauh dengan kondisi membran saat masih baru. Namun hal ini juga dapat disebabkan oleh ketidakakuratan perhitungan simulasi dikarenakan ada banyak parameter di lapangan yang berada diluar kondisi ideal (atau parameter yang diabaikan), sehingga menyebabkan adanya penyimpangan yang relatif tinggi.



Gambar 4. Pengaruh tekanan terhadap konduktivitas



Gambar 5. Batasan suhu dan tekanan SWRO [17]

Sementara itu, apabila ditinjau berdasarkan batasan parameter menurut buku manual dari DuPont Water Solutions yang bisa dilihat Gambar 5, dapat diketahui bahwa batasan tekanan berada pada angka 83 bar dan batasan suhu pada 45°C . Sedangkan untuk membran SWRO pada PLTU Pacitan beroperasi normal pada *pressure* 45-50 bar dan *temperature* max 28°C . Kondisi operasi tersebut masih jauh dari limit operasi dan masih ada kemungkinan untuk dinaikkan lagi untuk mendapatkan kualitas produk yang lebih baik. Untuk menaikkan *pressure* operasi juga diperlukan berbagai pertimbangan, salah satunya dari *life time* membran dan apakah dengan *pressure* operasi tersebut sudah memenuhi target kualitas produk yang diinginkan. Dengan nilai *pressure* 45-50 bar sudah didapatkan nilai conductivity produk dibawah $800 \mu\text{s}/\text{cm}$ dan jika *pressure* operasi dinaikkan seharusnya bisa didapatkan nilai conductivity yang lebih kecil. Akan tetapi, *pressure* yang terlalu besar juga dapat menyebabkan *pressure damage* pada membran SWRO sehingga dapat menyebabkan

kebocoran dan harus dilakukan pergantian. Jadi, untuk *pressure* operasi ditentukan sesuai kebutuhan dan tetap sesuai batasan operasi membran SWRO.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian, dapat diketahui bahwa kualitas membran yang digunakan di PT PLN Nusantara Power UP Pacitan mengalami penurunan efektivitas kinerja. Namun demikian, nilai konduktivitas produk masih memenuhi target perusahaan, yaitu di bawah 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Nilai konduktivitas pada kondisi tekanan maksimum pompa sebesar 47 bar tercatat pada beberapa periode, yaitu 19 September 2024 sebesar 914 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 31 Oktober 2024 (setelah CIP) sebesar 754 $\mu\text{S}/\text{cm}$, dan 29 November 2024 sebesar 801 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Oleh karena itu, diperlukan identifikasi lebih lanjut untuk mengetahui membran yang mengalami degradasi atau penurunan kinerja. Namun jika ditinjau dari batasan nilai operasi, proses SWRO di PT PLN Nusantara Power UP Pacitan masih berada dalam kondisi yang aman. Pengaruh tekanan operasi terhadap kualitas produk SWRO menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan operasi, maka kualitas produk SWRO cenderung semakin baik, dan sebaliknya semakin rendah tekanan operasi maka kualitas produk cenderung menurun, dengan catatan tekanan tersebut masih berada dalam batas operasi membran SWRO yang digunakan.

Penelitian selanjutnya masih dapat dilakukan untuk mengkaji lebih lanjut peningkatan tekanan operasi guna memperoleh kualitas produk yang lebih baik, mengingat spesifikasi tekanan dan temperatur memiliki rentang yang cukup luas. Adapun *pressure* maksimum yang diizinkan mencapai 83 bar dengan *temperature* operasi hingga 45°C. Jadi, untuk menaikkan kondisi parameter nilai *pressure*, diharuskan melakukan penggantian pompa dengan kapasitas yang lebih besar, dikarenakan pompa yang sekarang digunakan hanya maksimum di 47-50 bar.

REFERENSI

- [1] R. A. Pratama dan M. Ikhsan, "Penerapan Forecasting Konsumsi Listrik terhadap Kenaikan Pelanggan dengan Double Exponential Smoothing Holt's," *Jurnal SIMETRIS*, vol. 13, 2022.
- [2] S. Johan dan A. M. Ginting, "Determinasi Konsumsi Listrik di Indonesia," *Media Ekonomi*, vol. 30, no. 1, hal. 106–117, Sep. 2022.
- [3] Ridhani dan M. Ilhamsyah Siregar, "Forecasting Konsumsi Listrik di Indonesia," (*JIM EKP*) *Fakultas Ekonomi dan Bisnis Universitas Syiah Kuala*, vol. 6, no. 3, hal. 195–204, 2021.
- [4] Pemerintah Pusat Indonesia, *Peraturan Presiden (Perpres) Nomor 71 Tahun 2006 tentang Penugasan Kepada PT Perusahaan Listrik Negara (Persero) Untuk Melakukan Percepatan Pembangunan Pembangkit Tenaga Listrik yang Menggunakan Batubara*. Indonesia: Sekretariat Kabinet Republik Indonesia, 2006.
- [5] T. Altmann, P. J Buijs, A.S.F. Farinha, V.R.P. Borges, N. M. Farhat, J.S. Vrouwenvelder, dan Ratul Das, "Seawater Reverse Osmosis Performance Decline Caused by Short-Term Elevated Feed Water Temperature," *Membranes (Basel)*, vol. 12, no. 8, Art. no. 792, Aug. 2022.
- [6] C. Niu, X. Li, R. Dai, dan Z. Wang, "Artificial intelligence-incorporated membrane fouling prediction for membrane-based processes in the past 20 years: A critical review," *Water Res.*, vol. 216, Art. no. 118299, 2022.

- [7] A. M. Mushtaha, M. Shatat, K. Arakelyan, O. Shatat, T. Forster, dan A. Mushtaha, "Water Desalination in the Gaza Strip: Al Salam RO Brackish Water Desalination Plant Case Study," Proceedings of the 40th WEDC International Conference: Local Action with International Cooperation to Improve and Sustain Water, Sanitation and Hygiene Services, Loughborough, United Kingdom, 2017.
- [8] S. Duranceau, *Reverse Osmosis and Nanofiltration Technology: Inorganic, Softening and Organic Control*. Isle of Palms, SC, USA: American Membrane Technology Association, 2001.
- [9] S. El Aimani, "Modeling of Reverse Osmosis Water Desalination Powered by Photovoltaic Solar Energy," *Green Energy and Environmental Technology*, vol. 2, Feb. 2023.
- [10] L. Henthorne dan B. Boysen, "State-of-the-art of reverse osmosis desalination pretreatment," *Desalination*, vol. 356, pp. 129–139, 2015.
- [11] Y. A. Tayeh, "A Comprehensive Review of Reverse Osmosis Desalination: Technology, Water Sources, Membrane Processes, Fouling, and Cleaning," *Desalination and Water Treatment*, vol. 320, Art. no. 100882, 2024.
- [12] E. Coutinho de Paula dan M. C. S. Amaral, "Extending the Life-Cycle of Reverse Osmosis Membranes: A Review," *Waste Management & Research*, vol. 35, no. 5, pp. 456–470, 2017.
- [13] M. Elimelech and W. A. Phillip, "The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment," *Science*, vol. 333, no. 6043, hal. 712–717, 2011.
- [14] R. Bagaskara, "Menghitung Neraca Massa dan Efisiensi Kinerja Sea Water Reverse Osmosis (SW3OHR LE-400) PT. PLN Nusantara Power UP Paiton Unit 9," Diploma thesis, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Yogyakarta, 2024.
- [15] M. Safitri, "Valuasi Performa Sea Water Reverse Osmosis pada Water Treatment Plant Unit 3A PT. Sumber Segara Primadaya (PLTU) Cilacap," Diploma thesis, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta, Yogyakarta, 2022.
- [16] M. Kurihara, T. Sasaki, K. Nakatsuji, M. Kimura, dan M. Henmi, "Low pressure SWRO membrane for desalination in the Mega-ton Water System," *Desalination*, vol. 368, pp. 135–139, Jul. 2015.
- [17] DuPont Water Solutions, FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual, Version 17. Wilmington, DE, USA: DuPont Water Solutions, 2024.