

Optimalisasi Sistem *Sea Water Reverse Osmosis* (Swro) Di Pulau Ende: Evaluasi Efisiensi Dan Strategi Pengelolaan

**Putu Gede Suranata^{*1}, Putu Ika Wahyuni², Kadek Windy Candraayana³, I Wayan Gde Erick Triswandana⁴,
Gde Wikan Pradnya Dana⁵**

*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Jl. Terompong No.24, Denpasar
e-mail: suranata10@gmail.com*

*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Jl. Terompong No.24, Denpasar
e-mail: ikawahyuni9971@gmail.com*

*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Jl. Terompong No.24, Denpasar
e-mail: windycandraayana@gmail.com*

*Program Studi Teknik Sipil, Universitas Warmadewa, Jl. Jl. Terompong No.24, Denpasar
e-mail: ericktriswandana@gmail.com*

*Program Studi Teknik Komputer, Universitas Warmadewa, Jl. Jl. Terompong No.24, Denpasar
e-mail: wikanpdana8044@gmail.com*

ABSTRAK

Pulau Ende menghadapi tantangan besar dalam memenuhi kebutuhan air bersih karena keterbatasan sumber air tawar. Upaya untuk mengatasi masalah ini, pemerintah membangun instalasi *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) sebagai solusi desalinasi air laut. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan biaya operasional dan keberlanjutan operasional SWRO di Pulau Ende yang sebelumnya telah terlaksana, dengan fokus pada analisis biaya listrik, pemeliharaan, serta perhitungan waktu operasional yang ideal. Data diperoleh melalui survei lapangan dan analisis teknis terhadap perangkat SWRO, termasuk perhitungan daya aktif dan daya reaktif. Hasil penelitian menunjukkan bahwa biaya operasional SWRO meliputi komponen penting seperti listrik, tenaga kerja, dan pemeliharaan, dengan estimasi biaya bulanan mencapai Rp. 47.628.869. Penelitian ini juga menyimpulkan bahwa untuk mencapai titik impas, operasional SWRO harus berjalan minimal selama 596 jam per bulan. Dengan analisis ini, penelitian memberikan rekomendasi terkait strategi pengelolaan SWRO agar operasional dapat berjalan efisien dan berkelanjutan.

Kata Kunci: SWRO, Biaya Operasional, Desalinasi, Energi Listrik, Keberlanjutan

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan air baku saat ini menjadi salah satu prioritas utama dalam memenuhi kebutuhan dasar kehidupan manusia. Air merupakan sumber vital yang memiliki peran penting dalam mendukung berbagai aktivitas manusia sehari-hari. Dalam kehidupan sehari-hari, peran air baku sangat krusial, baik untuk memenuhi kebutuhan minum, sanitasi, serta kebutuhan lainnya seperti mandi, cuci, kakus (MCK), dan keperluan rumah tangga, termasuk untuk keperluan ternak. Seiring dengan perkembangan di berbagai aspek kehidupan akibat pertumbuhan populasi yang terus meningkat serta pesatnya pembangunan, kebutuhan akan air dan pelayanan yang memadai untuk penyediaannya pun semakin bertambah dan menjadi semakin mendesak.

Pulau Ende sebagai salah satu daerah yang memiliki keterbatasan sumber air tawar mengalami tantangan besar dalam memenuhi kebutuhan air bersih bagi masyarakatnya. Salah satu solusi yang telah diterapkan untuk mengatasi masalah ini adalah pembangunan Sistem Penyediaan Air Minum *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO). Penelitian mengenai SWRO telah banyak dilakukan, salah satunya dari Qihang (2024) yang membahas pengembangan sistem *reverse osmosis* air laut (SWRO) dengan menggunakan kontrol PLC Siemens dan proses pra-pengolahan yang dioptimalkan. Sistem ini dirancang untuk menghasilkan air minum berkualitas tinggi dan menawarkan keuntungan seperti pengoperasian yang mudah, perawatan yang mudah, dan pemantauan. (Li et al., 2024). Penelitian lainnya dari Sarai (2016) menjelaskan penggunaan teknologi desalinasi *reverse osmosis* (RO) terbukti efektif dalam mengatasi tingginya salinitas sungai MOD di Irak. Hasil analisis menunjukkan bahwa parameter operasi seperti suhu, salinitas, tekanan, dan rasio pemulihan memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi desalinasi RO. Selain itu, penelitian ini berhasil mengoptimalkan sistem desalinasi RO dalam hal kebutuhan energi, penolakan garam, dan biaya total produksi air, memberikan kontribusi signifikan dalam menawarkan solusi berkelanjutan untuk mengatasi kekurangan air di Irak. (Sarai Atab et al., 2016).

Teknologi SWRO ini mampu mengubah air laut menjadi air bersih yang layak digunakan oleh masyarakat setempat. Namun, meskipun teknologi ini sangat bermanfaat, terdapat beberapa kendala dalam keberlanjutan operasionalnya yang memerlukan perhatian lebih lanjut. Berdasarkan hasil survei dan identifikasi masalah di lapangan, ditemukan

beberapa tantangan utama dalam operasional SWRO Pulau Ende, salah satunya adalah besarnya biaya operasional yang meliputi biaya listrik, biaya pemeliharaan (*maintenance*), biaya tenaga kerja, dan biaya lainnya. Biaya-biaya ini menjadi faktor yang krusial dalam menentukan kelangsungan operasional SWRO di masa mendatang.

Kondisi ini memunculkan dua pertanyaan utama yang perlu dijawab: pertama, berapa sebenarnya biaya operasional SWRO Ende setiap bulannya? Kedua, apakah SWRO Pulau Ende dapat terus beroperasi di masa depan dengan mempertimbangkan besarnya biaya operasional tersebut? Jawaban atas pertanyaan-pertanyaan ini sangat penting untuk merumuskan strategi pengelolaan yang lebih efektif dan efisien bagi keberlanjutan penyediaan air bersih di Pulau Ende.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menghitung secara rinci besarnya biaya operasional yang diperlukan oleh SWRO Ende setiap bulan dan untuk mengevaluasi apakah keberlanjutan operasional SWRO dapat terjamin di masa depan dengan mempertimbangkan faktor biaya tersebut. Dengan memahami komponen biaya dan bagaimana pengaruhnya terhadap durasi operasi dan jumlah pegawai, diharapkan dapat diperoleh waktu operasional yang ideal sehingga sistem dapat beroperasi dengan efisien tanpa mengalami kerugian.

2. STUDI PUSTAKA

Sea Water Reserse Osmosis (SWRO)

Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) adalah proses desalinasi yang memanfaatkan membran semipermeabel untuk memisahkan air laut dari zat terlarutnya. Prinsip dasar SWRO mengikuti osmosis, di mana air bergerak dari konsentrasi rendah menuju konsentrasi tinggi melalui membran. Namun dalam SWRO, proses ini dibalik dengan menerapkan tekanan yang lebih besar dari tekanan osmotik menggunakan pompa, sehingga air bergerak dari larutan berkonsentrasi tinggi (air asin) menjadi air tawar. Teknologi ini efektif untuk menghasilkan air bersih dengan energi yang relatif efisien, menjadikannya solusi utama untuk daerah dengan keterbatasan air tawar. *Sea Water Reverse Osmosis (SWRO)* dapat dikombinasi dengan pembangkit listrik yang mana hal ini sepenuhnya didukung oleh sistem energi terbarukan hibrida yang terdiri dari PV kemiringan tetap, PV pelacakan sumbu tunggal, tenaga angin, baterai, dan teknologi power-to-gas (PtG) (Caldera et al., 2016). Hal ini memungkinkan pemanfaatan kapasitas desalinasi yang terpasang secara optimal. Disisi lain SWRO memiliki dampak lingkungan diantaranya seperti impingement dan entrainment organisme laut akibat sistem pengambilan air, dampak konstruksi dan operasi fasilitas, dan dampak dari pembuangan konsentrat. (Missimer & Maliva, 2018) serta dampak dari Reverse Osmosis (RO) antara lain: penurunan permeabilitas air, peningkatan tekanan saluran pakan, peningkatan keluarnya garam (sehingga memerlukan pergantian membran awal) kebutuhan CIP periodik (Jafari et al., 2021) serta potensial pemanasan global (GWP) dan potensial ekotoksikologi akuatik laut (MAETP) yang tinggi (Al-Kaabi et al., 2021)

Daya Listrik

Daya listrik adalah jumlah energi yang digunakan untuk melakukan kerja dalam suatu sistem tenaga listrik, yang diukur dalam satuan watt (W). Pada sistem tegangan bolak-balik (AC), daya listrik terbagi menjadi tiga jenis, yaitu daya aktif (P), daya reaktif (Q), dan daya semu (S). **Daya aktif (P)**, diukur dalam watt (W), adalah energi yang digunakan secara efektif untuk melakukan kerja. **Daya reaktif (Q)**, diukur dalam volt ampere reaktif (VAR), adalah komponen energi yang tidak melakukan kerja tetapi dibutuhkan untuk mempertahankan medan listrik dan magnet. **Daya semu (S)**, diukur dalam volt ampere (VA), adalah gabungan dari daya aktif dan reaktif yang mencerminkan total kebutuhan energi dalam sistem. Pengelolaan ketiga jenis daya ini sangat penting untuk efisiensi operasional sistem tenaga listrik.

$$\text{Daya Aktif (P)} = V \times I \times \cos \varphi \quad (1)$$

$$\text{Daya Reaktif (Q)} = V \times I \times \sin \varphi \quad (2)$$

$$\text{Daya Semu (S)} = V \times I \times \sqrt{\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi} \quad (3)$$

Dengan P = Daya Aktif (Watt), Q = Daya Aktif (VAR), S = Daya Semu (VA), V = Tegangan (Volt), I = Arus (Ampere), $\cos \varphi$ = faktor daya,

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif dengan pendekatan survey lapangan. Penggunaan metode penelitian ini bertujuan untuk mengumpulkan, mengukur, dan menganalisis data numerik dari lingkungan nyata atau lapangan untuk menguji hipotesis atau menjawab pertanyaan penelitian. Metode ini sering digunakan untuk memetakan situasi

yang ada, mengukur 1264istik1264 tertentu, serta menghasilkan 1264istik1264an yang dapat digeneralisasi ke populasi yang lebih luas. Dan perhitungan teknis. Adapun 1264istik-langkah dalam metode penelitian meliputi:

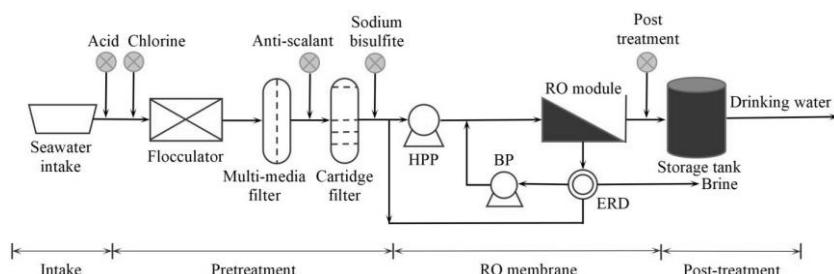
1. **Pengumpulan Data Lapangan** dimana data dikumpulkan dari SPAM SWRO Pulau Ende terkait konsumsi energi, kapasitas produksi, dan biaya operasional bulanan. Data teknis terkait perangkat 1264istik yang digunakan juga diambil dari Rencana Anggaran Biaya (RAB) dan diperbarui berdasarkan kondisi lapangan.
2. **Perhitungan Kebutuhan Daya** bertujuan untuk menganalisis kebutuhan daya 1264istik dengan memperhitungkan kapasitas 1264istik dari perangkat utama SWRO, seperti pompa feed, pompa high pressure, kompresor, dan lainnya. Perhitungan daya dilakukan dengan membagi daya aktif dengan 1264istik daya ($\cos \phi$) untuk memperoleh daya senua (KVA).
3. **Analisis Biaya Listrik dan Operasional** dilakukan untuk mengetahui perhitungan biaya 1264istik bulanan dengan menetapkan standar dan ketentuan dari **Permen ESDM Tahun 2021**, yakni menghitung biaya berdasarkan daya tersambung dan jam operasional fasilitas. Selain itu, analisis biaya perawatan juga dilakukan dengan mempertimbangkan umur perangkat dan frekuensi penggantian suku cadang
4. **Estimasi Pendapatan** merujuk pada data jumlah penduduk dan kebutuhan air harian di Desa Rendoraterua digunakan untuk memperkirakan pendapatan dari penjualan air bersih. Pendapatan dihitung berdasarkan tarif air yang berlaku dan kapasitas produksi SWRO.
5. **Analisis Keseimbangan Operasional** merupakan penghitungan dilakukan untuk menemukan jam operasional ideal yang dapat menghasilkan pendapatan yang seimbang dengan biaya operasional, atau mencapai titik impas

4. HASIL PEMBAHASAN

Analisis Kebutuhan Sea Water Reverse Osmosis

Pemasangan Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) di Pulau Ende merupakan salah satu langkah strategis pemerintah dalam mengatasi permasalahan pasokan air bersih bagi masyarakat setempat. Proyek ini diprakarsai oleh Dinas Cipta Karya dan Tata Ruang Kota Ende, yang bernaung di bawah Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR). Instalasi SWRO dimulai pada tahun 2015 dan mulai beroperasi secara penuh pada tahun 2016. Latar belakang pembangunan ini berangkat dari permasalahan utama yakni keterbatasan sumber air baku yang tersedia untuk memenuhi kebutuhan masyarakat di Pulau Ende.

Sebelum memutuskan pembangunan SWRO, berbagai solusi sempat dipertimbangkan, termasuk pemasangan pipa distribusi air. Namun, rencana ini tidak terealisasi, sehingga akhirnya diputuskan untuk membangun sistem SWRO dengan kapasitas $2 \times 2,5$ liter per detik. Instalasi SWRO ini terdiri dari beberapa komponen penting, yaitu pretreatment, pompa bertekanan tinggi (high-pressure pump/HPP), pompa pendorong (booster pump/BP), serta post-treatment. Selain itu, sistem juga dilengkapi dengan perangkat pemulihan energi (energy recovery device/ERD) untuk mengoptimalkan penggunaan tekanan hidrolik pada air asin yang diolah



Gambar 1. Schematic diagram of SWRO process.(Li et al., 2024)

Teknologi *Reverse Osmosis* (RO) merupakan metode desalinasi yang paling umum digunakan di seluruh dunia, dengan lebih dari 65% instalasi desalinasi global menggunakan teknologi ini. RO menjadi pilihan unggul karena kemampuannya untuk mengubah air payau (campuran air laut dan air tawar) atau air laut menjadi air tawar yang aman untuk dikonsumsi. Salah satu kelebihan utama dari sistem RO adalah konsumsi energi yang relatif rendah jika dibandingkan dengan metode desalinasi lainnya. Selain itu, sistem ini juga dikenal memiliki risiko korosi yang minim, sehingga perawatan alat menjadi lebih mudah. Proses penggantian komponen juga sederhana, dan instalasi RO dapat dengan mudah diintegrasikan dengan sistem pengolahan air yang sudah ada.

Prinsip kerja utama dari teknologi RO adalah proses fisik yang memanfaatkan **tekanan osmotik**. Dalam sistem ini, perbedaan tekanan osmotik antara air asin dan air tawar digunakan untuk memisahkan garam yang terkandung dalam air. Dengan menerapkan tekanan yang lebih tinggi dari tekanan osmotik air asin, air dipaksa melewati membran semi-permeabel, yang kemudian menghasilkan air murni atau air tawar. Karena tekanan hidrostatik yang digunakan melebihi tekanan osmotik larutan, air sebagai pelarut berpindah dari larutan yang kaya zat terlarut (air asin) menuju larutan yang miskin zat terlarut (air tawar). Proses ini memungkinkan teknologi RO menghasilkan air bersih yang siap untuk dikonsumsi dalam skala besar dengan efisiensi yang tinggi. Secara lebih rinci berikut merupakan data item pekerjaan SPAM SWRO yang ditampilkan pada tabel 1 sebagai berikut:

Tabel 1. Data Item Perangkat Listrik SWRO dan Listrik Gedung

NO	NAMA PERANGKAT	BRAND	DAYA	DATA DARI RAB
PERANGKAT LISTRIK SWRO				
1	Pompa High Pressure	FEDCO	56 KW	Update
2	Pompa Transfer 1	EBARA	11 KW	tetap
3	Pompa Transfer 2	EBARA	11 KW	tetap
4	Pompa Transfer 3	GRUNDFOST CMV	2.2 KW	tetap
5	Pompa CIPUF/CIP RO	CMV	5.5 KW	update
6	Pompa Feed UF	GRUNDFOST	15 KW	update
7	Pompa Backwash UF	GRUNDFOST	37 KW	update
8	Pompa submersible Sumur	GRUNDFOST	5.5 KW	update
9	Pompa Pengadaan SWRO feed		11 KW	update
10	Pompa dosing pump RO		20 w x 3, 90 w x1	update
11	Pompa dosing pump UF		370 w x 3	update
12	Pompa dosing pump UF		90 W	update
13	Kompressor	Swan	2.25 KW	tetap
14	Dray air kompresor	Swan	1 KW	tetap
PERANGKAT LISTRIK GEDUNG				
1	Lampu 10 W		43 bh	
2	Lampu 18 W		1 bh	
3	Lampu 50 W		4 bh	
4	LAMPU 1 X TL 18 W		4 bh	
5	STOP KONTAK (200W)		18 bh	
6	AC 1 PK (800W)		4 bh	Spare daya utk pengadaan kantor
7	AC 1/2 PK (400w)		2 bh	Spare daya utk pengadaan kantor
8	POMPA 125 W		2 bh	

Data hasil survey lapangan di kantor PDAM dapat diperhatikan Dari data saat survey lapangan terlihat pada item Perangkat listrik SWRO point 5, 9, 11-12 terjadi perubahan daya pada dokumen RAB dan rencana pekerjaan selanjutnya. Seperti terlihat pada tabel di atas poin no 1 sampai dengan no 14 besarnya daya didapatkan langsung dari nameplate masing – masing perangkat dan dapat dijumlahkan langsung nilai totalnya, sedangkan untuk Perangkat listrik gedung point 6 dan 7 adalah include data spare sebagai peruntukan pengadaan kedepannya untuk keperluan kantor PDAM dan petugasnya.

4.2. Analisis Kebutuhan Tenaga Listrik

Menganalisis kebutuhan tenaga Listrik bertujuan untuk mengetahui jumlah daya total yang dibutuhkan untuk mengoprasikan SPAM SWRO. Perhitungan daya semu dilakukan dengan cara membagi daya aktif dengan $\cos \phi = 0,8$.

$$\text{Daya Semu } (S) = V \times I \quad (4)$$

$$\text{Daya Aktif } (P) = V \times I \times \cos \phi \quad (5)$$

$$\text{Daya Aktif } (P) = S \times \cos \phi \quad (6)$$

$$Daya \ Semu = \frac{P}{\cos \varphi} \quad (7)$$

$$\text{Daya semu pada Pompa High Pressure} = \frac{56}{0.8} = 70 \text{ KVA} \quad (8)$$

Dengan menggunakan persamaan yang sama maka didapatkan hasil perhitungan kebutuhan Listrik pada Perangkat SWRO adalah sebagai berikut

Tabel 2. Kebutuhan Daya untuk Perangkat SWRO

NO	ITEM	DAYA AKTIF (KW)	DAYA SEMU (KVA)	Diversity (tetap hidup / total)	Daya Semu Serentak
1	Pompa Hign Pressure	56	70	1	70
2	Pompa Transfer 1	11	13.75	1	13.75
3	Pompa Transfer 2	11	13.75	1	13.75
4	Pompa Transfer 3	2.2	2.75	1	2.75
5	Pompa Feed RO/CIP RO 10 HP	5.5	6.875	0	0
6	Pompa Feed UF	15	18.75	0	0
7	Pompa Backwash UF	37	46.25	1	46.25
8	Pompa Submersible Sumur bor	5.5	6.875	0	0
9	Pompa Pengadaan SWRO feed	11	13.75	1	13.75
10	Pompa dosing pump RO 20 W X 4	0.15	0.1875	1	0.1875
11	Pompa dosing pump UF 370 WX3	1.11	1.3875	1	1.3875
12	Pompa dosing pump UF 19 W	0.09	0.1125	1	0.1125
13	Kompressor	2.25	2.8125	1	2.8125
14	Dray air kompresor	1	1.25	1	1.25
TOTAL		158.8	198.5	0.8	156.05

Hasil perhitungan pada tabel 2 dapat diperhatikan kebutuhan keseluruhan daya SWRO adalah 156.05 KVA dari perhitungan tersebut maka Daya Aktif Total untuk mengoperasikan SWRO dapat diperhitungkan dengan mengalikan total daya semu dengan cos phi 0,8 sehingga hasil perhitungan adalah sebagai berikut :

$$\text{Total Daya Aktif} = 156,05 \times 0,8 = 124,84 \text{ KVA} \quad (9)$$

Selanjutnya untuk menganalisis kebutuhan Listrik operasional Gedung menggunakan persamaan rumus yang sama sehingga kebutuhan daya Listrik Gedung adalah sebagai berikut yang diperlihatkan pada tabel 3.

Tabel 3. Kebutuhan Daya Listrik Gedung

NO	ITEM	JUMLAH (Bh)	DAYA (W)	DAYA (VA)
1	Lampu 10 W	43	430	537.5
2	Lampu 18 W	1	18	22.5
3	Lampu 50 W	4	200	250
4	Lampu 1 X TL 18 W	4	72	90
5	Stop Kontak (200w)	18	3600	4500
6	AC 1 PK (800W)	4	3200	4000
7	AC 1/2 PK (400w)	2	800	1000
8	Pompa 125 W	2	250	312.5
TOTAL		8.570	10.712,5	

Merujuk pada tabel 3 perhitungan daya listrik gedung didapat total daya aktif 8.570 W atau 8,57 KW dan total daya semu perangkat listriknya adalah sebesar 10.712,5 VA atau 10,71 KVA. Jadi kebutuhan keseluruhan daya SWRO dengan daya Gedung dengan memasukkan keseragaman atau DIversity 80% didapat sebagai berikut:

$$S = (\text{daya SWRO} + \text{daya Gedung}) \times 80\% \quad (10)$$

$$S = (198,5 \text{ KVA} + 10,7125 \text{ KVA}) \times 80\% = 167.37 \text{ KVA} \quad (11)$$

Sedangkan total daya aktifnya dikalikan dengan besarnya cos phi = 0.8 adalah

$$P = 167.37 \times 0.8 = 133.896 \text{ KW} \quad (12)$$

Jadi kebutuhan daya keseluruhan untuk pengoperasian SPAM SWRO pulau Ende memerlukan daya aktif sebesar 133.896 KW dengan daya semu adalah 167.37 KVA. Sehingga jika dibandingkan dengan item pekerjaan pada RAB terkontrak dengan pengadaan Daya sebesar 197 KVA yang ditujukan untuk melayani beban pada SWRO, gedung PDAM dan spare daya perangkat baru masih sangat aman untuk pengoperasian SWRO.

Estimasi Biaya Penggunaan Listrik pada SPAM SWRO

Hasil dari perhitungan daya aktif total perangkat SWRO pulau ende pada perhitungan kebutuhan daya Listrik didapatkan kebutuhan daya aktif sebesar 124,84 KW dan apabila diasumsikan kebutuhan kerja SWRO adalah 8 jam / hari maka perhitungan estimasi biaya didapatkan sebagai berikut:

$$\text{Kapasitas air bersih yang dihasilkan} = 5 \text{ liter/ detik} \quad (13)$$

$$\text{Jumlah total air perhari} = 5 \text{ liter / dt} \times 8 \text{ jam} \times 3600 \text{ detik/jam} = 144.000 \text{ liter} \quad (14)$$

Sesuai dengan Permen ESDM untuk Listrik daya 200 KVA dikenakan rekening minimum (RM1) dimana:

$$\text{RM 1} = 40 \text{ (jam nyala)} \times \text{Daya Tersambung} \times \text{biaya pemakaian} \quad (15)$$

Maka besarnya rekening minimum atau abonemen yang harus dibayarkan perbulan adalah

$$\text{RM 1} = 40 \times 200 \times \text{Rp. } 1.444,7 = \text{Rp. } 11.557.600,- \quad (16)$$

Hasil dari perhitungan maka minimal pembayaran Listrik bulanan yang dibayarkan adalah Rp. 11.557.600,-.

Meskipun tidak adanya pemakaian dan atau pemakaian 1 sampai dengan 40 jam, apabila operasional melebihi batas kerja 40 jam maka perhitungan disesuaikan dengan perhitungan pemakaian kWhnya. Pemakaian daya aktif dapat diperhitungkan selama 1 bulan dapat diperhitungkan dengan mengalikan jam kerja operasional dan 30 hari kerja, sehingga perhitungan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\text{Total Daya aktif} = \text{daya aktif SPAM SWRO} \times 8 \text{ jam} \times 30 \text{ hari} \quad (17)$$

$$= 124,84 \text{ KW} \times 8 \text{ jam} \times 30 \text{ hari} = 29.961,6 \text{ kWh} \quad (18)$$

Pemakaian daya sesuai ketentuan Permen ESDM untuk P-1/TR 6.600 VA - 200 KVA adalah Rp. 1.444,70/KWH, maka pelanggan akan dikenai biaya KWH sesuai dengan Besarnya rekening minimum ditambah dengan besarnya kWh kelebihan dari 40 jam (sesuai jam rekening minimum) yaitu sebagai berikut:

Pemakaian KWH selama 40 jam pertama = $40 \times 124,84 \text{ KW} = 4.993,6 \text{ KWH}$

Besarnya KWH kelebihan dari 40 jam pertama = $29.961,6 \text{ KWH} - 4.993,6 \text{ KWH} = 24.968 \text{ KWH}$

Biaya penggunaan kWh perbulan = $24.968 \text{ KWH} \times \text{Rp. } 1.444,70/\text{KWH} = \text{Rp. } 36.071.269,6$

Biaya total estimasi pembayaran rekening listrik = RM 1 + biaya penggunaan Kwh = $\text{Rp. } 11.557.600 + \text{Rp. } 36.071.269,6 = \text{Rp. } 47.628.869,6$.

Peraturan menteri ESDM per tahun 2021 yang sampai sekarang masih dipergunakan, dimana untuk daya 6.600 VA sampai 200 KVA seperti tabel tidak dikenakan penggunaan daya reaktif, namun dalam kajian ini akan dihitung besarnya penggunaan daya reaktif pada SWRO sebagai gambaran banyak sedikitnya penggunaan daya reaktif pada peralatan SWRO yang dapat menyebabkan drop tegangan dan sebagai dasar perhitungan jika suatu saat terjadi perubahan regulasi peraturan ESDM terbaru.

Biaya daya reaktif (KVAR) akan dikenakan PLN jika seandainya faktor daya jaringan instalasi listrik SWRO berada dibawah 0,85 sesuai dengan ketentuan Peraturan Menteri ESDM. Perhitungan daya aktif total perangkat SWRO Pulau Ende sesuai perhitungan sebelumnya adalah $P = 124,84 \text{ KW}$ maka daya semu yang dibutuhkan adalah

$$S = \frac{P}{\cos \phi} \quad (18)$$

$$S = \frac{124,84}{0,75} \quad (19)$$

$$S = 166,453 \text{ KVA} \quad (20)$$

Sehingga daya reaktif bisa didapatkan;

$$S = \sqrt{P^2 - Q^2} \quad (21)$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (22)$$

$$Q = \sqrt{166,453^2 - 124,84^2} \quad (23)$$

$$Q = \sqrt{27706,71 - 15585,0256} \quad (24)$$

$$Q = 110,1 \text{ kVAR} \quad (25)$$

Jadi besarnya daya reaktif yang diperlukan oleh pengoperasian SWRO pulau Ende adalah sebesar 110,1 kVAR. Jika seandainya penggunaan SWRO dalam sehari adalah 8 jam maka besar penggunaan daya reaktif dalam sebulan adalah

$$\begin{aligned} \text{Daya Reaktif} &= V \times I \times 8 \text{ jam} \times 30 \text{ hari} \\ &= Q \times 8 \text{ Jam} \times 30 \text{ hari} = 110,1 \text{ KVAR} \times 8 \text{ jam} \times 30 = 26.424 \text{ kWh} \end{aligned}$$

Jadi besar pemakaian Daya Reaktif Spam SWRO Ende dalam sebulan adalah sebesar 26.424 kWh, sedangkan Batas kVAR yang dibolehkan oleh PLN adalah pada faktor daya 0,85, jadi pemakaian kVAr yang dibatasi PLN adalah:

$$S = \frac{P}{\cos \phi} \quad (26)$$

$$S = \frac{124,84}{0,85} \quad (27)$$

$$S = 146,87 \text{ KVA} \quad (28)$$

Maka kVAR SPAM SWRO pada Cos 0,85 adalah

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)} \quad (29)$$

$$Q = \sqrt{(P^2 + S^2)} \quad (30)$$

$$Q = \sqrt{(124,84^2 + 146,87^2)} \quad (31)$$

$$Q = 77,37 \text{ KVAR} \quad (32)$$

Total batasan PLN pemakaian kVAR Penggunaan dalam sebulan (kVARH) adalah : 77,37 kVAR 9 jam x 30 hari = 20.889,9 kVARh. Jadi kelebihan pemakaian kAVRH penggunaan adalah sebesar : 26.424 kVARH - 20.889,9 kVARH = 5.534,1 kVARh

Dari perhitungan diatas didapatkan terdapatnya selisih antara tegangan reaktif yang dipersyaratkan dengan tegangan reaktif konsumsi SWRO dimana tegangan konsumsi lebih besar dibandingkan tegangan dipersyaratkan. Jika dihitung berdasarkan besaran biaya Kelebihan sebesar 5.534,1 kVARH inilah yang dibebankan oleh PLN ke pelanggan Bila tegangan pelanggan dalam kontrak diatas 200 KVA. Sehingga kalau tarif denda pemakaian kelebihan kVARH sesuai ketentuan Permen ESDM untuk P-1/TR 6.600 VA - 200 KVA adalah Rp. 1.444,70/kVARH, maka pelanggan akan dikenai denda kVARH sebesar:

$$5.534,1 \text{ kVARh} \times \text{Rp. } 1.444,70/\text{kVARh} = \text{Rp. } 7.995.114,27 \quad (33)$$

Jadi jumlah denda saja diluar pemakaian adalah sebesar Rp. 7.995.114,27 per bulan. Sehingga sesuai dengan perhitungan di atas total biaya pembayaran jika tanpa kapasitor Bank yang menimbulkan nilai faktor daya dibawah 0,85 seperti yang dipersyaratkan peraturan Menteri ESDM adalah

Biaya listrik = Biaya pemakaian daya aktif + Biaya pemakaian daya reaktif (biaya perhitungan untuk listrik dengan daya diatas 200 KVA)

$$\text{Biaya listrik} = \text{Rp. } 47.628.869,6 + \text{Rp. } 7.995.114,27 = \text{Rp. } 55.623.983,87 \quad (34)$$

Biaya di atas adalah hasil perhitungan jika listrik yang digunakan di atas 200 KVA (35)

SWRO pulau ende karena direncanakan menggunakan daya 200 KVA sesuai dengan permen ESDM seperti pada perhitungan sebelumnya hanya dikenakan biaya RM1 dan biaya pemakaian daya aktif yaitu;

$$\text{Total Biaya Listrik} = \text{Rp. } 47.628.869,6$$

Estimasi Besarnya Pendistribusian Air Bersih Hasil SWRO

Sesuai data yang didapat dari Dinas Catatan Sipil Kabupaten Ende per tanggal 30 juni 2022 didapatkan data sebagai berikut yang diperlihatkan oleh tabel 4.

Tabel 4. Data Kependudukan Pulau Ende

Kode Wilayah	Nama Wilayah	Laki-laki	Perempuan	Total Penduduk
530802	Pulau Ende	4209	4420	8629
5308022001	Aejeti	426	450	876
5308022002	Puutara	392	441	833
5308022003	Paderape	487	516	1003
5308022004	Ndoriwoi	609	614	1223
5308022005	Rorurangga	469	504	973
5308022006	Renderaterua	523	522	1045
5308022007	Redory	583	629	1212
5308022008	Kazo Kapo	348	351	699
5308022009	Renga Menge	372	393	765

Merujuk pada tabel 4 diketahui total penduduk pulau ende adalah 8629 jiwa. Daerah sementara pendistribusian PDAM Pulau Ende adalah pada Desa Renderaterua dengan jumlah penduduk sebesar 1045 jiwa. Berdasarkan acuan dari hasil pengkajian Puslitbang Permukiman Dep. Kimpraswil tahun 2010 dan Permen Kesehatan RI No.: 986/Menkes/Per/XI/1992, maka cara perhitungan total kapasitas aliran dapat dihitung berdasarkan standar tabel kebutuhan air per orang perhari

Tabel 5. Kebutuhan Air Desa Renderaterua

No.	Penggunaan Gedung	Pemakaian Air (Liter/hari)	Satuan
1	Rumah tinggal	120	Liter/penghuni
2	Rumah susun	100	Liter/penghuni
3	Asrama	120	Liter/penghuni
4	Rumah Sakit	500	Liter/tempat tidur pasien
5	Sekolah Dasar	40	Liter/siswa
6	SLTP	50	Liter/siswa
7	SMU/SMK dan lebih tinggi	80	Liter/siswa
8	Ruko/Rukan	100	Liter/penghuni dan pegawai
9	Kantor/Pabrik	50	Liter/pegawai

10	Toserba, toko pengecer	15	Liter/m ²
11	Restoran	150	Liter/kursi
12	Hotel berbintang	250	Liter/tempat tidur
13	Hotel Melati/Penginapan	150	Liter/tempat tidur
14	Gd. pertunjukan, Bioskop	10	Liter/kursi
15	Gd. Serba Guna	25	Liter/kursi
16	Stasiun, terminal	3	Liter/penumpang tiba dan pergi
17	Peribadatan	5	Liter/orang (belum dengan air wudhu)

Diasumsikan warga Redoraterua berlangganan air PDAM hanya 3/4 dari total jumlah penduduk desa Rendoraterua, maka jumlah warga yang berlangganan adalah 783,75 atau dibulatkan 784 orang. Sesuai dengan tabel di atas untuk rumah tinggal pemakaian air sebesar 120 liter per orang per hari dapat dihitung estimasi kebutuhan air bersih penduduk Desa Rendoraterua adalah Kebutuhan air = 784×120 liter/per orang/hari = 94.080 liter per hari = 94.08 kubik. Data yang didapatkan di masyarakat sekitar tentang pembelian air bersih per kubik adalah Rp. 50.000 per kubik sehingga kalau harganya disamakan maka penghasilan PDAM per hari adalah

$$94.08 \text{ kubik} \times \text{Rp. } 50.000 / \text{kubik} = \text{Rp. } 4.704.000 \quad (36)$$

Sehingga untuk 1 bulan pendapatannya adalah

$$\text{Rp. } 4.704.000 \times 30 = \text{Rp. } 141.120.000,00 \quad (37)$$

Kebutuhan produksi air sebanyak 94.08 m³ perhari, SWRO minimal harus menghasilkan air bersih sebesar kebutuhan air ditambah 20 persen (menurut Sunarno, 2005) hal ini didasarkan untuk antisipasi kekurangan air akibat kebocoran penampung air maupun instalasi.

Jadi jumlah air yang harus disediakan PDAM adalah sebesar $94.08 + (94.08 \times 20\%) = 112,896$ m³ (38)

Untuk menghasilkan air sebanyak 112,896 m³ lamanya SWRO harus beroperasi dapat dihitung seperti di bawah ini; Dimana diketahui spesifikasi perangkat SWRO dapat memproduksi air bersih dengan kapasitas 5 liter/ detik sehingga,

Lama beroperasi = Jumlah kebutuhan air / kapasitas produksi

$$\begin{aligned} &= 112,896 \text{ m}^3 / 5 \text{ L/dt} \\ &= \frac{112,896 \text{ m}^3}{18 \text{ m}^3/\text{jam}} \\ &= 6,272 \text{ jam} \end{aligned}$$

Perhitungan pengeluaran biaya listrik perbulan selama beroperasi 6,272 jam dilakukan dengan cara perhitungan yang sama seperti biaya listrik di atas. Sehingga sesuai dengan perhitungan beroperasi selama 6,272 jam perhari didapat biaya pengeluaran listrik perbulan sebesar Rp 38.279.196,52 . Estimasi pemasukan dan pengeluaran SWRO Pulau Ende adalah sebagai berikut:

Tabel 6. Estimasi Pemasukan dan Pengeluaran SWRO

ITEM	UNIT	JUMLAH
Produksi	6.272 jam / hari	94.08 m ³
Pendapatan / hari	Rp. 50.000,00/ m ³	Rp 4.704.000,00

Pendapatan / Bulan	30 hari	Rp 141.120.000,00
Biaya Listrik	6.272 jam /hari/bulan	Rp 38.279.196,52
Biaya Pegawai	1 orang	Rp. 5.000.000,00
Penghasilan SWRO	Perbulan	Rp 97.840.803,48

Dari hasil perhitungan tersebut selanjutnya adalah memperhitungkan biaya maintenance dari SWRO berikut tabel 7 merupakan estimasi biaya maintenance.

Tabel 7. Biaya Maintenance

Item	Harga Unit	Pemasangan	Estimasi Penggantian (Umur)	Harga Perbulan (Harga+Pemasangan)/ Umur
Optimalisasi/Maintenance				
Pompa Feed Uf	317,412,214.87	11,259,620.22	5 Tahun	5,477,863.92
Pompa Backwash	483,424,661.27	22,136,765.52	5 Tahun	8,426,023.78
Pompa Intake	303,777,423	7,934,161.36	5 Tahun	5,195,193.07
Pompa Cip	132,467,842.89	7,934,161.36	5 Tahun	2,340,033.40
Pompa Feed Ro	158,683,227.15	7,934,161.36	5 Tahun	2,776,956.48
Pompa Hpp	728,881,500.00	22,136,765.52	5 Tahun	12,516,971.09
Turbo Charger	287,716,934.44	11,259,620.23	5 Tahun	4,982,942.58
Microscreen	412,382,005.20	4,799,862.00	5 Tahun	6,953,031.12
Uf Membran	545,100,000.00	10,689,300.00	3 Tahun	15,438,591.67
Ro Membran	428,571,000.00	26,723,250.00	3 Tahun	12,647,062.50
Filter Cip	45,909,600.00	2,375,400.00	3 Tahun	1,341,250.00
Plc Dan Display	245,887,101.77	6,274,968.66	5 Tahun	4,202,701.17
Dosing Pump	888,888.00 × 8	888,888.00	5 Tahun	237,036.80
Lain - Lain (Instalasi Perpipaan)	121,400,664.58		3 Tahun	3,372,240.68
TOTAL				85,907,898.26

Merujuk dari tabel 7 diketahui total maintenance perbulan adalah sebesar Rp. 85.907.898,26. Biaya ini termasuk penggantian komponen sesuai dengan estimasi umur pakainya, serta pemasangan ulang jika diperlukan. Biaya perawatan ini harus diperhitungkan secara matang dalam evaluasi keberlanjutan sistem, karena efisiensi biaya maintenance akan berdampak langsung pada kemampuan SWRO untuk terus beroperasi tanpa gangguan jangka panjang.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, terdapat beberapa kesimpulan penting terkait biaya operasional, waktu operasional yang ideal, dan strategi keberlanjutan operasional sistem SWRO ini.

1. Biaya Operasional SWRO Salah satu hasil utama dari penelitian ini adalah identifikasi komponen biaya yang menjadi tantangan utama dalam keberlanjutan operasional SWRO. Komponen terbesar dari biaya operasional adalah biaya listrik, yang dihitung berdasarkan konsumsi daya aktif dan daya reaktif dari berbagai perangkat utama dalam sistem SWRO. Berdasarkan perhitungan, total biaya listrik bulanan mencapai Rp. 47.628.869 untuk operasional 8 jam per hari selama 30 hari. Biaya ini mencakup tarif dasar listrik serta biaya tambahan akibat pemakaian daya reaktif yang tidak sepenuhnya terhindarkan dalam sistem kelistrikan SWRO. Selain listrik, komponen biaya lain yang signifikan adalah biaya pemeliharaan perangkat seperti pompa feed, pompa backwash, dan pompa high-pressure, yang perlu diganti secara berkala untuk menjaga kinerja optimal sistem.
2. Estimasi Waktu Operasional Dalam penelitian ini, waktu operasional yang ideal untuk mencapai break-even point atau titik impas juga dihitung dengan mempertimbangkan biaya dan pendapatan. Dengan kapasitas produksi air sebesar 2 x 2,5 liter per detik, SWRO di Pulau Ende menghasilkan sekitar 144.000 liter air bersih setiap harinya, yang dijual dengan harga Rp. 50.000 per kubik. Dari sini, pendapatan bulanan diperkirakan mencapai Rp. 141.120.000 jika operasi berlangsung tanpa hambatan. Untuk mencapai keseimbangan antara biaya dan pendapatan, hasil penelitian menunjukkan bahwa SWRO harus beroperasi minimal 596 jam per

bulan (sekitar 20 jam per hari) agar dapat menutupi semua biaya operasional dan mencapai titik impas, tanpa keuntungan maupun kerugian.

3. Keberlanjutan Operasional SWRO Keberlanjutan operasional SWRO sangat bergantung pada efisiensi biaya operasional, terutama biaya listrik dan pemeliharaan. Berdasarkan hasil analisis, sistem SWRO di Pulau Ende memiliki potensi untuk beroperasi secara berkelanjutan dengan catatan adanya efisiensi dalam pengelolaan listrik dan pemeliharaan. Salah satu upaya yang dapat dilakukan adalah dengan mengoptimalkan penggunaan energi, termasuk pemanfaatan teknologi hemat energi atau sumber energi terbarukan seperti tenaga surya dan angin untuk mengurangi beban biaya listrik. Penggunaan energy recovery device (ERD) yang sudah diterapkan di sistem SWRO juga dapat membantu mengurangi konsumsi energi dengan memanfaatkan kembali tekanan hidrolik dalam proses desalinasi.
Selain itu, pemeliharaan yang teratur dan penggantian suku cadang tepat waktu sangat penting untuk menjaga keandalan sistem SWRO. Pemeliharaan preventif dapat mengurangi risiko kerusakan mendadak yang dapat menyebabkan peningkatan biaya perbaikan dan penurunan produktivitas.
4. Rekomendasi untuk Pengelolaan Berdasarkan temuan penelitian ini, beberapa rekomendasi diajukan untuk meningkatkan efisiensi operasional SWRO di Pulau Ende. Pertama, penting bagi pengelola untuk mengoptimalkan waktu operasional sesuai dengan kapasitas permintaan air di wilayah tersebut agar sistem dapat berjalan lebih efisien dan mengurangi pemborosan energi. Kedua, pengelolaan sumber daya manusia yang lebih efisien juga diperlukan, seperti mengalokasikan tenaga kerja sesuai dengan kebutuhan operasional sistem. Ketiga, investasi dalam teknologi tambahan seperti kapasitor bank dapat membantu mengurangi beban daya reaktif, sehingga biaya listrik dapat ditekan lebih rendah.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Kaabi, A., Al-Sulaiti, H., Al-Ansari, T., & Mackey, H. R. (2021). Assessment of water quality variations on pretreatment and environmental impacts of SWRO desalination. *Desalination*, 500(October 2020), 114831. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114831>
- Caldera, U., Bogdanov, D., & Breyer, C. (2016). Local cost of seawater RO desalination based on solar PV and wind energy: A global estimate. *Desalination*, 385, 207–216. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.02.004>
- Jafari, M., Vanoppen, M., van Agtmaal, J. M. C., Cornelissen, E. R., Vrouwenvelder, J. S., Verliefde, A., van Loosdrecht, M. C. M., & Picoreanu, C. (2021). Cost of fouling in full-scale reverse osmosis and nanofiltration installations in the Netherlands. *Desalination*, 500(July 2020), 114865. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114865>
- Li, Q., Li, K., & Yuan, C. (2024). Application Research of an Automatic Control Seawater Reverse Osmosis (SWRO) System Based on the Siemens PLC. *Global Journal of Earth Science and Engineering*, 11(86), 1–18. <https://doi.org/10.15377/2409-5710.2024.11.1>
- Missimer, T. M., & Maliva, R. G. (2018). Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. *Desalination*, 434(April 2017), 198–215. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.012>
- Sarai Atab, M., Smallbone, A. J., & Roskilly, A. P. (2016). An operational and economic study of a reverse osmosis desalination system for potable water and land irrigation. *Desalination*, 397, 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.06.020>