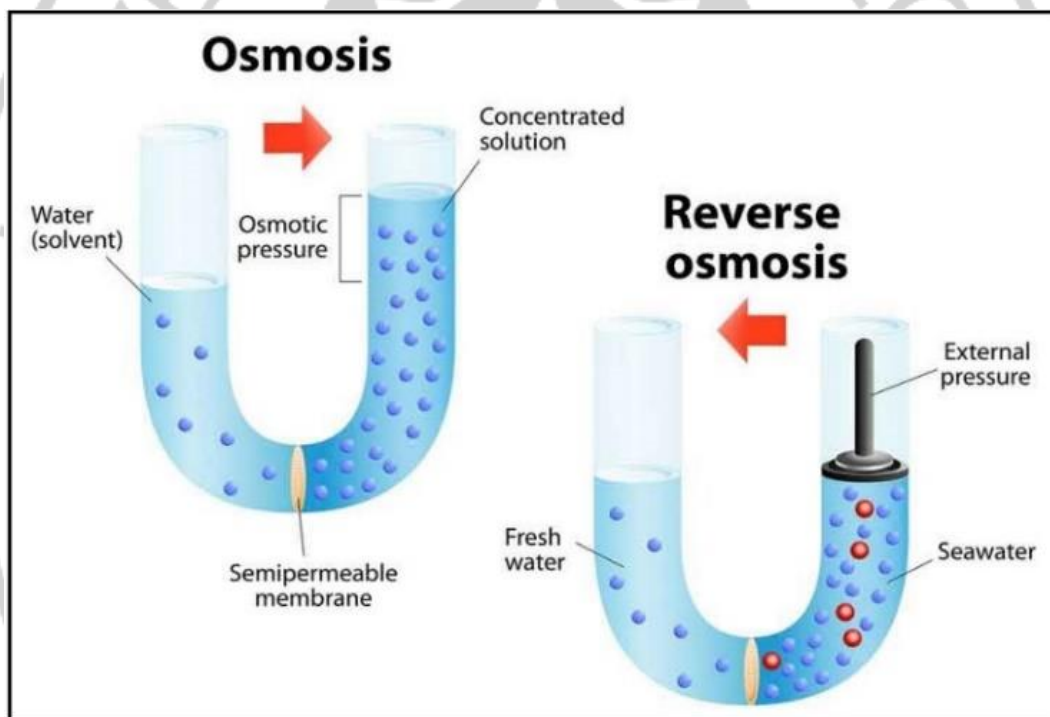


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

II.1 Gambaran umum desalinasi *Reverse Osmosis*

Desalinasi secara umum yang banyak digunakan adalah Desalinasi Proses Termal (*Thermal Desalination Process*), dan Desalinasi Proses Membran (*Membrane Desalination Process*) (Tan *et al.*, 2012). Fenomena Osmosis adalah ketika cairan dengan salinitas rendah mengalir ke arah cairan dengan salinitas yang lebih tinggi, desalinasi *Reverse Osmosis* merupakan salah satu teknologi proses konversi air dengan kandungan salinasi tinggi ke rendah dengan memanfaatkan tekanan tinggi untuk mengalirkan cairan menuju *Semi-Permeable Membrane* sehingga menciptakan aksi osmosis berlawanan (*Reverse Osmosis*) (Abdel-Fatah *et al.*, 2020).

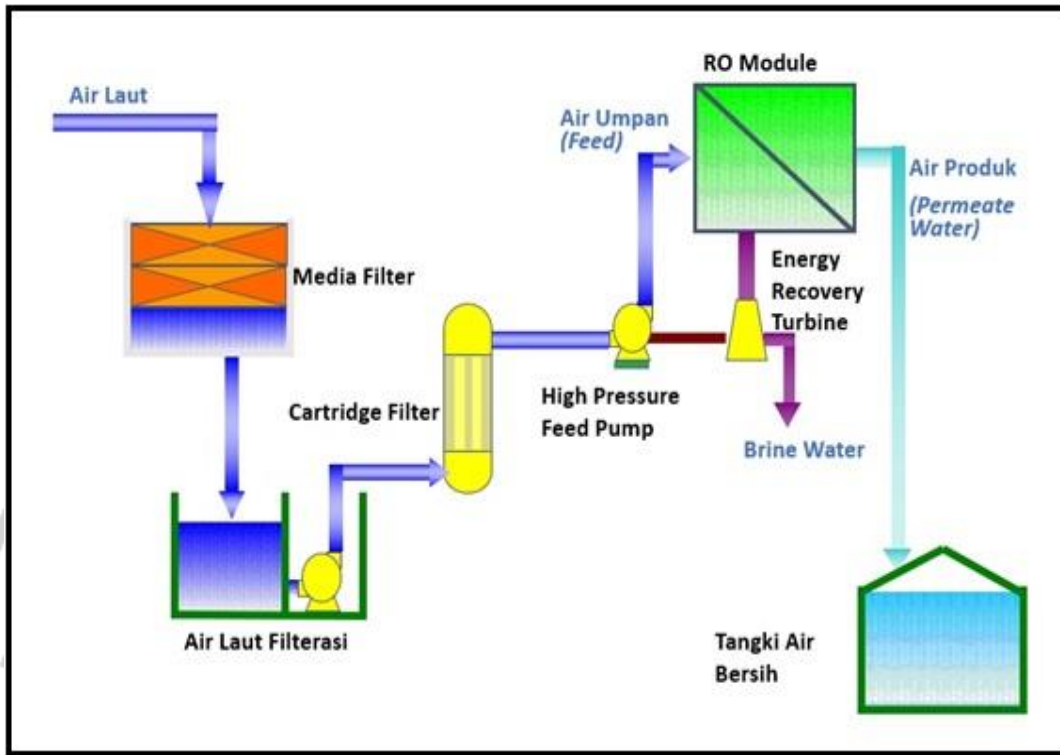


Gambar 2.1 Prinsip kerja *Reverse Osmosis*

(<https://pureaqua.com/what-is-reverse-osmosis/>)

Proses desalinasi *Reverse Osmosis* memanfaatkan air salinasi tinggi seperti air laut sebagai bahan dasar (*Raw Material*) dengan menggunakan pompa tekanan tinggi, air laut dapat dialirkan menuju *Membrane*. Berbeda halnya dengan proses penyaringan dengan filter dimana hanya ada aliran masuk dan aliran keluar sebagai produk, membrane reverse osmosis memiliki tiga aliran, aliran masuk yang biasa disebut air umpan (*Feed Water*), air produk yang biasa disebut *Permeate*

dan air buang (*Brine/ Concentrate Water*) dari rejeksi sehingga mengandung konsentrat yang tinggi.



Gambar 2.2 Diagram alir *Reverse Osmosis*

Pada gambar diagram alir diatas, air laut disaring dengan media filter sebelum dipompakan menuju filter katrid. Bahan baku kemudian di umpankan dengan pompa tekanan tinggi menuju *RO Module*, air bersih yang dihasilkan oleh *RO Module* mengalir melalui sisi *Permeate* yang kemudian ditampung pada tangki, sedangkan air rejeksi mengalir melalui sisi *Brine* menuju perangkat pemulihan energi sebelum dibuang sebagai limbah. Seperti terlihat dari Tabel 2.1 dibawah, air laut dengan salinitas tinggi $>36.000\text{mg/l}$ digunakan sebagai bahan baku, *Permeate* produk dari *Membrane Reverse Osmosis* didapatkan air bersih dengan salinitas rendah yaitu $<500\text{mg/l}$.

Tabel 2.1 Contoh parameter operasi desalinasi *SWRO*

No	Deskripsi	Tekanan (barg)	Jumlah Aliran (m^3/jam)	TDS (mg/L)
1	Air Laut	3	22	36.000

2	<i>Outlet Media Filter</i>	2	22	36.000
3	<i>Outlet Katrid Filter</i>	3	22	36.000
4	<i>p</i>			
4	<i>Outlet HP Pump</i>	51	22	36.000
5	<i>Permeate</i>	3	9	300
6	<i>Brine Inlet ERD</i>	49	13	60.000
7	<i>Brine Outlet ERD</i>	2	13	60.000

Pemanfaatan tekanan tinggi pada *Semi-Permeable Membrane* dalam *SWRO* memungkinkan air laut untuk melewati *Membrane* sementara garam dan kontaminan lainnya tertahan, menghasilkan air bersih di sisi *Permeate* dan limbah berkonsentrasi di sisi *Brine*. *Semi-Permeable Membrane* ini memiliki pori-pori sangat kecil sehingga hanya molekul air yang dapat melewati, sementara molekul garam dan kontaminan lainnya terhalang. *RO Membrane* secara umum terbuat dari bahan polimer sintesis yang memiliki sifat semipermeabel, artinya bahan yang memungkinkan air untuk mengalir melewati, disisi lain mampu menghalangi garam dan kontaminan.

Namun, proses *SWRO* membutuhkan konsumsi energi yang signifikan untuk menciptakan tekanan yang cukup untuk memaksa air melalui *Membrane*. Inilah mengapa penggunaan energi menjadi faktor kunci dalam efisiensi dan ekonomi dari proses desalinasi *Reverse Osmosis*. Untuk mengurangi konsumsi energi digunakan teknologi perangkat pemulihan energi (*Energy Recovery Devices*) *ERD*. *ERD* memanfaatkan tekanan yang dilepaskan dari limbah proses desalinasi untuk membantu memompa bahan baku air laut menuju *Membrane*. Dengan cara ini, *ERD* membantu meningkatkan efisiensi keseluruhan proses dan mengurangi biaya operasional.

II.2 Komponen Utama *Reverse Osmosis Plant*

II.2.1 Media Filter

Media filter berfungsi untuk mengurangi tingkat padatan tersuspensi (*Total Suspended Solid*) pada bahan baku air laut yang akan digunakan. *TSS* terdiri dari partikel kecil seperti lumpur, pasir, bahan organik, alga, serta mikroorganisme lainnya. Media filter, yang terdiri dari susunan filter karbon antrasit, pasir, dan batu kerikil, sangat penting untuk sistem *SWRO* karena berfungsi

sebagai tahap *Pre-Treatment* yang kritis. *Pre-Treatment* ini bertujuan untuk mengurangi beban *Fouling* pada *Membrane RO* sebelum air umpan masuk ke *Membrane RO*.



Gambar 2.3 Media Filter

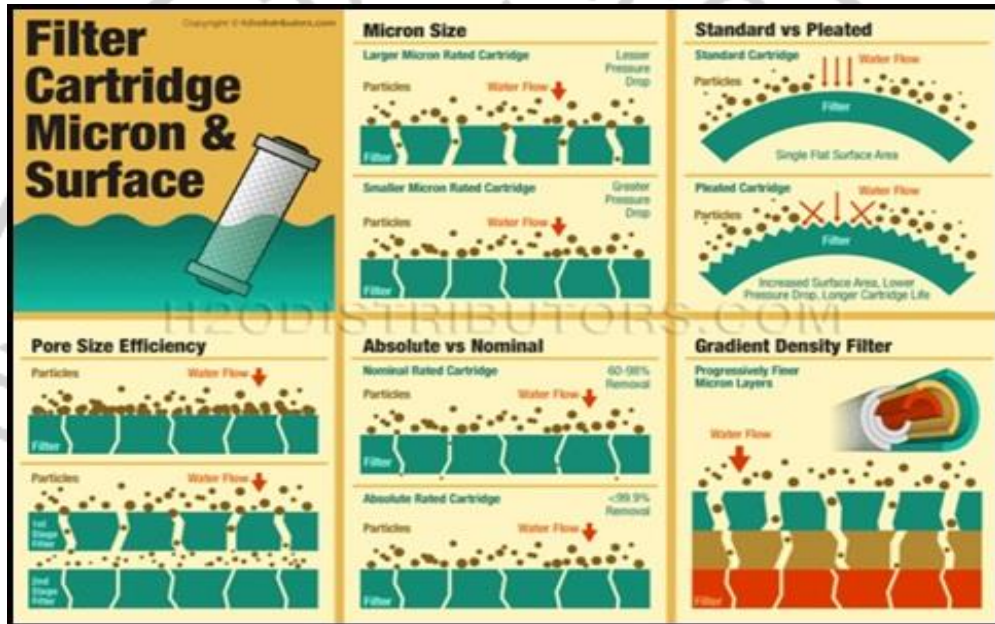
(sumber : newater.com)

Hasil filterasi dari media filter dapat diukur dengan tingkat kekeruhan air (*Turbidity*) atau dengan SDI (*Silt Density Index*). *Reverse Osmosis Membrane* membutuhkan parameter air bahan baku <1 NTU atau SDI <4 . SDI adalah parameter untuk menilai kecenderungan pengotor pada air bahan baku dalam sistem *RO*, pengukuran ini didasarkan pada waktu yang diperlukan untuk menyaring sejumlah volume air melalui saringan $0,45$ mm pada tekanan konstan $20,86$ kpa (Sim *et al.*, 2018).

Tantangan dalam pemanfaatan media filter adalah penyumbatan berupa padatan dan partikel tersuspensi. Hal ini memerlukan proses *Backwashing* yang rutin untuk membersihkan media filter dan memulihkan kapasitas filterasi. *Backwashing* yang tidak memadai dapat mengurangi efektivitas filter dan mempengaruhi kualitas bahan baku air umpan. Meskipun media filter efektif dalam menghilangkan partikel-partikel besar dan padatan tersuspensi, media filter kurang efektif terhadap kontaminan spesifik seperti bahan organik terlarut, logam berat, atau senyawa kimia tertentu. Hal ini memerlukan tahapan *Pre-Treatment* tambahan seperti koagulasi, flokulasi, atau karbon aktif.

II. 2. 2 Filter Kartrid Mikron (*Micron Cartridge Filter*)

Pompa tekanan tinggi sangat sensitif terhadap partikel padat yang dapat menyebabkan keausan dan kerusakan pada komponen internal. Filter kartrid sangat efektif dalam menyaring partikel-partikel tersebut sebelum air umpan masuk ke pompa, sehingga mencegah kerusakan mekanis. Partikel padat dalam air umpan dapat menyebabkan *Fouling* pada *Membrane SWRO & BWRO*, mengurangi efisiensi rejeksi hingga meningkatkan tekanan operasi.



Gambar 2.4 *Micron Cartridge Filter*

(Sumber: h2odistributors.com)

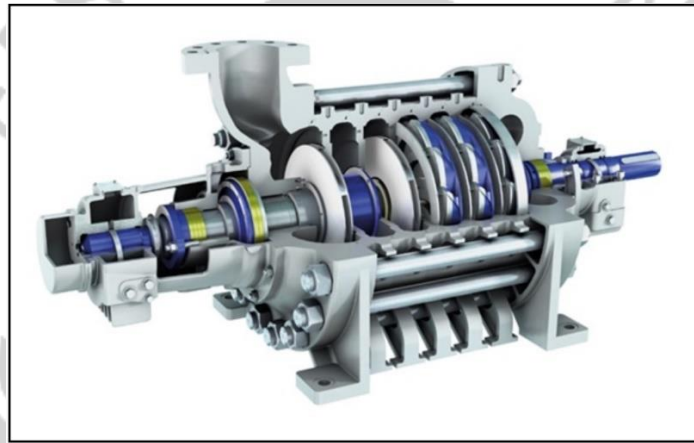
Filter kartrid berfungsi untuk menapis air dari media filter, dengan cara menyaring kotoran yang lebih besar dari ukuran penampang filter. *Reverse Osmosis Membrane* secara umum membutuhkan air yang telah disaring dengan filter 10-15 μ m mesh, dengan itu filter kartrid mengurangi jumlah partikel yang mencapai *Membrane*, sehingga mengurangi risiko *Fouling*. Dengan mengurangi *Fouling* dan kerusakan mekanis, filter kartrid membantu memperpanjang umur *Membran SWRO & BWRO*, mengurangi biaya operasional yang terkait dengan penggantian *Membrane*.

Filter kartrid ini dapat diganti dengan mudah apabila mengalami kebuntuan, biasanya terdapat standby filter cadangan apabila filter utama telah kotor. Ukuran filter yang telah

mengalami kebuntuan yang cukup tinggi adalah tingkat perbedaan tekanan masuk dan keluar (*Delta Pressure*) yang telah mencapai $>0.9\text{kg/cm}^2$.

II. 2. 3 Pompa Tekanan Tinggi (*High Pressure Pump*)

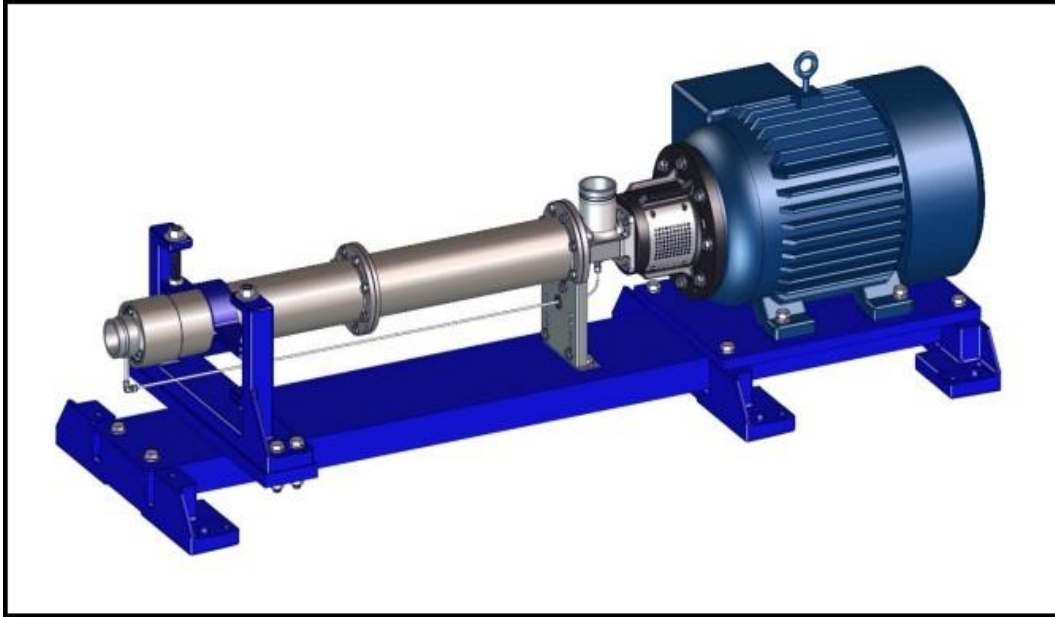
Pompa tekanan tinggi berfungsi menyalurkan air dengan tekanan 40-60 kg/cm^2 sebagai air umpan (*Feed Water*) untuk *Membrane Reverse Osmosis Element*. Jenis pompa yang secara umum digunakan adalah Pompa Sentrifugal Bertingkat (*Multistage Centrifugal Pump*). Pompa tekanan tinggi digerakkan oleh motor listrik dimana kebutuhan daya energi listrik cukup tinggi.



Gambar 2.5 *Multistage Centrifugal Pump*

(Sumber: <https://maintenanceskill.com/how-horizontal-multistage-centrifugal-pump-works/>)

Pompa tekanan tinggi adalah salah satu komponen terbesar yang berkontribusi pada *SEC* dalam sistem *SWRO*. Penggunaan energi oleh pompa tekanan tinggi secara langsung mempengaruhi total energi yang dibutuhkan untuk menghasilkan *Permeate* air bersih. Disisi lain pompa tekanan tinggi harus mampu menghasilkan tekanan yang cukup untuk mengatasi tekanan osmotik dan memungkinkan proses osmosis terbalik (*Reverse Osmosis*) pada *Semi-Permeable Membrane*. Ini berarti pompa harus dirancang untuk bekerja pada tekanan tinggi yang diperlukan oleh sistem *SWRO*.



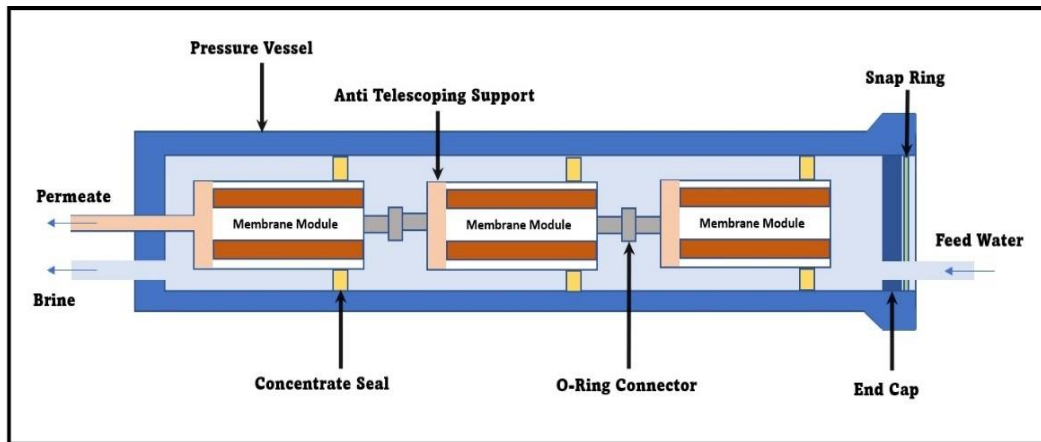
Gambar 2.6 *Multistage Centrifugal Pump, Fedco MSS Series 1500*

(Sumber: BBRI Operation & Maintenance Manual - SW-55K-2680 Reverse Osmosis System)

Keandalan pompa harus dirancang untuk operasi jangka panjang dan harus terbuat dari material yang tahan terhadap korosi dan abrasi karena bahan baku air laut mengandung garam dan partikel yang dapat merusak komponen pompa. Pemilihan dan pemeliharaan pompa yang tepat, serta integrasi dengan perangkat pemulihan energi, dapat secara signifikan mengurangi konsumsi energi dan meningkatkan efisiensi sistem desalinasi.

II. 2. 4 Reverse Osmosis Module

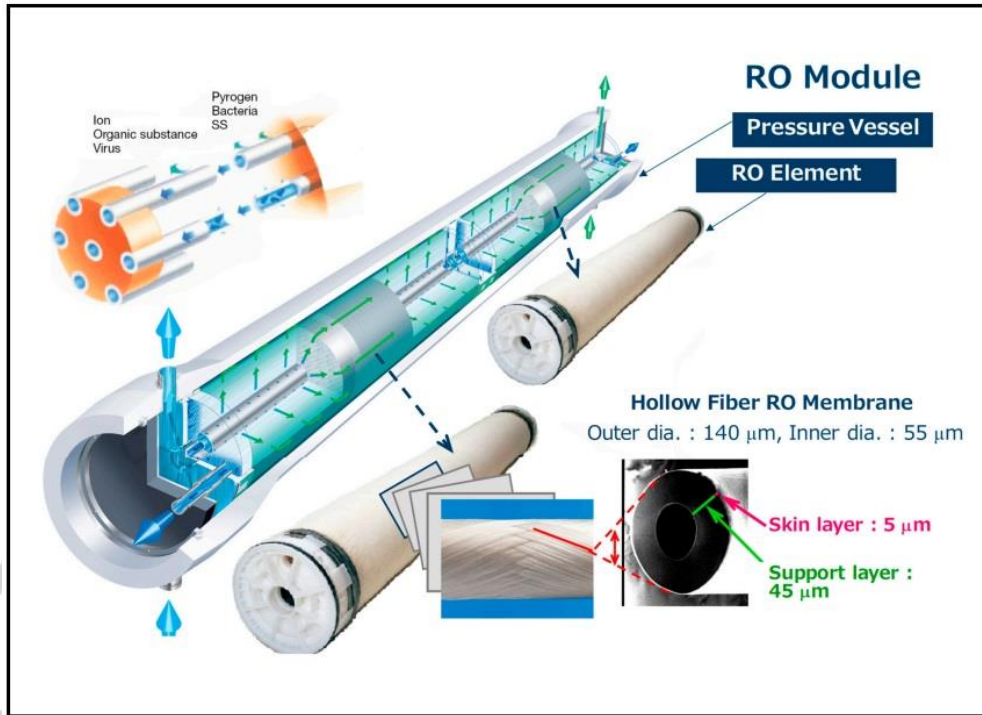
Reverse Osmosis Module/ RO Element terdiri dari bejana tekanan tinggi (*Pressure Vessel*) dan *Membrane Module*. *Pressure Vessel* terbuat dari bahan fiber FRP (*Fibre Reinforce Plastic*) atau GRP (*Glass Reinforce Plastic*) yang berbentuk silinder dan mampu bekerja pada tekanan tinggi hingga 100 barg.



Gambar 2.7 *Pressure Vessel Layout*

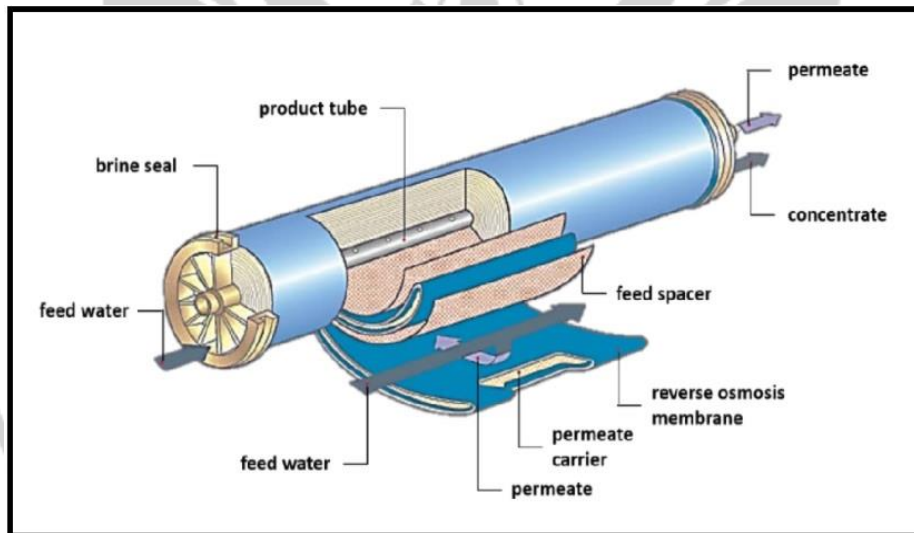
Membrane Module terletak di dalam *Pressure Vessel*, terdapat dua atau lebih unit *Membrane Module* yang terpasang pada *Pressure Vessel*. Beberapa jenis material *Membrane* yang dikenal adalah *Hollow Fiber Membrane* dan *Spiral Wound Membrane*. *Membrane* secara umum terbuat dari serat fiber *Cellulose Tri Acetate* atau *Composite Polyamide*. Salah satu keuntungan dari *Membrane Cellulose Tri Acetate* adalah lebih tahan terhadap klorin daripada *Membrane Composite Polyamide*. Namun, *Membrane Composite Polyamide* jauh lebih efisien dan unggul dalam kinerja secara keseluruhan dibandingkan dengan membran *Cellulose Tri Acetate* (Nakao *et al.*, 2021).

Luas penampang dari *Membrane* berbeda beda tergantung dari pabrikan dan kebutuhan. Ukuran luas permukaan ini dibutuhkan untuk mengukur *Flux*. Terdapat banyak brand merk *Membrane*, misalkan jenis *RO Membrane Dow Filmtec BW30-365* Jenis *RO Membrane* elemen ini memiliki luas permukaan 365sq/ft^2 setara dengan $33,9\text{m}^2$. *SWRO & BWRO* PT. BBRI masing-masing menggunakan *Membrane* merk Hydranautic SWC-6 Max & Hydranautic ESPA2-LD *Spiral Wound, Composite Polyamide* 8 inchi, terdapat enam (6) *RO Membrane* elemen dengan masing masingnya memiliki luas permukaan 440ft^2 setara dengan $40,8\text{m}^2$.



Gambar 2.8 Struktur *Membrane Hollow Fibre*

(Sumber: Nakao *et al.*, 2021)

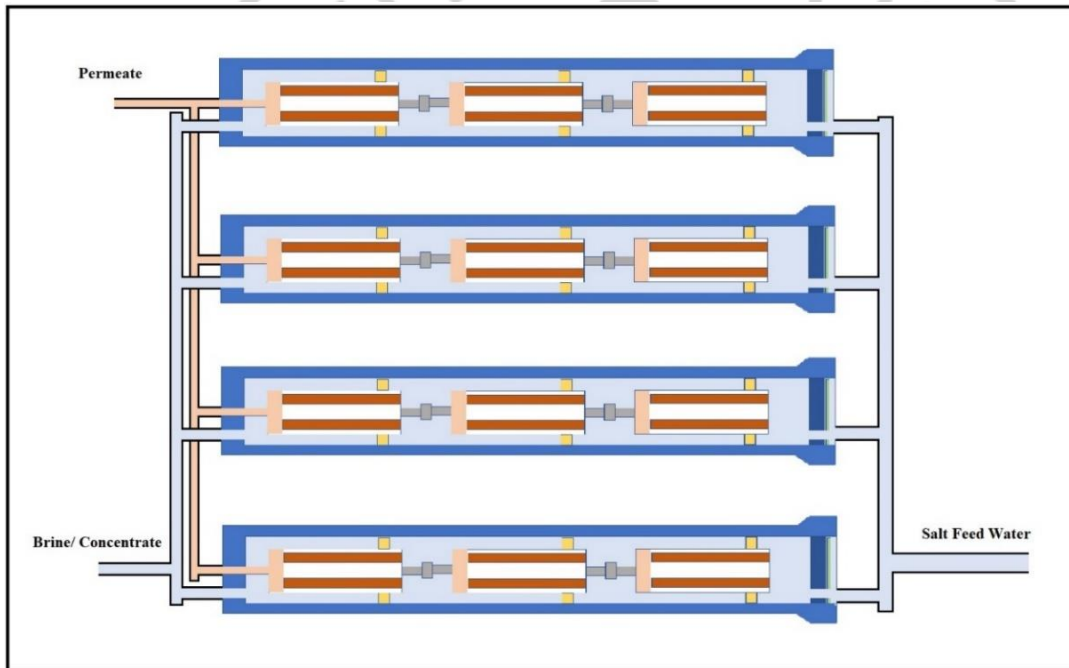


Gambar 2.9 Struktur *Membrane Spiral Wound*

(Sumber: <https://www.toyobo-global.com/seihin/ro/tokucho.htm>)

Elemen *Membrane Spiral Wound* seperti selubung yang dililitkan di sekitar tabung dengan lubang di mana air *Permeate* keluar. Elemen *Membrane Spiral Wound* bekerja berdasarkan prinsip

filtrasi aliran silang. Tidak seperti filtrasi satu arah di mana hanya ada aliran umpan dan produk, filtrasi aliran silang memiliki tiga aliran; aliran umpan (*Feed*), produk (*Permeate*), dan konsentrat rejeksi (*Brine*). Filtrasi aliran silang tidak pernah dapat dioperasikan pada 100% *Recovery* karena selalu harus memiliki 3 aliran. Jika dioperasikan pada 100% *Recovery*, maka hanya ada aliran umpan dan *Permeate* dan tidak ada aliran konsentrat/rejeksi. Jumlah *Pressure Vessel* dalam sistem *RO* berpengaruh signifikan terhadap distribusi aliran dan tekanan, efisiensi energi, pemeliharaan, umur *Membrane*, kapasitas produksi, dan kualitas air hasil.



Gambar 2.10 Susunan *Pressure Vessel RO Bank*

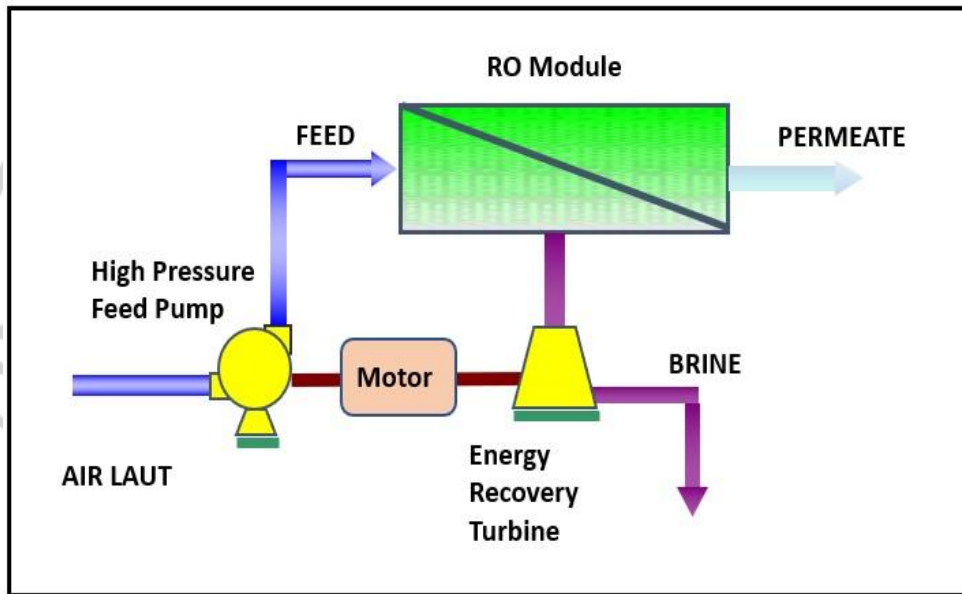
Dengan lebih banyak *Pressure Vessel*, sistem dapat beroperasi lebih efisien, dengan tekanan dan aliran yang lebih merata, yang membantu mengurangi beban pada setiap *Membrane*, memperpanjang umur operasional, dan meningkatkan kualitas *Permeate* produk air. Namun, desain yang tepat dan pengelolaan yang baik sangat penting untuk memastikan bahwa sistem dengan jumlah *Pressure Vessel* yang optimal dapat berfungsi dengan efisien dan andal.

II. 2. 5 Perangkat Pemulihan Energi (*Energy Recovery Device*)

Bahan baku berupa *Filtered Water* disalurkan dengan tekanan tinggi sebagai air umpan yang masuk pada sisi *Feed RO Module*, pada sisi *Brine* air rejeksi yang mengandung konsentrat tinggi mengalir dalam jumlah aliran yang besar dan tekanan tinggi, energi kinetik dari aliran rejeksi

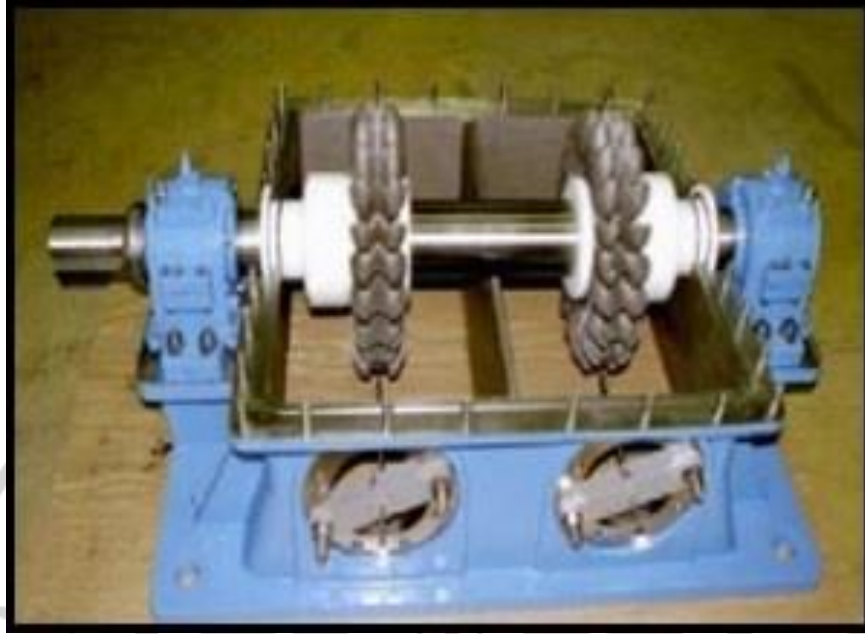
ini dapat dimanfaatkan untuk menunjang pengoperasian. Pada prinsipnya perangkat pemulihan energi pada *Reverse Osmosis* unit mengkonversi *Hydraulic Energy* menjadi *Mechanical Energy* baik berupa *Piston Movement* atau *Centrifugal Turbine Movement*. Terdapat beberapa jenis *Energy Recovery Device* diantaranya *Turbine Energy Recovery*, *Turbocharger Energy Recovery*, & *Pressure Exchanger Energy Recovery Device* (Schunke *et al.*, 2020).

- *Energy Recovery Turbine*



Gambar 2.11 Skema *RO Energy Recovery Turbine*

Perangkat pemulihan energi yang memanfaatkan rotasi sentrifugal turbin untuk mengubah energi kinetik aliran *Brine Water* menjadi energi mekanis sentrifugal dengan alat konversi energi berupa *Pelton Wheel Turbine*. Energi mekanis dari *Pelton Wheel Turbine* digunakan bersama sama dengan motor sebagai penggerak *High Pressure Pump*, sehingga daya motor sebagai penggerak mula menjadi lebih ekonomis karena berkurangnya konsumsi energi listrik, transfer energi kinetik dari aliran ke turbin dilakukan melalui interaksi antara aliran dan *Bucket* yang berputar. Dari sudut pandang ekstraksi energi maksimum pada *ERD* untuk unit *RO*, kecocokan pengoperasian dengan pompa tekanan tinggi adalah perhatian utama (Sani., 2019).

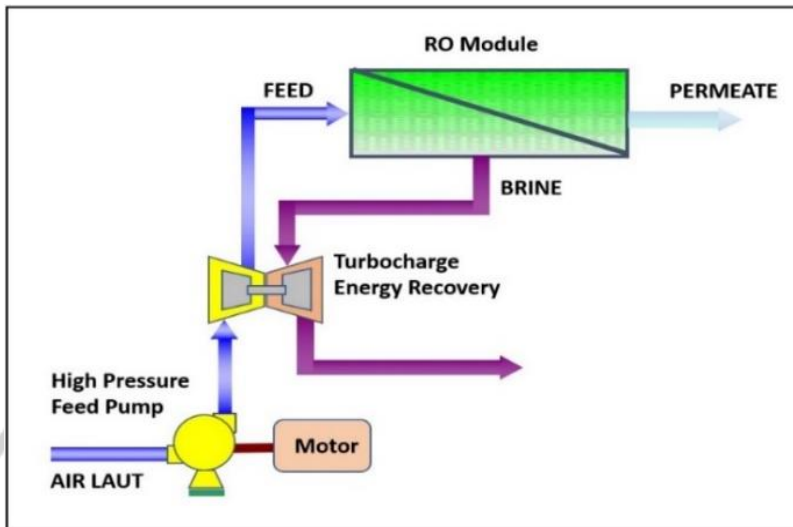


Gambar 2.12 *ERD Pelton Wheel Turbine*

(Sumber: <https://www.flowserve.com/en/products/products-catalog/energy-recovery-devices/centrifugal-devices/energy-recovery-turbines-ert/>)

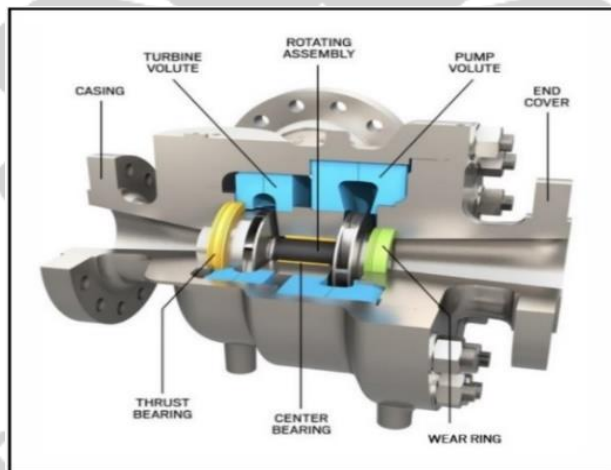
Efisiensi seluruh komponen *ERD* turbin pelton berkisar dari 70% hingga 90%. Efisiensi transfer energi dari jenis *ERD* ini adalah produk dari efisiensi nozel (99%), turbin (85%-90%) dan *HPP* sentrifugal (75%-85%). Kesimpulannya, peak efisiensi *ERD* turbin pelton dapat diperkirakan sekitar 85-90% (Peñate *et al.*, 2011). *ERD Turbocharger* biasanya digunakan pada desalinasi *Reverse Osmosis* dengan jumlah aliran yang besar, sehingga *Brine* rejeksi yang diperoleh mampu untuk mengkonversi aliran menjadi energy mekanis.

- *Turbocharger Energy Recovery*



Gambar 2.13 Skema RO ERD Turbocharger

Perangkat pemulihan energi ini juga memanfaatkan energi kinetik dari aliran *Brine Water* kemudian mengkonversikannya secara mekanis untuk menggerakkan pompa *Booster* pada yang poros yang terhubung. *Feed Water* dari *High Pressure Pump* kemudian terbantu mengalir air. Unit pemulihan energi bekerja secara seri dengan pompa bertekanan tinggi untuk mengurangi konsumsi energi sistem dengan mengurangi tekanan keluar dari pompa tekanan tinggi (Huang *et al.*, 2020).

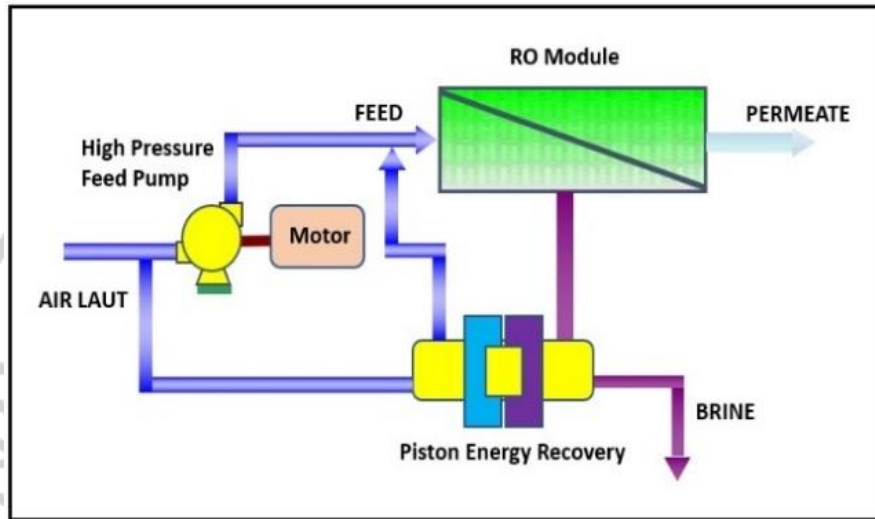


Gambar 2.14 ERD Turbocharger

(Sumber: <https://energyrecovery.com/water/turbochargers/>)

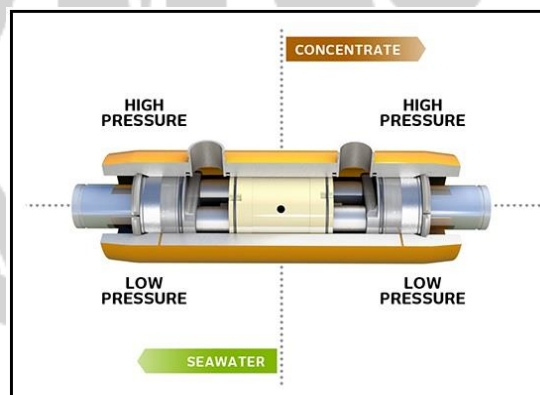
- *Energy Recovery Piston/ Pressure Exchanger*

Sama halnya dengan pemulihan energi *Turbine Movement*, *Piston Movement* mengubah aliran energi kinetik *Brine Water* menjadi energi mekanis, hanya saja dengan gerak mekanis berupa *Vertical* atau *Horizontal*. Perangkat pemulihan energi ini dikenal juga sebagai *Clark Pump* (Zhang *et al.*, 2022)



Gambar 2.15 Skema RO ERD Pressure Exchanger

Efisiensi *ERD* dapat diketahui dengan mengkalkulasikan perubahan tekanan umpan dibagi dengan perubahan tekanan konsentrat, untuk berbagai tipe *ERD* diketahui bahwa efisiensi Turbocharge sebesar 80%, Pelton Wheel 85%, sedangkan Pressure Exchanger sekitar 95-97%.



(Schunke *et al.*, 2020).

Gambar 2.16 ERD Pressure Exchanger

(Sumber: <https://energyrecovery.com/about-us/our-technology/>)

Perangkat pemulihan energi secara signifikan mengurangi *Specific Energy Consumption* dalam sistem desalinasi. Dengan mengimplementasikan teknologi perangkat pemulihan energi,

efisiensi sistem meningkat, biaya operasional menurun, dan dampak lingkungan dari proses desalinasi dapat diminimalkan. Oleh karena itu, pemulihan energi merupakan aspek penting dalam desain dan operasi sistem desalinasi yang berkelanjutan.

II. 2. 6 Tangki Penampungan Air Bersih (*Storage Tank*)

Tangki digunakan untuk penampungan bahan baku yang telah disaring dengan media filter, tangki penampungan produk SWRO, tangka air untuk proses flushing, dan tangki penampungan bagi final product berupa air tawar. Tangki penampungan dapat terbuat dari material stainless steel, carbon steel, ataupun plastik. Dari tangki penampungan, air dikirim ke rumah warga maupun fasilitas umum dengan menggunakan pompa.

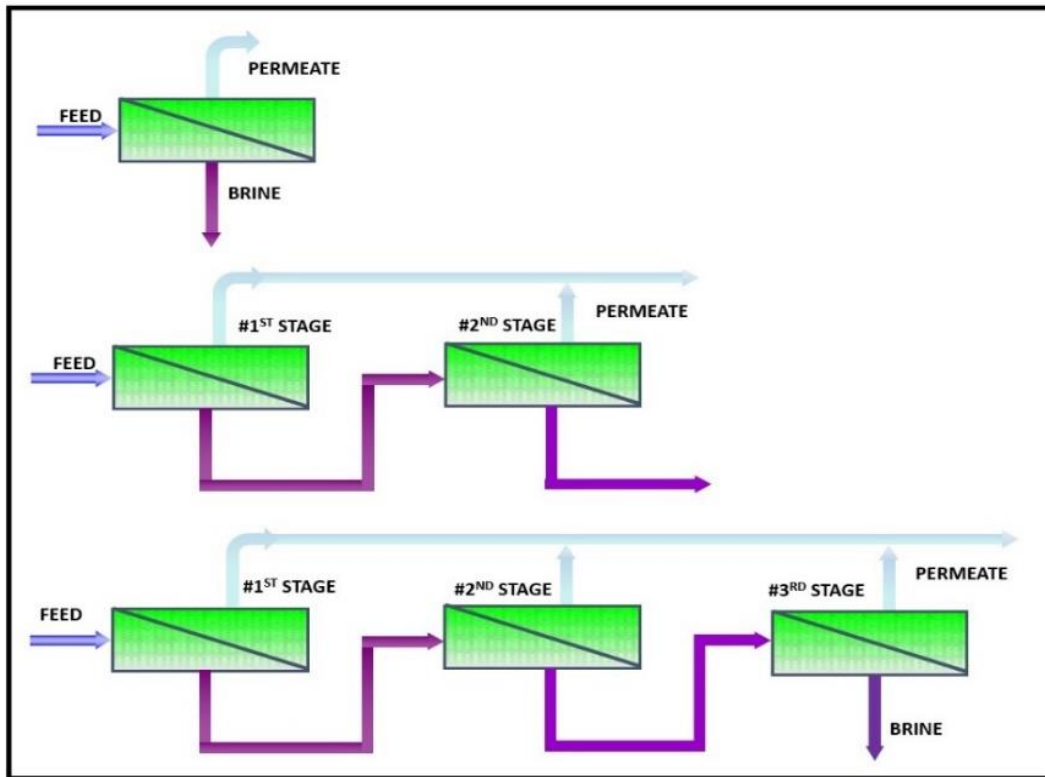


Gambar 2.17 Tangki penampungan air bersih
(Sumber: <https://penguin.id/general-tank-industrial/>)

II.3 RO Array & Beberapa Design RO Bank

RO Array adalah beberapa set *RO Element* yang tersusun secara parallel sehingga membentuk sebuah *RO Bank*, terdapat beberapa design *RO Bank* yang kemudian membentuk

beberapa tingkatan (*Stage*). Semakin banyak jumlah *RO Element* dalam *RO Bank*, akan menentukan kapasitas produksi sebuah pabrik desalinasi.



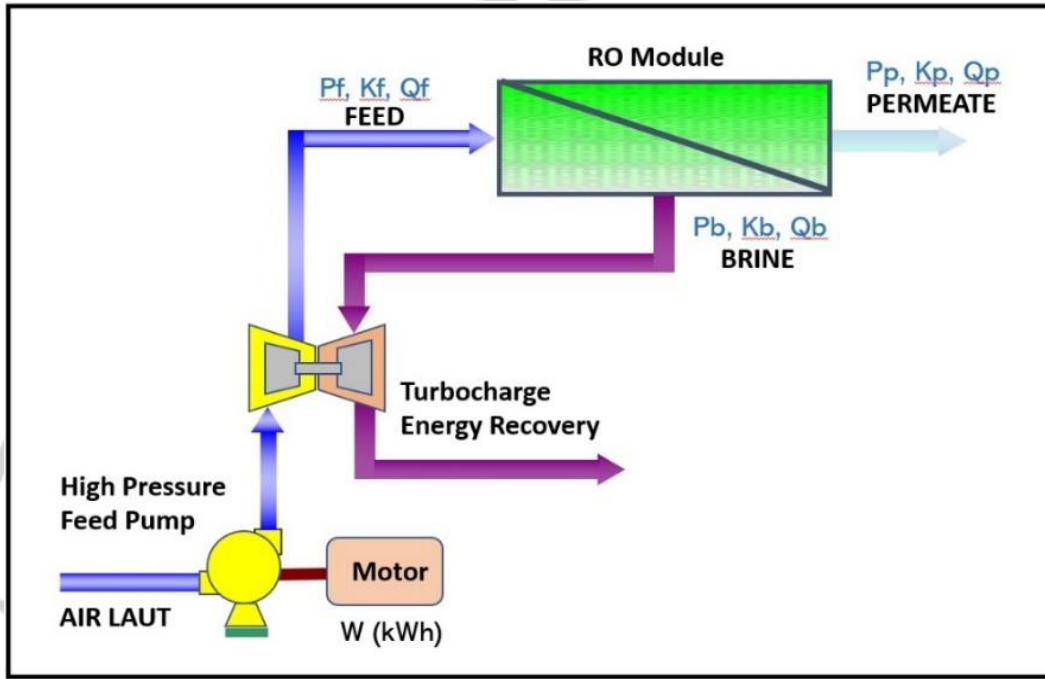
Gambar 2.18 Konfigurasi *RO Array Multi Stage*

Sistem *RO* bertingkat menawarkan manfaat signifikan dalam hal peningkatan *Recovery Rate*, efisiensi energi, peningkatan kualitas *Permeate* produk, dan fleksibilitas operasional. Namun, implementasinya juga menghadapi tantangan terkait dengan kompleksitas desain dan operasi, biaya investasi awal yang lebih tinggi, kebutuhan pemeliharaan yang lebih intensif, dan resiko *Fouling* serta *Scaling* yang disebabkan karena konsentrasi *Brine* rejeksi dari tingkat pertama memiliki konsentrasi garam dan kontaminan yang lebih tinggi,

II.4 Analisa kinerja *Reverse Osmosis*

Pengoperasian dan kinerja desalinasi *RO* bervariasi seiring dengan perubahan kualitas bahan baku. Selain itu, saat sistem *RO* beroperasi pada akhirnya akan terdapat kotoran atau material yang mengendap. Untuk memahami bahwa perubahan dalam kinerja sistem dan mengaitkannya dengan perubahan umpan atau pengendapan, data operasional sangat dibutuhkan.

Mayoritas desalinasi *Reverse Osmosis* biasanya akan beroperasi dengan hasil yang konsisten dalam jangka waktu yang lama jika parameter operasi (terutama kualitas bahan baku) tetap konstan. *Fouling* akan terjadi secara perlahan, dan kerusakan *Membrane* dapat dihindari.



Gambar 2.19 Skema RO ERD Turbocharger

Ketika parameter operasi seperti suhu, salinitas bahan baku, jumlah aliran *Permeate*, dan *Recovery Rate* berubah secara fluktuatif, pengotoran *Membrane* dan air umpan terhadap elemen dapat terjadi. Data operasi nantinya memungkinkan operator untuk membandingkan operasi di bawah kondisi yang berbeda untuk satu set referensi kondisi. Hal ini memungkinkan untuk menentukan apakah perubahan aliran atau rejeksi disebabkan oleh pengotoran, kerusakan pada *Membrane*, atau hanya karena kondisi pengoperasian yang berbeda.

Tabel 2.2 Poin data kinerja RO

No	Poin Parameter	Unit	Abbreviasi	Sample	Sample Data
				Data Awal	Lanjutan
1	Waktu	Jam	-	08.00	09.00
2	Suhu	°C		18	20
3	Tekanan Air Umpan (<i>Feed Water Pressure</i>)	barg	P_f	51	51

4	Salinitas Air Umpan (<i>Feed Water Conductivity</i>)	TDS mg/L	K_f	36.000	36.000
5	Aliran Air Umpan (<i>Feed Water Flow</i>)	m ³ /jam	Q_f	22	22
6	Tekanan Rejeksi (<i>Reject Pressure</i>)	barg	P_b	50.9	50.8
7	Salinitas Rejeksi (<i>Reject Conductivity</i>)	TDS mg/L	K_b	>60.000	>60.000
8	Aliran Rejeksi (<i>Reject Flow</i>)	m ³ /jam	Q_b	13	13.2
9	Tekanan Permeate (<i>Permeate Pressure</i>)	barg	P_p	3	2.9
10	Salinitas Permeate (<i>Permeate Conductivity</i>)	TDS mg/L	K_p	350	400
11	Aliran Permeate (<i>Permeate Flow</i>)	m ³ /jam	Q_p	9	8.7
12	Motor Load	kWh	W	0	4

II.4.1 Recovery Rate & Concentration Factor

Recovery Rate adalah presentasi jumlah aliran produk dibandingkan dengan aliran masuk, rendahnya persentasi *Recovery Rate* menandakan terjadi permasalahan pada membrane, yang mungkin disebabkan *Fouling* atau *Scaling*, dan apabila *Recovery Rate* melebihi angka design pabrikasi, ada kemungkinan terjadi kerusakan pada membrane, *Recovery Rate* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2.1) sedangkan *Concentration Factor* (2.2) adalah perbandingan jumlah aliran masuk dibandingkan aliran rejeksi. Dengan aliran rejeksi membrane

yang tinggi maka angka *Concentration Factor* menurun, angka *Concentration Factor* yang rendah memberikan informasi tingginya kadar garam konsentrat pada aliran *Brine*.

$$Recovery Rate = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100 \dots\dots\dots (2.1)$$

$$Concentration Factor = \frac{Q_b}{Q_f} \dots\dots\dots (2.2)$$

Tabel 2.3 Hubungan antara Recovery Rate dan Concentration Factor

No	Recovery Rate	Concentration Factor
1	50%	2
2	75%	4
3	87,5%	8
4	90%	10

Ketika *Recovery Rate* meningkat, *Concentration Factor* juga meningkat, yang dapat mengarah pada beberapa implikasi operasional, seperti meningkatnya *Fouling* pada *Membrane*, peningkatan tekanan osmotik yang dibutuhkan, dan potensi penurunan efisiensi konsentrasi rejeksi. Oleh karena itu, optimalisasi kedua parameter ini adalah kunci untuk mencapai kinerja sistem *Reverse Osmosis* yang efektif dan efisien (Valdés, H., et al., 2021)

Penelitian yang dilakukan oleh (Wang, Y., et al., 2020) menunjukkan bahwa dengan mengoptimalkan susunan modul *Membrane* dan pola aliran umpan, efisiensi sistem *Reverse Osmosis* dapat ditingkatkan secara signifikan, yang mengarah pada peningkatan *Recovery Rate*. Ini penting untuk pengelolaan sumber daya air yang lebih efisien dan pengurangan limbah cair dalam proses desalinasi.

II.4.2 Jumlah Alir Flux

Laju fluks adalah parameter yang sangat penting untuk dipertimbangkan dalam desain desalinasi RO. Laju fluks dapat mempengaruhi pengotoran organik, biologis dan koloid dari membran RO, karena pengotoran ini didorong ke permukaan membran. Laju fluks juga berdampak pada aliran rejeksi, yang pada akhirnya berdampak pada faktor konsentrasi dan dengan demikian menyebabkan terjadinya potensi *Scaling* pada RO. Oleh karena itu injeksi bahan kimia *Antiscalant* digunakan sebagai pencegahan. Menghitung rata-rata alir flux (2.3) dapat dilakukan dengan

melihat spesifikasi membrane pabrikan seperti yang telah disebutkan, SWRO PT. BBRI menggunakan membrane merk Hydranautic SWC-6 Max, Spiral Wound, Composite Polyamide 8 inchi yang memiliki luas permukaan 440ft² setara dengan 40,8m². Terdapat 12 buah *Membrane* pada dua buah *Module Element*. Berikut contoh perhitungan flux apabila flow permeate diketahui 99 LPM.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Total Permeate Flow} & (Q_{pH}) \\
 \text{Total Permukaan Membrane} & (St) \\
 \text{Average System Flux} = \frac{Q_{pH}}{St} & \dots\dots\dots (2.3)
 \end{array}$$

Penurunan jumlah alir fluks baik untuk *SWRO* maupun *BWRO* dapat mengindikasikan beberapa masalah yang terjadi dalam sistem tersebut seperti, *Fouling* dan *Scaling* pada *Membrane*, kerusakan kompaksi atau penyusutan *Membrane* (Davenport, *et al.*, 2018), dan penuaan pada *Membrane*. Untuk mengatasi penurunan nilai fluks, tindakan yang dapat dilakukan antara lain *Chemical Cleaning* secara berkala, penggantian *Membrane* jika kerusakan parah, optimalisasi kondisi operasional, dan pemantauan kinerja *Membrane* secara rutin. Pemantauan fluks *Membrane* merupakan indikator penting untuk mendeteksi masalah dalam sistem *Reverse Osmosis* dan melakukan tindakan perbaikan yang tepat (Ahmed, M. A., *et al.*, 2023).

II.4.3 Persentasi Rejeksi RO (*Reject Percentation*)

Untuk mengetahui desalinasi *Reverse Osmosis* berjalan dengan baik, maka perlu diketahui berapa persen kemampuan desalinasi tersebut mengeliminasi salinitas yang terkandung dalam bahan baku air laut. Angka Persentase Rejeksi (2.4) (*Percent Rejection*) digunakan untuk hal tersebut, berikut persamaan untuk menghitung *Percent Rejection*:

$$\text{Percent Rejection} = \left(1 - \left(\frac{K_p}{K_f} \right) \right) \times 100 \dots\dots\dots (2.4)$$

Hasil perhitungan persentase rejeksi memberikan informasi penting seberapa efektif *RO Membrane* menghilangkan kontaminan. Angka ini merupakan hasil perhitungan keseluruhan dari sebuah sistem *Membrane* elemen, bukan angka individu. Sebagaimana diketahui pada sistem *SWRO & BWRO* BBRI terdapat 6 *Membrane* dalam sebuah *Pressure Vessel*. Semakin tinggi persentase rejeksi, semakin baik kinerja dari *Membrane* elemen, menurunnya persentasi rejeksi

mengindikasikan meningkatnya *Salt Passage*, sehingga dibutuhkan perawatan berupa *Chemical Cleaning* atau penggantian *Membrane*.

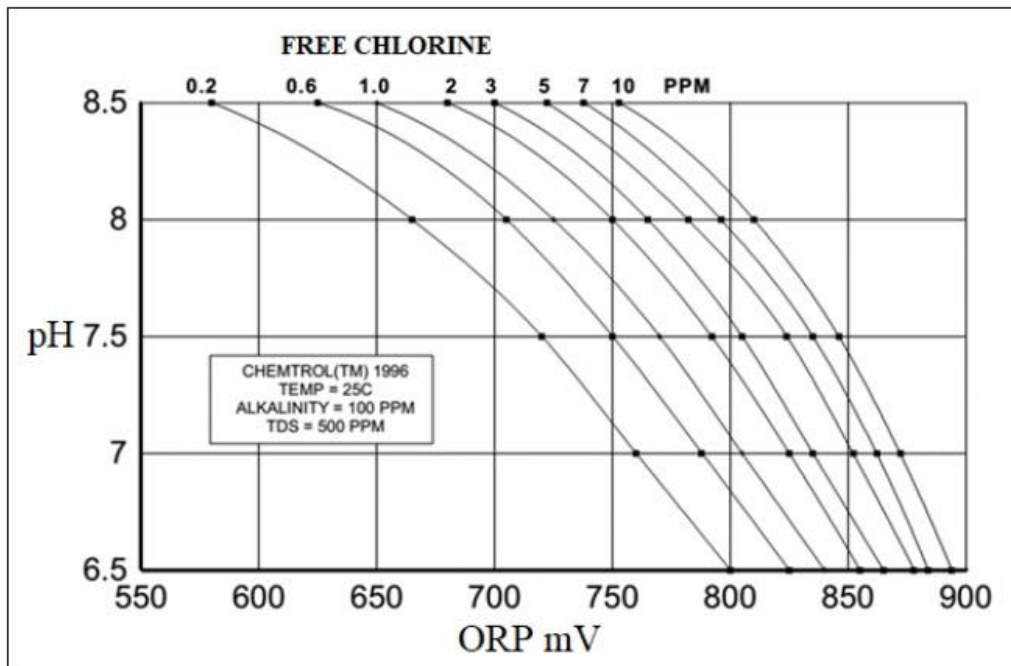
II.4.4 Konsentrasi Rejeksi (*Reject Concentration*)

Dengan mengetahui nilai konsentrasi rejeksi membantu dalam menilai seberapa efektif *RO Membrane* dalam menghilangkan kandungan garam pada air umpan. Tingkat rejeksi yang tinggi menunjukkan kinerja *Membrane* yang baik, penurunan konsentrasi rejeksi secara mendadak menandakan terdapat masalah seperti *Fouling* atau *Scaling* yang memungkinkan operator untuk mengambil langkah perbaikan. Untuk mengetahui nilai konsentrasi salinitas (2.5) pada sisi rejeksi/ brine (*Reject Concentration*) dapat dilakukan apabila *Concentration Factor* (2.2) dan salinitas air laut diketahui, berikut persamaan yang digunakan:

$$\text{Reject TDS (Kb)} = CF \times Kf \dots\dots\dots (2.5)$$

Mikro organisme yang melalui permukaan *Membrane* dapat menyebabkan *Fouling* (Sebagaimana apabila material organik lainnya menghalangi permukaan *Membrane*) yang kemudian berkembang biak dan menyebabkan terbentuknya lapisan *Biofilm*. Ketika *Biofilm* terbentuk pada lapisan *RO Membrane* maka hal inilah yang akan menurunkan kinerja *SWRO*, untuk itulah injeksi bahan kimia berupa klorin dibutuhkan agar proses kembang biak mikro organisme dapat dihentikan (Nakao *et al.*, 2021).

Biological Fouling pada teknologi desalinasi *Membrane RO* disebut sebagai "*The Achilles Heel*" (Titik terlemah dari sebuah kekuatan) hal ini dikarenakan *Membrane* dengan material *Polyamide* sangat rentan terhadap residu klorin. *Bio-Fouling* meningkatkan biaya pengoperasian karena membutuhkan tekanan *Feed* yang lebih tinggi akibat tahanan *Biological Growth*, meningkatkan frekuensi *Membrane Chemical Cleaning* yang juga meningkatkan *Downtime* serta mengurangi *Life Time* dari *Membrane*. (Hoek *et al.*, 2022)



Gambar 2.20 Tabel hubungan *ORP*, klorin bebas & pH

Kinerja *Membrane* sangat dipengaruhi oleh bahan baku umpan dalam hal ini air laut, karakteristik kontaminan biologis dari biota laut merupakan salah satu pengotor yang dapat mengganggu kinerja *Membrane* hingga menyebabkan *Biological Fouling*. Injeksi klorin digunakan untuk mengatasi *Biological Growth*, tetapi injeksi yang berlebih sangat berbahaya bagi *Membrane Polyamide*. Berdasarkan Manual Book PT. BBRI, *Membrane SWRO* Hydranautic SWC-6 Max dan Hydranautic ESPA2-LD, mencantumkan *Maximum Allowable Chlorine Concentration* sebesar <0.1ppm. Terdapat bahan kimia deklorinasi untuk mengurangi jumlah kadar klorin. Pemanfaatan alat ukur (*Oxygen Reduction Potensial*) *ORP Analyzer* digunakan untuk mengetahui jumlah kadar *Free Chlorine* sebelum masuk menuju *Membrane*. Hubungan antara *ORP*, pH dan jumlah *Free Chlorine* dapat dilihat pada Gambar 2.20.

II.4.5 Perbedaan Tekanan (*Differential Pressure*)

Perbedaan tekanan (*Differential Pressure*) yang dimaksud adalah perbandingan tekanan air umpan (*Feed Water*) dan tekanan *Brine* rejeksi (2.6). Perbedaan tekanan yang optimal memastikan bahwa *Permeate* produk air bersih dihasilkan dengan efisiensi tinggi. Jika perbedaan tekanan terlalu rendah, proses *Reverse Osmosis* tidak efektif, mengakibatkan kualitas air *permeate* yang buruk dan penurunan *Recovery Rate*.

$$\text{Differential Pressure } (\Delta P) = P_f - P_b \dots \dots \dots (2.6)$$

Perbedaan tekanan yang tepat juga membantu meminimalkan *Fouling* pada permukaan *Membrane*. Tekanan yang terlalu tinggi dapat meningkatkan risiko *Fouling* karena partikel padatan tersuspensi lebih mudah terjebak di *Membrane*. *Scaling* pada *Membrane* juga dipengaruhi oleh perbedaan tekanan. Jika tekanan terlalu tinggi, konsentrasi garam pada permukaan *Membrane* meningkat, meningkatkan risiko *Scaling*. Pemantauan perbedaan tekanan membantu menjaga keseimbangan yang optimal untuk mencegah masalah ini (Hoek, *et al.*, 2022)

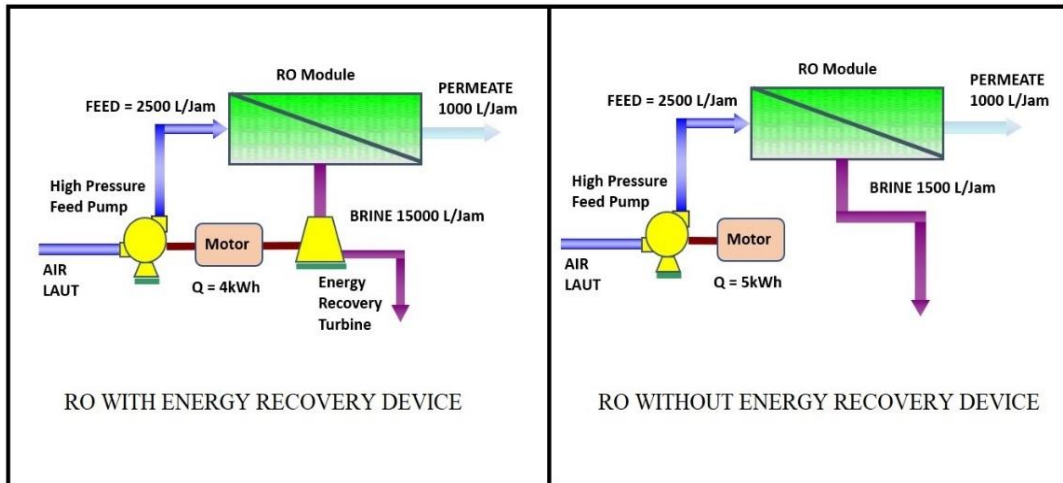
Jika tekanan *Feed* terlalu tinggi dibandingkan dengan tekanan *Brine*, sistem akan beroperasi dengan *SEC* yang lebih tinggi, mengindikasikan bahwa energi digunakan secara tidak efisien. Memantau dan mengendalikan perbedaan tekanan antara *Feed* dan *Brine* sangat penting untuk memastikan efisiensi energi dalam sistem RO. Perbedaan tekanan antara *Feed* dan *Brine* adalah indikator kinerja yang penting. Perubahan mendadak atau abnormal dalam perbedaan tekanan dapat menunjukkan masalah operasional, seperti *Fouling*, *Scaling*, kerusakan *Membrane*, atau masalah mekanis pada pompa (Yaqub, *et al.*, 2022).

II.5 Konsumsi Energi Spesifik (*Specific Energy Consumption*)

Dalam sistem *SWRO* dibutuhkan energi yang cukup besar dibandingkan *BWRO*. Hal ini disebabkan oleh tingginya salinitas air laut, sehingga untuk mencapai tekanan osmotik yang diperlukan oleh *Membrane* dibutuhkan tekanan yang besar. Sejumlah besar energi dihabiskan untuk mencapai tingkat tekanan yang diperlukan, yang kemudian menjadi *Brine* rejeksi setelah proses berlangsung. Hal ini menunjukkan bahwa energi yang terbuang bersama *Brine* rejeksi, yang juga berada pada tekanan tinggi harus dibuang sebagai limbah.

Oleh karena itu sistem pemulihan energi sangat dibutuhkan untuk mendaur ulang limbah *Brine* rejeksi sehingga konsumsi energi dalam proses produksi desalinasi dapat diturunkan. Dari hal ini, kinerja desalinasi *RO* dapat dilihat, semakin rendah konsumsi energi maka semakin baik dari sisi ekonomi. Konsumsi energi spesifik (*Specific Energy Consumption*) *SEC* dalam kWh/m³ air produk, adalah parameter terpenting yang mengindikasikan kinerja proses desalinasi, terutama dari sudut pandang keberlanjutan proses secara keseluruhan. Berikut perhitungan *SEC* secara sederhana dalam persamaan (2.7):

$$SEC_{RO} = \frac{W_{total}}{Q_p} \dots \dots \dots (2.7)$$



Gambar 2.21 Perbandingan *SEC RO With and Without ERD*

SEC dalam pengoperasian desalinasi dipengaruhi oleh berbagai faktor mulai dari penggunaan motor tiga fasa sebagai penggerak pompa hingga desain sistem, *Pre-Treatment*, efisiensi *Membrane*, dan perangkat pemulihan energi. Memahami dan mengoptimalkan setiap kontributor ini sangat penting untuk meningkatkan efisiensi energi, mengurangi biaya operasional, dan memaksimalkan kinerja sistem desalinasi secara keseluruhan (Schunke *et al.*, 2020). Berikut tabel penggunaan sejumlah beban pada *RO Plant* PT. BBRI.

Tabel 2.4 Profil beban *SWRO & BWRO*

No	Deskripsi	Unit	Kapasitas	Tipe
1.	Pompa air laut	kW	30	Sentrifugal
2	Pompa Umpan <i>SWRO</i>	kW	5	Sentrifugal
3	<i>SWRO</i> HP Pump	kW	37	Sentrifugal Bertingkat
4	Pompa Umpan <i>BWRO</i>	kW	1.1	Sentrifugal
5	<i>BWRO</i> HP Pump	kW	5.5	Sentrifugal
6	Pompa Injeksi Klorin	kW	0.5	Diapghram
7	Pompa Injeksi De-klorinasi	kW	0.5	Diapghram
8	Pompa Injeksi Anti Skalant	kW	0.5	Diapghram
9	PLC Controller	W	100	PLC
10	Backwash Pump	kW	4	Sentrifugal

Proses *SWRO* termasuk dari energi intensif, untuk meminimalkan konsumsi energi spesifik (*SEC*) dari proses, kinerja sistem sangat penting untuk dipantau secara *Real-Time*. Karena

perubahan kualitas air laut dan kondisi cuaca yang berubah secara berkala memerlukan penyesuaian terus menerus untuk meminimalkan konsumsi energi dan mengoptimalkan penggunaan bahan kimia sehingga persyaratan kualitas air produk terpenuhi. (Yousry *et al.*, 2022) Sebagai perbandingan, studi analisa kinerja terkait *SEC* telah dilakukan di *SWRO* Irigasi Gran Canaria, dengan *ERD* menggunakan *Pelton Turbine*, angka rata rata *SEC* sebesar *4kWH*, dari studi ini juga diketahui perubahan *SEC* sangat dipengaruhi perubahan tekanan umpan dari *HP Pump*. (Leon *et al.*, 2021)

II.5.1 Motor Listrik

Motor listrik adalah alat untuk mengkonversi energi listrik menjadi energi mekanik. Dalam operasinya efisiensi dari motor listrik dipengaruhi oleh umur, kapasitas, putaran, tipe, temperatur, rewinding, dan beban kerja motor listrik. Efisiensi motor sendiri dapat didefinisikan sebagai perbandingan keluaran daya motor yang digunakan terhadap keluaran daya totalnya. Untuk menghitung efisiensi pada sebuah motor listrik dapat dilakukan dengan persamaan (2.8) sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P} \times 100\% \dots\dots\dots (2.8)$$

η : Effisiensi operasi motor

P_{out} : Daya keluar (Watt)

P : Daya motor (Watt)

Daya motor dapat diketahui dengan mengukur nilai tegangan, arus, dan power faktor. Untuk menentukan daya dapat dilakukan dengan persamaan sebagai berikut:

$$P = \frac{V \times I \times pF \times \sqrt{3}}{1000}$$

P : Daya motor tiga fasa (kW)

V : Nilai tegangan terukur (Volt)

I : Nilai arus terukur (Ampere)

pF : Faktor daya dalam decimal

$\sqrt{3}$: Akar kuadrat 3, dalam motor daya 3 fasa merupakan panjang sisi ketiga segitiga yang kedua sisi lainnya memiliki panjang 1 dan jaraknya 120 derajat.

Selanjutnya untuk mengetahui daya keluar motor maka perlu paramater tegangan, arus listrik, power faktor, dan efisiensi motor tersebut. Maka untuk menentukan nilai daya keluar motor tiga fasa dapat menggunakan persamaan (2.9):

$$P_{out} = \frac{V \times I \times pF \times \eta}{1000} \dots\dots\dots (2.9)$$

- P_{out} : Daya keluar motor (kW)
- V : Nilai tegangan terukur (Volt)
- I : Nilai arus terukur (Ampere)
- pF : Faktor daya dalam desimal
- η : Effisiensi motor pada name plate

Kemudian untuk mencari nilai energi listrik yang digunakan, dapat dicari melalui persamaan (2.10) sebagai berikut :

$$W = P \times T \dots\dots\dots (2.10)$$

- P : Daya motor tiga fasa (kW)
- T : Waktu (Jam)



Gambar 2.22 BWRO Feed Pump with Vertical Driven Motor

(Sumber: BBRI Operation & Maintenance Manual - SW-55K-2680 Reverse Osmosis System)

SEMARANG