

Studi Kemampuan Desalinasi Air Laut Menggunakan Sistem *Sea Water Reverse Osmosis (SWRO)* pada Kapal Pesiar

Artia Anandea Ragetisvara dan Harmin Sulistiyaning Titah

Departemen Teknik Lingkungan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya (ITS)

e-mail: harminsulis@gmail.com

Abstrak—Industri kapal pesiar merupakan industri penting pada sektor transportasi laut dalam dunia maritim, yang berperan sebagai bisnis pariwisata bersifat kompleks. Perkembangan industri kapal pesiar diiringi oleh perkembangan teknologi pada kapal, salah satunya berupa teknologi desalinasi air laut untuk menghasilkan air tawar. *Reverse Osmosis (RO)* merupakan salah satu sistem dalam teknologi desalinasi yang seringkali dipergunakan untuk memenuhi persediaan air tawar pada kapal. Pengaplikasian sistem RO sangat dibutuhkan mengingat besarnya kebutuhan air tawar dan untuk mencukupi kebutuhan air tawar. Kinerja RO bergantung pada kualitas air laut sebagai sumber air bakunya. RO bekerja dengan memanfaatkan tekanan osmosis. Adanya tekanan hidrostatik yang lebih besar dari tekanan osmotik dimanfaatkan untuk membalikkan aliran, sehingga menghasilkan air tawar. RO memanfaatkan proses pompa bertekanan tinggi untuk mengalirkan air laut melewati struktur polimer membran. Pada RO terdapat konfigurasi modul membran utama yang memiliki dua fungsi, yaitu mendukung kinerja membran RO dan menyediakan manajemen fluida yang efisien. Dalam studi kasus yang berada pada Pelabuhan Palma, berlokasi di Kota Palma (Mallorca, Kepulauan Balearic, Spanyol) menunjukkan bahwa pada pelabuhan tersebut terjadi peningkatan penarikan air tawar oleh kapal pesiar. Kapal pesiar mengisi ulang kebutuhan air tawar setiap berlabuh, sehingga aktivitas kapal pesiar menjadi ancaman bagi ketersediaan air di pulau tersebut. Penanganan permasalahan kebutuhan air tawar pada kapal pesiar adalah dengan diaplikasikannya sistem RO pada kapal. RO mampu memasok kebutuhan air dengan debit produksi yang dibutuhkan, yakni sebesar 32,25 m³/jam. Rangkaian sistem RO disusun berdasarkan kualitas air laut yang digunakan sebagai air baku. Disamping sistem RO, dibutuhkan pula pengolahan air limbah termasuk pengolahan *brine effluent* atau *RO Concentrate (ROC)* sebagai produk samping dari RO.

Kata Kunci—Air Tawar, Konfigurasi Modul Membran *Reverse Osmosis (RO)*, Membran RO, Sistem RO, Teknologi Desalinasi.

I. PENDAHULUAN

KETERSEDIAAN air dalam jumlah besar sangatlah penting bagi kesejahteraan makhluk hidup [1]. Total ketersediaan air di bumi diperkirakan sebesar 1.385.984 km³ dengan kandungan air tawar berjumlah 35.029 km³ [2], dimana hanya terdapat ± 2,5% air tawar di bumi [1]. Sebelum memasuki abad ke-20, kebutuhan air tawar dalam skala dunia berjumlah kecil. Setelah adanya pertumbuhan penduduk hingga tingginya tingkat industrialisasi, permintaan air pun turut mengalami peningkatan. Tantangan muncul saat memasuki abad ke-21, yakni pengelolaan air tawar untuk memenuhi dan menyeimbangkan kebutuhan masyarakat, kebutuhan ekosistem, hingga untuk mendukung keperluan rumah tangga serta industri [3]. Dalam hal ini, air tawar berperan penting dalam segala kegiatan manusia [4].

Industri kapal pesiar merupakan salah satu industri yang menempati posisi penting pada dunia maritim, terutama sektor transportasi laut [5]. Kapal pesiar merupakan salah satu komponen inti dalam bidang pariwisata [6], yang berfungsi dan menyediakan fasilitas hotel resor mewah [5]. Di antara tahun 2011- 2016, permintaan kapasitas penumpang kapal pesiar pada pelayaran laut dunia mencapai 23% [7], sedangkan antara tahun 2016- 2020 terjadi peningkatan lebih besar, yakni 27% [8]. Keberadaan aktivitas kapal ditunjukkan dengan kegiatan penarikan air tawar oleh kapal pesiar pada Pelabuhan Palma yang terletak di Kota Palma (Mallorca, Kepulauan Balearic, Spanyol). Kegiatan penarikan air tersebut mengalami peningkatan di setiap tahunnya, sehingga aktivitas kapal pesiar dapat menjadi ancaman bagi ketersediaan air di pulau tersebut [9].

Perkembangan industri pelayaran kapal pesiar tentunya diiringi oleh perkembangan teknologi pada kapal [10]. Salah satu perkembangan teknologi yakni teknologi desalinasi air laut untuk menghasilkan air tawar. Teknologi desalinasi yang banyak diterapkan adalah sistem *Reverse Osmosis (RO)* [11]. RO dirancang untuk mencukupi kebutuhan air tawar, yang seringkali diterapkan pada pelayaran jarak jauh kapal. RO menggunakan proses pemompaan bertekanan tinggi untuk mengalirkan air laut melewati membran, yang berfungsi memisahkan atau menghilangkan zat terlarut dalam air [12]. RO merupakan proses difusi terkendali yang mengendalikan transfer massa zat terlarut sehingga dapat melewati struktur polimer membran [13]. Difusi air tawar menuju air laut melewati membran semipermeabel dipengaruhi oleh daya atau tekanan osmosis. Adanya pengaruh tekanan yang lebih besar dari tekanan osmosis menyebabkan aliran air tawar berbalik arah, yaitu dari air asin ke air tawar. Tekanan osmosis dipengaruhi oleh karakteristik jenis membran, temperatur, konsentrasi garam (Salinitas), dan senyawa yang terlarut dalam air (TDS) [14].

RO efektif dalam mendegradasi konsentrasi TDS hingga 45.000 mg/L [15]. Karakteristik membran, sifat fisikokimia sistem, dan variabel operasi berpengaruh dalam kinerja RO [16]. Pada RO, konfigurasi modul membran utama yang digunakan berupa *spiral wound*. Modul lainnya berupa *hollow fiber*, *tubular* dan *plate and frame* [17]. Umumnya membran dalam RO dirancang secara seri atau sejajar menggunakan sistem satu tahap hingga multi tahap [13].

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka diperlukan kajian mengenai kemampuan jenis-jenis membran dan penentuan jenis membran terbaik yang akan digunakan pada desalinasi air laut menghasilkan air tawar menggunakan sistem RO, terutama untuk kebutuhan air tawar di kapal pesiar.

II. METODE PENULISAN

Metode kajian dalam penulisan terbagi dalam 2 tahap pelaksanaan, yaitu kajian literatur dan studi kasus. Kajian literatur dilakukan untuk memperoleh referensi serta meningkatkan pemahaman. Kajian akan berkaitan dengan kinerja sistem RO, juga pengaplikasian sistem RO dalam desalinasi air laut pada kapal pesiar. Jenis sumber literatur yang dipelajari meliputi jurnal nasional dan internasional, *textbooks*, thesis, disertasi, laporan tugas akhir, dan Peraturan Pemerintah (PP). Studi kasus terletak pada Pelabuhan Palma, berlokasi di Kota Palma (Mallorca, Kepulauan Balearic, Spanyol). Pada pelabuhan tersebut terjadi peningkatan penarikan air tawar oleh kapal pesiar. Kapal pesiar mengisi ulang kebutuhan air tawar setiap berlabuh, sehingga aktivitas kapal pesiar menjadi ancaman bagi ketersediaan air di pulau tersebut. Dengan permasalahan tersebut maka dilakukan analisis aplikasi sistem RO sebagai desalinasi air laut pada kapal pesiar, yang didapatkan dari data sekunder, kemudian dianalisis dengan kajian pustaka yang telah dipelajari.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kriteria Air Umpan/ Feed Water (Air Laut)

Instalasi *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) memiliki dua macam pilihan untuk sumber air umpan, yakni: Sumur air laut atau *seawater wells* (Sumur pantai) dan air permukaan atau *surface water* (Intake air laut terbuka). Dikarena tingginya penggunaan RO dan perancangan instalasi RO dengan kapasitas lebih besar, maka sumur pantai tidak selalu mampu menyediakan air umpan yang cukup, maka pengambilan air laut dari laut terbuka merupakan satu-satunya pilihan sumber air umpan [18].

Kandungan (*Total Dissolved Solids*) TDS dapat bervariasi, dimulai dari Laut Baltik dengan kandungan 7.000 mg/L hingga Laut Merah dan Teluk Arab mencapai 45.000 mg/L [19]. Namun standar air laut mengandung TDS \pm 35.000 ppm pada suhu 25°C dan memiliki tekanan osmotik normal \pm 26,7 kg/cm² [14]. Rincian standar komposisi air laut menurut ^a[19], ^b[20] dapat dilihat pada Tabel 1.

B. Teknologi Desalinasi

Desalinasi adalah proses dimana air payau atau air laut diolah menjadi air yang dapat dimanfaatkan. Desalinasi merupakan solusi untuk memenuhi kebutuhan air tawar, dimana sumber daya air tawar bersifat langka [21]. Desalinasi merupakan proses penjernihan air payau atau air laut dengan total padatan terlarut dalam batas yang diizinkan dan dapat diminum, yaitu 200- 500 ppm atau < 500 ppm [22], [23]. Desalinasi menjadi sumber penting dalam produksi air minum, dimana proses desalinasi termal telah berkembang selama 60 tahun terakhir dan proses membran berkembang selama 40 tahun terakhir [18]. Terdapat tiga cara desalinasi dengan distilasi, yaitu: *Multi stage flash distillation* (MSF), *multiple effect distillation* (MED) dan *vapor compression* [14], [24]. Proses filtrasi terbagi menjadi: RO, Elektrodialisis (ED) [14], dan *Nanofiltration* (NF). Terdapat pula teknologi desalinasi baru seperti *nano membranes* dan *membrane distillation* (MD) [24].

Teknologi RO mendominasi atas teknik desalinasi lainnya (Gambar 1). Terdapat sebesar 55- 70% instalasi RO [25],

Tabel 1.
Standar Komposisi Air Laut

Ion	Konsentrasi (mg/L)
Calcium ^a	410 ^a
Magnesium ^a	1.310 ^a
Sodium ^a	10.900 ^a
Potassium ^a	390 ^a
Barium ^a	0,05 ^a
Strontium ^a	12 ^a
Iron ^a	< 0,02 ^a
Manganese ^a	< 0,01 ^a
Silica ^a	0,04- 8 ^a
Chloride ^a	19.700 ^a
Sulfate ^a	2.740 ^a
Fluoride ^a	1,4 ^a
Bromide ^a	65 ^a
Nitrate ^a	< 0,7 ^a
Bicarbonate ^a	152 ^a
Boron ^a	4- 5 ^a
Other	
TDS ^a	35.000 mg/L ^a
pH ^a	8,1 ^a
Turbidity ^b	3- 15 NTU ^b



Gambar 1. Kapasitas dan kontribusi teknologi desalinasi global berdasarkan setiap proses.

atau sebesar 65% instalasi RO dari total kapasitas terpasang di seluruh dunia. Sekitar 20- 25% [25] atau sebesar 21% adalah proses MSF [26], [24] dan 5- 15% [25] atau sebesar 7% adalah MED [26], [24]. Terdapat pula teknologi ED sebesar 3- 5% [25], sedangkan sisanya merupakan teknologi desalinasi lainnya.

MED umumnya memiliki kapasitas berkisar antara 600- 36.000 m³/hari [26] atau 600- 91.000 m³/hari [27]. Kebutuhan energi MED 2- 3 kali lebih besar dari RO dan energi MSF 3- 4 kali lebih besar dari RO. Besarnya energi dikarenakan proses penguapan MED dan MSF membutuhkan energi listrik dan panas, sedangkan RO hanya menggunakan energi listrik. MED bekerja dimana air murni dipisahkan dari air umpan dengan cara penguapan [26]. MED lebih rentan terhadap *scaling* dibandingkan MSF [28].

MSF merupakan metode *flash evaporation* dalam vakum, dimana vakum berubah dari satu tahap ke tahap berikutnya dan suhu penguapan menurun dari tahap pertama ke terakhir [27]. MSF dirancang dengan kapasitas dimulai dari 50.000- 75.000 m³/hari. Proses MSF didasarkan pada prinsip penguapan kilat dengan mengurangi tekanan akibat kenaikan suhu. Elemen MSF proses meliputi tahap *flashing* yang dibagi antara bagian pemulihan dan penolakan panas untuk mengontrol suhu air laut masuk dan untuk menolak kelebihan panas pada pemanas air garam [29]. MSF dan MED dapat digunakan di atas kapal pesiar hingga 900 m³/hari/unit, dimana penggunaan teknologi MSF mendominasi [28]. Dikarenakan besarnya volume yang dibutuhkan dan ruang yang tersedia di kapal sangat terbatas,

maka diperlukan teknologi yang lebih ringkas [30].

ED merupakan teknologi berbasis membran yang beroperasi karena adanya gradien listrik beda potensial listrik [24]. Pada penerapan arus listrik, ion negatif dan positif dipindahkan menuju elektroda masing-masing berdasarkan polaritasnya [31], yang memanfaatkan membran bermuatan (Membran anoda dan katoda) untuk memisahkan ion. Pemisahan ion dapat digunakan untuk menghasilkan air minum dari air asin, air laut, dan air payau [32]. ED bekerja efektif dalam perairan bersalinitas rendah [33]. Keterbatasan ED adalah komponen toksik tidak mampu dihilangkan dari aliran umpan, sehingga diperlukan *post-treatment* [32]. Tipikal kapasitas ED terpasang antara 5.000- 425.000 m³/hari [24]. ED membutuhkan energi dalam kisaran 6- 11 kWh/m³ [34]. Efisiensi penyisihan total sebesar 99,4% dapat diperoleh dengan penggabungan ED dan RO [35]. Dengan adanya keterbatasan ED menyebabkan sebagian besar proses ED digantikan oleh RO [32].

C. Reverse Osmosis

Salah satu metode terbaik dalam mengolah air laut menjadi air tawar dan/ atau air minum adalah dengan RO. Untuk pengolahan air pada kapal, RO hanya memerlukan ukuran yang cukup kecil dalam ruang kapal, efisiensi yang baik, serta mekanisme kerja sistem terbaik. Kinerja RO dianggap penting dan krusial dalam kapal. Selain RO, terdapat pula proses pemisahan oleh jenis membran lain dalam pengolahan air, yaitu mikrofiltrasi (MF), ultrafiltrasi (UF), dan nanofiltrasi (NF) [36]. MF memiliki target kontaminan bakteri, alga, padatan tersuspensi, dan kekeruhan. Material membran terdiri atas polimer dan inorganik. Tekanan osmotik pada rentang 0,1- 2 bar dan ukuran pori antara 50- 10.000 nm. NF memiliki target kontaminan bahan organik alami, molekul organik kecil, dan ion *dimultivalent* dan *multivalent* [37]. Material membran berupa *thin-film composite polyamide*, selulosa asetat, dan lainnya [38]. Tekanan osmotik pada rentang 2- 10 bar, dan ukuran pori hingga 2 nm [37]. UF beroperasi pada tekanan rendah dengan *transmembrane pressure* (TMP) berkisar antara 0,5- 5 bar. Membran UF berupa polimer organik atau polimer anorganik. Struktur pori berupa struktur simetris atau asimetris. Tebal membran simetris berkisar antara 10- 200 μ m dan tebal membran asimetris antara 0,1- 0,5 μ m [13]. Target kontaminan UF berupa bakteri, virus, koloid, dan makro molekul [37].

1) Prinsip Kerja Sistem Reverse Osmosis

Prinsip dasar kinerja RO yakni proses fisik menggunakan tekanan osmosis. Perbedaan tekanan osmotik antara air asin dan air tawar dimanfaatkan untuk menghilangkan garam dari air. Tekanan lebih besar dari tekanan osmotik pada air asin dimanfaatkan untuk membalikkan aliran, sehingga menghasilkan air murni (Air tawar) [39]. RO melibatkan tekanan hidrostatik yang melebihi tekanan osmosis larutan, sehingga air pelarut dapat berpindah dari larutan berkonsentrasi zat terlarut tinggi ke larutan berkonsentrasi zat terlarut rendah [17]. Tekanan hidrostatik merupakan sumber energi potensial untuk proses RO [40].

Tekanan yang digunakan untuk desalinasi air laut dengan sistem RO pada kapal sebesar 700- 900 psi [23]. Juga dapat berkisar dari 800 hingga mencapai 1.180 psi [41], [42], yaitu (55- 82 bar [40], [43], atau 80- 100 bar [42], yang setara

dengan 6- 8 MPa. Tekanan tinggi dicapai dengan satu atau lebih pompa yang bekerja secara paralel. Pada umumnya pompa bertekanan menggunakan pompa piston aksial [41]. Sebesar 50- 75% energi yang dikonsumsi SWRO umumnya digunakan untuk menggerakkan *high pressure pump* [42]. Konsumsi energi RO berkisar dari 2- 6 kWh/m³ [44] atau 2,58- 8,5 kWh/m³ [45]. Menurut [11], konsumsi energi RO diperkirakan antara 8- 9 kwh/T dalam instalasi kapasitas kecil untuk air laut dengan 35.000 ppm TDS dan 9- 11 kwh/T untuk air laut yang dengan 42.000 ppm TDS. Keunggulan konsumsi energi RO setelah pengoperasian 2 tahun dapat kurang dari 2,2 kWh/m³ [46]. RO menghasilkan dua aliran, yaitu aliran air tawar bersalinitas rendah (Permeate) dan air sumber umpan bersalinitas tinggi (Retentate/ Concentrate). Membran RO semipermeabel akan menolak semua padatan tersuspensi. Beberapa bagian padatan terlarut akan mengikuti aliran air tawar melalui membran [47].

2) Proses Utama Sistem RO/ Susunan Utama Sistem

Sistem RO pada dasarnya terdiri dari empat sistem utama, yakni: (a) *Pre-treatment*, (b) Pompa bertekanan tinggi, (c) Sistem membran, dan (d) *Post-treatment* [48], [49]. *Pre-treatment* bertujuan menurunkan zat pengotor dalam air [50]. *High pressure pump* berfungsi meningkatkan tekanan air umpan yang sudah melalui proses *pre-treatment* hingga tekanan operasi sesuai dengan membran dan salinitas air umpan [11].

Sistem membran terdiri dari bejana bertekanan dan membran semipermeabel [51]. Membran *permeable* akan menghalangi aliran garam terlarut dan mengalirkan air produk terdesalinasi sehingga menghasilkan dua aliran, yaitu aliran produk air bersih dan aliran air laut berkonsentrasi [11]. *Post-treatment* terdiri dari pengaturan pH, desinfeksi [52], penggunaan CO₂ untuk memulihkan alkalinitas, penambahan inhibitor untuk pengendalian korosi, serta degasifikasi [53]. Pengaturan nilai pH diupayakan memasuki rentang 6,8- 8,1 sesuai persyaratan kualitas air minum. Desinfeksi melibatkan sinar UV untuk membunuh bakteri dan organisme [54]. Terdapat pula penambahan mineral dikarenakan hasil dari RO merupakan air demineralisasi [55]. Minimal, *post-treatment* harus mencakup penyesuaian pH untuk pengendalian korosi dan desinfeksi. Desain dan penerapan proses *post-treatment* didasarkan pada tujuan kualitas air yang diinginkan untuk air olahan [53].

3) Kelebihan dan Kekurangan Sistem Reverse Osmosis

RO memiliki kelebihan dan kekurangan dalam kinerjanya. Berikut merupakan kelebihan dari RO:

1. RO mampu menghilangkan zat terlarut dan tidak memerlukan penambahan bahan kimia [56].
2. RO tidak memerlukan pemanasan tambahan, sehingga air garam yang keluar dari proses memiliki suhu yang sama dengan air umpan [57].
3. RO dapat dilakukan pada suhu ruang tanpa perubahan fase, ruang peralatan operasi kecil dan menghasilkan kualitas air sangat baik [58].
4. Efisiensi sistem RO sangat tinggi, membutuhkan peralatan sederhana, dan perawatan mudah [59].
5. Konsumsi energi RO sangat rendah, berkisar antara 8- 9 kwh/T dalam instalasi kapasitas kecil untuk air laut yang

mempunyai 35.000 ppm TDS dan 9- 11 kwh/T untuk air laut yang mempunyai 42.000 ppm TDS. Konsumsi energi dapat lebih kecil untuk % *recovery* yang lebih kecil. Sistem RO sangat mudah dalam memperbesar kapasitas [11].

Sedangkan beberapa kekurangan sistem RO, yaitu:

1. RO tidak praktis untuk menangani air yang masuk dalam rumah. Kerugian terdapat pada jumlah air yang terbuang oleh proses tersebut [56].
2. Sistem RO membutuhkan bahan, material, dan peralatan dengan kualitas yang cukup tinggi [60].
3. Membran RO rentan terhadap *fouling*, sedimentasi padatan tersuspensi, atau terjadinya korosi sehingga air umpan berupa air laut/ air limbah perlu dilakukan *pre-treatment*. RO memerlukan pencucian membran untuk mencegah *fouling* sehingga biaya dan energi yang dikeluarkan lebih besar [61].

4) Komposisi Material Membran Reverse Osmosis

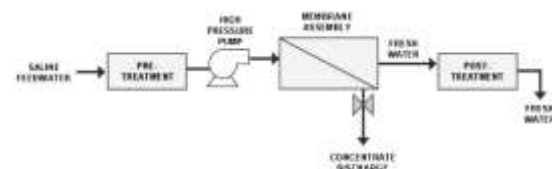
Membran semipermeabel RO terdiri dari lapisan tipis polimer. Membran harus memiliki sifat permeabilitas dan derajat semipermeabilitas tinggi, laju transportasi air melewati membran harus jauh lebih tinggi dibandingkan laju transportasi ion terlarut. Membran harus stabil terhadap variasi pH dan suhu [17], tidak mahal, memiliki umur panjang, fluks air tinggi, dan tidak rentan terhadap pengotor. Membran harus kuat untuk menahan tekanan tinggi dan variasi kualitas air umpan [48].

Komposisi material membran RO umumnya terdiri atas *thin film composite polyamide* (TFC) dan *cellulose acetate* (CA) [37]. Membran CA toleran terhadap klorin tetapi rentan terhadap pematatan bertekanan tinggi sehingga mengurangi fluks air [62]. Rejeksi CA untuk garam anorganik sangat baik, namun untuk organik nilai penolakan lebih rendah [48]. TFC umumnya lebih unggul dibanding CA. TFC dapat mentolerir lingkungan kimia bersifat keras, tidak terlalu rentan terhadap pematatan, dan memiliki fluks air tinggi [62]. TFC mampu bertahan di suhu lebih tinggi, dapat dioperasikan pada rentang pH yang lebih besar, lebih stabil terhadap mikroorganisme, dan tekanan tinggi. Struktur TFC mampu menyokong membran RO dengan kemampuan separasi yang baik serta kekuatan mekanikal tinggi [63].

5) Konfigurasi Modul Membran Reverse Osmosis

Konfigurasi modul membran yang umumnya digunakan pada RO yaitu *spiral wound* (SWM) sedangkan yang lain berupa *hollow fiber* (HFM), *tubular* dan *plate and frame* [17]. Modul membran memiliki dua fungsi utama, yaitu: (1) Mendukung membran dan (2) Menyediakan manajemen fluida yang efisien [37].

HFM berupa serat berlubang. Diameter luar berkisar 0,5-1,0 mm dan diameter lumen dalam berukuran <0,3- 0,8 mm. HFM dapat menahan tekanan tinggi hingga level SWRO dan memiliki kemampuan menahan klorin untuk mengontrol *biofouling*. HFM umumnya digunakan dalam aplikasi membran bertekanan rendah (UF dan MF) [37]. SWM adalah desain terutama untuk SWRO [37]. SWM memiliki keunggulan dibandingkan modul lain, seperti: Biaya penggantian rendah, perpipaan sederhana, perawatan mudah, dan kebebasan desain lebih besar [19]. RO biasanya dioperasikan dalam aliran *cross-flow* yang banyak tersedia dalam SWM [18]. Elemen SWM yang digunakan dalam



Gambar 2. Prinsip dasar sistem *reverse osmosis*.

industri umumnya memiliki panjang $\pm 100-150$ cm (40- 60 in) dan diameter $\pm 10-20$ cm (4- 8 in) [17], [37]. *Plate and frame* terdiri dari lembaran membran yang disusun pada rangka [64]. Umumnya, *packing density* membran dalam *plate and frame* berada dalam kisaran 60- 150 ft²/ ft³ (200-500 m²/ m³) dan kecepatan aliran umpan berkisar dari 0,8-2,6 ft/ detik [65]. *Tubular module* memiliki diameter dalam kisaran 5- 25 mm [37] atau 0,3- 2,5 cm. Keuntungan terbesar *tubular module* adalah ketahanan terhadap penyumbatan partikulat dan kemudahan pembersihan [66].

6) Sistem Aliran Operasi

Terdapat 2 sistem aliran operasi pada RO, yakni *cross-flow filtration* dan *dead-end filtration*. *Cross-flow* memiliki laju aliran yang lebih stabil. Aliran air umpan disirkulasikan terus menerus secara tangensial ke permukaan membran [67]. Filtrasi ini dapat menghilangkan partikulat dan zat pengotor untuk memperpanjang masa pakai filter [68]. *Cross-flow* memiliki tiga aliran, yakni: *Feed water*, *permeate*, dan *concentrate* [69]. Operasi *cross-flow* memiliki kecenderungan terhadap *fouling* yang lebih rendah daripada *dead-end* [70]. *Dead-end filtration* dalam prosesnya akan mendorong aliran air umpan melalui membran dan zat tersaring akan terakumulasi di permukaan membran [71]. Keuntungannya adalah tidak adanya air limbah. Kerugiannya, kotoran menumpuk di sisi umpan membran sehingga membentuk *cake* yang menurunkan kinerja sehingga diperlukan penggantian filter yang cukup sering daripada *cross-flow*. *Dead-end* umumnya digunakan pada MF/ UF [68] dan memiliki dua aliran: Aliran air umpan dan *permeate* [69].

D. Penerapan Sistem Reverse Osmosis sebagai Teknologi Desalinasi pada Kapal Pesiar

1) Sistem Pengolahan Air Tawar

SWRO diterapkan pada kapal pesiar untuk mengatasi masalah kebutuhan air selama pelayaran. Sistem RO diaplikasikan pada permasalahan kebutuhan air oleh kapal pesiar yang berlokasi di Pelabuhan Palma, Kota Palma (Mallorca, Kepulauan Balearic, Spanyol) dimana terjadi penarikan air sebesar sebesar 285,5 L/ penumpang/ tahun dan mengalami peningkatan setiap tahunnya, sehingga aktivitas kapal pesiar menjadi ancaman bagi ketersediaan air di pulau tersebut. Berdasarkan pada spesifikasi kapal pesiar *New Mein Schiff 2* yang dinaungi oleh perusahaan TUI Cruises, diketahui bahwa penumpang pada kapal mencapai 3.894 orang. Dengan dikalikan oleh kebutuhan air rata-rata sebesar 199 L/ orang/ hari, maka didapatkan kebutuhan debit pengolahan air untuk sistem RO sebesar 774 m³/hari atau setara dengan 32,25 m³/jam.

Sesuai dengan prinsip yang digambarkan dan sesuai susunan utama sistem RO (Gambar 2), proses pengolahan dimulai dari *intake* dan di akhiri dengan pendistribusian air kepada penumpang. *Sea Water Intake* terdiri dari *water* dan

pompa *intake*. Fungsi utama yakni sebagai tempat air laut memasuki sistem dan mengekstraksi jumlah air laut yang diperlukan. *Intake* berfungsi menarik air laut dengan meminimalkan dampak terhadap organisme laut [72]. Selanjutnya adalah filter media, yang merupakan *pre-treatment* untuk mencegah *scaling* dan *fouling*. Air melewati media seperti pasir, antrasit, pasir silika berbutir kecil, *granular activated carbon* (GAC) untuk menghilangkan padatan/ partikel berukuran besar. Padatan dipisahkan dari air dengan menempel pada media filter [62]. Filter media dalam proses *pre-treatment* dapat digantikan oleh MF dan UF, yang menggunakan sejumlah besar bahan kimia untuk *backwash* dan pembersihan membran. Bahan kimia harus telah tersertifikasi dan mempunyai kontrol kualitas yang sesuai untuk digunakan terutama dalam air minum [73], [37]. Setelah itu terdapat *cartridge filter* yang diaplikasikan sebagai *pre-treatment* untuk menghilangkan padatan tersuspensi, kekeruhan, dan bahan organik. Filter kartrid harus mempunyai struktur luar yang tahan korosi. Pada prosesnya, air melewati filter kartrid 20 μm yang mengandung karbon aktif, juga terpasang filter kartrid cadangan untuk digunakan saat penggantian atau perbaikan filter utama [66]. Selanjutnya, air dari *cartridge filter* masuk ke pompa bertekanan tinggi [74]. Filter kartrid bekerja sangat baik di perairan laut terbuka dengan kualitas air tidak terlalu keruh. Umumnya kapal menggunakan desain kartrid sederhana untuk mengolah air laut sebelum melakukan RO untuk meminimalkan *scaling* dan *fouling* pada membran [66].

High Pressure Pump (HPP) akan meningkatkan tekanan dari air umpan melalui rangkaian proses *pre-treatment* sehingga sesuai dengan tekanan operasi dengan membran dan salinitas air umpan. Setelah HPP, selanjutnya adalah membran RO. Membran RO merupakan proses utama dari rangkaian sistem. Elemen kunci dalam membran RO adalah membran semipermeabel tipis, di mana air dapat mengalir saat terjadi *salt rejection*. Berbagai bahan anorganik, mikroorganisme, ion organik dan ion terlarut akan disaring dan hanya molekul air yang dapat masuk dalam membran, sehingga didapatkan air yang memiliki kemurnian 99,99%. RO akan menghasilkan dua produk serta aliran air, yakni air tawar bersalinitas rendah (*Permeate*) serta air sumber umpan bersalinitas tinggi. Untuk menampung elemen membran RO digunakan bejana tekan atau *pressure vessels*. Tingkat tekanan yang dipilih pada *pressure vessels* harus cukup tinggi untuk memungkinkan peningkatan tekanan untuk mengimbangi *fouling* [19]. Selanjutnya adalah tangki penyimpanan atau *storage tank* yang menyediakan dan menyimpan air yang telah disaring sesuai kebutuhan selama *peak hour*. Tangki penyimpanan berfungsi untuk menyimpan air *permeate* sebelum diolah dalam *post-treatment* dan di distribusikan untuk digunakan.

Post-Treatment dilakukan untuk mendapatkan kemurnian air hasil pengolahan RO yang tinggi atau mencapai standar nilai dari air yang diinginkan. *Post-treatment* dapat berupa penyesuaian pH, remineralisasi, desinfeksi, pengurangan/ pembuangan boron, serta stabilisasi, dengan begitu minimal pengolahan harus memenuhi standar kualitas air minum. Remineralisasi berfungsi agar air mengandung mineral yang dibutuhkan tubuh dan meningkatkan kualitas rasa air.

Kalsium hipoklorit pada desinfeksi akan membantu remineralisasi [75] untuk mengurangi sifat korosif sebelum air didistribusikan untuk dikonsumsi [76].

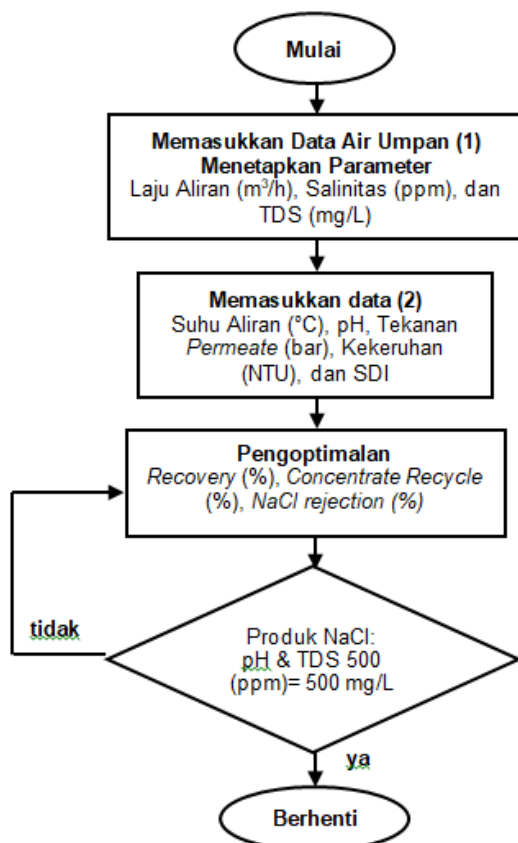
Air produk umumnya membutuhkan penyesuaian pH sebelum di distribusikan dan digunakan. *pH adjustment* dilakukan dalam rentang 6,8- 9,5 agar memenuhi persyaratan kualitas air minum, atau rentang 6,8- 8,1 yaitu bersifat netral dan untuk mengontrol korosi. Selanjutnya adalah desinfeksi untuk inaktivasi patogen dan membunuh bakteri serta organisme. Desinfeksi umumnya dibantu oleh radiasi/ lampu ultra violet (UV). Desinfeksi juga dapat dilakukan dengan *chlorine dosing* atau *chlorination* [77] dan *ozone gas dosing* [78]. Selanjutnya adalah penghilangan boron, bertujuan untuk mengurangi kandungan boron hingga seminimal mungkin agar memenuhi standar kualitas air minum (1,0 mg/L hingga 2,4 mg/L), atau mencapai 0 ppm. Proses ini dapat menggunakan teknologi *boron selective resin* (BSR), dimana BSR tidak dipengaruhi oleh kondisi operasi seperti suhu, pH, dan/ atau salinitas [54], [79]. Stabilisasi, dilakukan dengan penambahan unsur kimia seperti kalsium dan magnesium karbonat, yang dilakukan bersamaan dengan penyesuaian pH [76]. Harus dipastikan bahwa dalam stabilisasi tidak secara signifikan mengurangi total nutrisi seperti kalsium, magnesium, *fluoride* di bawah standar atau nilai yang ditetapkan [80].

Penggunaan bahan kimia seperti HCl (*Hydrochloric acid addition*) dapat digunakan sebagai *pH adjustment*. Diikuti oleh pemakaian aluminium sulfat (Alum) sebagai *chemical dosing* dan koagulan sebelum air laut memasuki filter media. Kalium permanganat (KMnO_4) digunakan untuk mengoksidasi zat besi dan mangan. Senyawa tersebut berpotensi untuk menurunkan bahan organik dan membunuh bakteri patogen sehingga penyumbatan akibat adanya proses biologi dapat dicegah [11].

2) Konfigurasi Modul Membran

Dalam perhitungan kebutuhan air pada kapal pesiar didapatkan debit sebesar 32,25 m^3/jam . Berdasarkan spesifikasi sistem yang ditawarkan oleh *Culligan Company* berupa desalinator SW Evo dengan pilihan *nominal flow* sebesar 32 m^3/jam dan 40 m^3/jam [46], maka dalam perencanaan diaplikasikan sistem dengan aliran air 40 m^3/jam . Dalam SWRO, air umpan akan disuplai hingga mengalir ke sisi umpan antara membran RO. Air *permeate* dikumpulkan melalui pipa tengah dan *concentrate* dikeluarkan di sisi lain RO. Berdasarkan spesifikasi sistem SWRO oleh Culligan, maka didalam sistem akan dibutuhkan 6 membran didalam 1 *vessels* yang dipasang secara seri. Air garam di hulu elemen disuplai sebagai air umpan elemen berikutnya sehingga konsentrasi garam menjadi lebih tinggi saat mengalir ke hilir [81]. Berdasarkan spesifikasi sistem SWRO oleh Culligan, maka rangkaian sistem RO akan membutuhkan 10 *pressure vessels* yang disusun secara paralel.

Konfigurasi modul membran RO terpilih berupa SWM, yang memiliki keunggulan menghasilkan air produk dan fluks *permeate* lebih tinggi dibandingkan modul lain. SWM melewati air umpan melalui *channel* membran yang sempit, sehingga menghasilkan *crossflow* yang sesuai untuk menghilangkan *fouling*. Material membran terpilih berupa TFC yang diproduksi dalam *continuous flat sheets*. Modul



Gambar 3. Bagan alir saat RO dijalankan.

yang dikembangkan untuk membungkus TFC adalah SWM [37]. Membran TFC poliamida lebih memiliki keunggulan dan memiliki umur yang lebih panjang daripada material membran CA [62].

3) Operasi dan Pemeliharaan

Selain perancangan sistem SWRO yang baik, perlu pula dilakukannya pemantauan elemen operasional untuk menunjang sistem. Pemeliharaan preventif yang sistematis perlu dilakukan, meliputi kalibrasi instrumen, penyesuaian pompa, inspeksi, penyesuaian dosis bahan kimia, deteksi perbaikan kebocoran, serta perbaikan struktural sistem sesuai jadwal yang telah direncanakan. Berikut merupakan bagan alir saat RO dijalankan (Gambar 3).

Konsentrasi NaCl awal bergantung pada kualitas air baku dan hasil akhir aliran produk harus sesuai dengan batas yang diijinkan serta dapat diminum, yakni sebesar 500 mg/L atau 500 ppm [22], [23]. Perhatian operasional utama terkait dengan penggunaan unit RO adalah *scaling* dan *fouling*. Pengotoran membran diperbaiki dengan *backwash* atau pembersihan (Sekitar setiap 4 bulan), dan dengan mengganti elemen filter kartrid (Sekitar setiap 8 minggu) [82] atau setiap 1- 3 bulan [78].

4) Pengolahan Air Limbah

Terdapat 5 jenis air limbah yang dihasilkan dari kapal pesiar, yakni *ballast water*, *sludge*, *oily bilge water*, *greywater*, dan *blackwater* [83]. *Sludge* merupakan hasil penggunaan oli pelumas bekas dan lumpur dari bahan bakar. *Sludge* diolah dengan sentrifugasi untuk memisahkan fluida berdasarkan berat jenis. Proses sentrifugal meningkatkan konsentrasi zat kering dari 2– 3% menjadi 17– 27%. Teknik pengolahan lain berupa insinerasi, *steam dryer*, *filter press*,

dan pembakaran [84]. *Bilge water* merupakan air limbah yang dihasilkan dari ruang mesin kapal, yang bercampur dengan produk minyak bumi dan polutan dari operasional kapal, (Penggunaan oli mesin, peralatan mekanis, dan segel berpelumas). *Oily bilge treatment* terpilih menggunakan UF dan RO. UF menghasilkan fase air dengan kualitas yang sesuai untuk pembuangan langsung ke laut dan fase minyak yang dapat dibakar. RO dan pengolahan karbon aktif akan memungkinkan penggunaan kembali air yang telah diolah sebagai air proses. Konsentrasi oli maksimum yang dapat dicapai berkisar dari 25%- 65% [83].

Greywater didapatkan dari kegiatan salon, kolam renang, *laundry*, dapur kapal, hingga buangan toilet. Pengolahan *greywater* terpilih berupa *membrane bio- reactor* (MBR) karena ekonomis, menghasilkan kualitas air olahan yang baik [83], kualitas efluen yang bebas padatan, kandungan TOC rendah, dan pengelolaan sumber daya lebih sederhana. Rancangan MBR terdiri dari *pre-treatment* berupa filter halus sedangkan *post-treatment* menggunakan desinfeksi dengan klorin. Efluen MBR dengan mudah memenuhi standar atau pedoman internasional untuk penggunaan kembali air yang tidak dapat diminum [37], [85]. *Blackwater* merupakan limbah toilet berupa dari feses dan urin, serta fasilitas medis. *Blackwater* diolah menggunakan sistem MBR [86]. Limbah bersih (Filtrat) dialirkan ke tangki untuk digunakan/ dibuang, sedangkan lumpur hasil penguraian aerobik dari *blackwater* dengan *greywater* dialirkan kedalam tangki untuk dibuang atau diolah dengan pengeringan/ pembakaran. *Ballast water* merupakan air tawar/ air laut yang berfungsi sebagai pemberat untuk menjaga stabilitas dan keseimbangan kapal [83]. Sistem pengolahan yang digunakan berupa elektroklorinasi untuk sistem berkapasitas tinggi dan *ultraviolet radiation* (UVR) untuk sistem berkapasitas rendah [87].

Terdapat pula sumber terbesar air limbah dari proses desalinasi, yakni *brine effluent/ RO Concentrate* (ROC) yang memiliki dampak negatif terhadap lingkungan dikarenakan tingginya konsentrasi garam dan polutan terkandung. ROC yang dihasilkan dari proses desalinasi mengandung garam lebih tinggi daripada air laut karena telah terkontaminasi oleh berbagai bahan kimia yang digunakan selama proses desalinasi. Beberapa pengolahan lanjutan diterapkan berupa teknik berbasis membran seperti MD, *forward osmosis* (FO), dan ED yang handal, ramah lingkungan dan menghasilkan limbah berkualitas tinggi dengan pemulihan sumber daya [88].

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan uraian yang dijelaskan pada hasil dan pembahasan mengenai sistem *Sea Water Reverse Osmosis* pada kapal pesiar, maka didapatkan kesimpulan bahwa: (1)*Reverse Osmosis* mampu mendesalinasi air laut dengan kandungan TDS awal \pm 35.000 hingga 45.000 ppm menjadi $<$ 500 ppm, dimana nilai kandungan tersebut sesuai dengan batas yang diijinkan dan dapat dikonsumsi, sehingga sistem RO dapat memenuhi kebutuhan air tawar dalam kapal pesiar; (2)Jenis material atau bahan membran terbaik yang digunakan pada sistem *Reverse Osmosis* berupa *thin film composite* (TFC) poliamida, sedangkan konfigurasi modul membran yang terpilih dan terbaik adalah *spiral wound*

membrane (SWM); (3)Permasalahan penarikan air dan kebutuhan air tawar oleh kapal pesiar pada Pelabuhan Palma, Spanyol sebesar 285,5 L/ penumpang/ tahun dapat diatasi dengan sistem RO. RO mampu menyuplai air tawar pada kapal pesiar dengan debit sebesar 774.000 L/ hari yang setara dengan 774 m³/ hari atau 32,25 m³/ jam, hingga lebih.

SARAN

Saran yang dapat diberikan berdasarkan hasil kajian literatur adalah sebagai berikut: (1)Diperlukan kajian lebih lanjut mengenai energi yang digunakan pada setiap pompa dalam instalasi sistem RO; (2)Perlu dilakukannya kajian dan penelitian lebih lanjut mengenai luas instalasi RO termasuk konfigurasi modul membran, untuk memastikan adanya ketersediaan ruangan pada *deck* kapal pesiar sehingga pemasangan konfigurasi modul membran dapat dilakukan; (3)Diperlukan kajian rangkaian sistem RO lebih lanjut agar lebih sesuai dengan karakteristik air baku yang tersedia serta sesuai dengan kebutuhan air pada kapal pesiar

DAFTAR PUSTAKA

- [1] T. Oki dan S. Kanae, "Global hydrological cycles and world water resources," *Science* (80-.), vol. 313, no. 5790, pp. 1068– 1072, 2006.
- [2] I.A. Shiklomanov, *Assessment of Water Resources and Water Availability in the World*. New York: United Nations, 1997.
- [3] R. Hassan, R. Scholes dan N. Ash, *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment*. Washington, DC: Island Press, 2005.
- [4] Uitto J.I., *Global Freshwater Resources*. In: Palo M., Uusivuori J., Mery G. (eds) *World Forests, Markets and Policies*. *World Forests, vol 3*. Dordrecht: Springer, 2001.
- [5] A. Maragkogianni dan S. Papaefthimiou, "Evaluating the social cost of cruise ships air emissions in major ports of greece," *Transp. Res. Transp. Environ.*, vol. 36, 2015.
- [6] H. Pakbeen, "Comparative study of leading cruise lines' sustainability practices and environmental stewardship in contribution to sdgs' sea and water conservation goal," *Eur. J. Sustain. Dev.*, vol. 7, no. 3, pp. 507–516, 2018.
- [7] Cruise Lines International Association (CLIA), *State of the Cruise Industry Outlook*. North America: Cruise Lines International Association (CLIA), 2018. [Online]. Available: <https://cruising.org/-/media/research-updates/research/featured/2018-clia-state-of-the-industry.pdf>.
- [8] Cruise Lines International Association (CLIA), *State of the Cruise Industry Outlook*. North America: Cruise Lines International Association (CLIA), 2020. [Online]. Available: <https://cruising.org/-/media/research-updates/research/state-of-the-cruise-industry.ashx>.
- [9] C. Garcia, C. Mestre- Runge, E. Morán- Tejada, J. Lorenzo- Lacruz, J. dan D. Tirado, "Impact of cruise activity on freshwater use in the port of palma (Mallorca, Spain)," *Water*, vol. 12, no. 4, pp. 1–11, 2020.
- [10] F. Chen dan R. Zhao, "In What Way is the Cruise Shipping Industry Possibly Affecting the Development of the Mechanical Ventilation Fans," Master Programme in Industrial Management and Innovation, Uppsala Universitet, 2019.
- [11] Suryadi, "Analisa Teknis Ekonomis Perencanaan Sistem Reverse Osmosis untuk Kebutuhan Air Tawar (Domestic Fresh Water System) pada Kapal Niaga (MT. Avila)," Sepuluh Nopember Institute of Technology, 2012.
- [12] A. Fisher, J. Reisig, P. Powell dan M. Walker, "Reverse Osmosis (R/O): How It Works," Cooperative Extension, CSREES South State & Pacific Islands, Regional Water Quality Program. University of Nevada, 2007.
- [13] I. G. Wenten, *Membran Untuk Pengolahan Air*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 1997.
- [14] W. Widayat, "Aplikasi teknologi pengolahan air asin Desa Tarupa Kecamatan Taka Bonerate Kabupaten Selayar," *J. Air Indones.*, vol. 3, no. 1, pp. 81–95, 2007.
- [15] S. A. Mohammed, A. D. Abbas, dan L. S. Sabry, "Effect of operating conditions on reverse osmosis (RO) membrane performance," *J. Eng.*, vol. 20, pp. 61–70, 2014.
- [16] K. Košutic, L. K. Kunst, dan B. Kunst, "Porosity of some commercial reverse osmosis and nanofiltration polyamide thin- film composite membranes," *J. Memb. Sci.*, vol. 168, pp. 101–108, 2000.
- [17] D. Ariyanti dan I. N. Widiasta, "Aplikasi teknologi reverse osmosis untuk pemurnian air skala rumah tangga," *Teknik*, vol. 32, no. 3, pp. 193–197, 2012.
- [18] L.F. Greenlee, D. F. Lawler, B. D. Freeman, B. Marrot, dan P. Moulin, "Reverse osmosis desalination: water sources, technology, and today's challenges," *Water Res.*, vol. 43, no. 9, 2009.
- [19] Dow Water and Process Solutions, *FILMTEC™ Reverse Osmosis Membranes- Technical Manual*, Ver.4. Edina, Minnesota: Dow Water and Process Solutions, 2020.
- [20] R. Bahar dan M. N. A. Hawlader, "Desalination: Conversion of Seawater to Freshwater," in *2nd International Conference on Mechanical, Automotive and Aerospace Engineering (ICMAAE)-Energy*, Vol. 9, 2013, pp. 1–8.
- [21] A. R. Calvo, G. A. S. Castro, F. Osorio, J. G. López, dan C. Calvo, "Reverse Osmosis seawater desalination: current status of membrane systems," *Desalin. Water Treat.*, 2014, doi: 10.1080/19443994.2014.942378.
- [22] S. A. Kalogirou, "Seawater desalination using renewable energy sources," *Prog. Energy Combust. Sci.*, vol. 31, 2005.
- [23] W. L. Adamson dan J. F. Pizzino, "Reverse- osmosis desalination for shipboard potable water," *Nav. Eng. J.*, vol. 91, no. 2, pp. 131–139, 1979.
- [24] A. Saavedra, H. Valdés, A. Mahn, dan O. Acosta, "Comparative analysis of conventional and emerging technologies for seawater desalination: Northern Chile as a case study," *Membranes (Basel)*, vol. 11, no. 3, 2021.
- [25] S. Ahmadvand, B. Abbasi, B. Azarfar, M. Elhashimi, X. Zhang dan B. Abbasi, "Looking beyond energy efficiency: an applied review of water desalination technologies and an introduction to capillary-driven desalination," *Water*, vol. 11, no. 4, 2019.
- [26] P. Catrini, A. Cipollina, F. Giacalone, G. Micale, A. Piacentino, dan A. Tamburini, "Thermodynamic, exergy, and thermoeconomic analysis of multiple effect distillation processes," *Renew. Energy Powered Desalin. Handb.*, 2018, doi: 10.1016/B978-0-12-815244-7.00012-X.
- [27] A. J. Toth, "Modelling and optimisation of multi-stage flash distillation and reverse osmosis for desalination of saline process wastewater sources," *Membranes (Basel)*, vol. 10, no. 10, 2020.
- [28] R. Greffrath, *Tubes or Plates? For Fresh Water Generators*. Germany: Serck Como GmbH, 2021.
- [29] A. Hussein dan H. Kandil, "Seawater desalination using waste heat recovery on passenger ship," *Port-Said Eng. Res. J.*, vol. 24, no. 1, pp. 82–101, 2020.
- [30] D. Amaya-Vías, E. Nebot, J. A. López- Ramirez, "Comparative studies of different membrane distillation configurations and membranes for potential use on board cruise vessels," *Desalination*, vol. 429, pp. 44–51, 2018.
- [31] M. Akhter, G. Habib, dan S. U. Qamar, "Application of electro dialysis in waste water treatment and impact of fouling on process performance," *J. Membr. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 2, 2018.
- [32] S. C. Chua, M. H. Isa, dan Y.C. Ho, "Electrodialysis (ed): a review on the fundamental concept, advantages, limitations and future trend platform," *A J. Sci. Technol.*, vol. 3, no. 2, 2020.
- [33] Rukhadze. Sh. N. Kamkamidze, L. Gobejishvili, N. Khazaradze, dan A. Shotadze, "Freshwater supply for ships desalinated by method of electro dialysis," *Innovations*, vol. 6, no. 3, pp. 116–118, 2018.
- [34] S. Al-Amshawee, M.Y.B.M Yunus, A.A.M. Azoddein, D. G. Hassell, I. H. Dakhil, dan H. A. Hasan, "Electrodialysis desalination for water and wastewater: a review," *Chem. Eng. J.*, vol. 380, 2020.
- [35] E. A. Abdel-Aal, M.E. Farid, F.S. Hassan, dan A.E. Mohamed, "Desalination of red sea water using both electro dialysis and reverse osmosis as complementary methods," *Egypt. J. Pet.*, vol. 24, no. 1, pp. 71–75, 2015.
- [36] I. Kurniawan dan P. D. Mariadi, "Review: profil hybrid membran dalam proses reduksi air limbah," *Konversi*, vol. 5, no. 1, 2016.
- [37] A.G. Fane, C.Y. Tang, dan R. Wang, *Membrane Technology for Water: Microfiltration, Ultrafiltration, Nanofiltration, and Reverse Osmosis*. Oxford: Wilderer, P ed. Treatise on Water Science, Academic Press, 2011.
- [38] A.I. Schafer, A.G. Fane, dan T.D. Waite, *Nanofiltration– Principles and Applications*. Oxford: Elsevier, 2005.
- [39] T. Younos dan K. E. Tulou, "Overview of desalination techniques," *J. Contemp. Water Res. Educ.*, vol. 132, pp. 3–10, 2005.
- [40] C. Charcosset, C. Falconet, dan M. Combe, "Hydrostatic pressure plants for desalination via reverse osmosis," *Renew. Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 1–5, 2009.

- [41] Dieselsip, *Marine Shipboard Reverse Osmosis System*. Chennai, India: Dieselsip, 2015.
- [42] V. G. Gude, "Energy consumption and recovery in reverse osmosis," *Desalin. Water Treat.*, vol. 36, 2011.
- [43] A. Al-Karaghoul, D. Renne, dan L. L. Kazmerski, "Technical and economic assessment of photovoltaic-driven desalination systems," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 2, pp. 323–328, 2010.
- [44] M. G. Buonomenna dan J. Bae, "Membrane processes and renewable energies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 43, pp. 1343–1398, 2015.
- [45] H. Nassrullah, S.F. Anis, R. Hashaikeh dan N. Hilal, "Energy for desalination: a state-of-the-art review," *Desalination*, vol. 491, 2020.
- [46] Culligan, *SW EVO: Sea Water Desalination. Evolved*. Sydney, Australia: Culligan, 2021.
- [47] N. Voutchkov, "Introduction to Reverse Osmosis Desalination," SunCam, Inc, Florida, 2010. doi: 10.13140/RG.2.2.13908.60801.
- [48] R. M. Garud, S.V. Kore, V.S. Kore, dan G.S. Kulkarni, "A short review on process and application of reverse osmosis," *Univers. J. Environ. Res. Technol.*, vol. 1, 2011.
- [49] UNEP (United Nations Environment), "Sea Water Desalination in the Mediterranean Assessment and Guidelines," Nairobi, Kenya, 2003.
- [50] B. L. Pangarkar, M.G. Sane, dan M. Guddad, "Reverse osmosis and membrane distillation for desalination of groundwater: a review," *Int. Sch. Res. Netw. ISRN Mater. Sci.*, pp. 1–9, 2011.
- [51] A. A. Ahuchaogu, O.J. Chukwu, A.I. Obike, C.E. Igara, N.I. Chidi, dan J.B.O. Echeme, "Reverse osmosis technology, its applications and nano-enabled membran," *Int. J. Adv. Res. Chem. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 20–26, 2018.
- [52] B. Djebedjian, H. Gad, I. Khaled, dan M.A. Rayan, "An Experimental Investigation on Reverse Osmosis Desalination System," 2006.
- [53] S. J. Duranceau, R.J. Wilder, dan S.S. Douglas, "Guidance and recommendations for post-treatment of desalinated water," *Journal-Am. Water Work. Assoc.*, vol. 104, no. 9, 2012.
- [54] R. N. Fadhila, *Perancangan Sistem Pengolahan Air Laut Menggunakan SWRO*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2015.
- [55] N. L. Hanna, dan W. Hadi, "Kelayakan teknologi desalinasi sebagai alternatif penyediaan air minum kota surabaya studi kasus: 50 liter per detik," *J. Tek. ITS*, vol. 5, no. 2, 2016.
- [56] E. Hassinger, T.A. Doerge, dan P.B. Baker, *Water Facts: Number 6 Reverse Osmosis Units*. Arizona Corporative Extension 194019. Arizona: The University of Arizona, 1994.
- [57] A. Sagle dan B. Freeman, *Fundamentals of Membranes for Water Treatment*. Austin, Tx: University of Texas at Austin, 2004.
- [58] L. Jiang, Y. Tu, X. Li, dan H. Li, "Application of Reverse Osmosis In Purifying Drinking Water," in *E3S Web of Conferences, Vol.38*, 2018, pp. 1–6.
- [59] B. Huang, K. Pu, P. Wu, D. Wu, dan J. Leng, "Design, selection and application of energy recovery device in seawater desalination: a review," *Energies*, vol. 13, 2020.
- [60] A. M. Maulana dan A. S. Widodo, "Pengolahan Air Produk Reverse Osmosis Sebagai Umpan Boiler Dengan Menggunakan Ion Exchange," Universitas Diponegoro, 2009.
- [61] G. A. Taropo, "Potensi sistem hybrid forward osmosis (FO)- reverse osmosis (RO) untuk pengolahan air," *Desalination*, 2017, doi: 10.5281/zenodo.1134221.
- [62] K. L. McMordie Stoughton, X. Duan, dan E. M. Wendel, *Reverse Osmosis Optimization*, No. PNNL-2. Richland, Washington: Pacific Northwest National Laboratory, 2013.
- [63] E. Fanejevon, *Membran Komposit Lapisan Tipis Berbasis Grafir Oksida untuk Proses Reverse Osmosis*. Bandung: Institut Teknologi Bandung, 2017.
- [64] D. D. Ariyanti, "Studi Metode Autoflush: Pengendalian Scaling Pada Sistem Membran Reverse Osmosis Skala Rumah Tangga," Dissertation, Pasca Sarjana Universitas Diponegoro, 2009.
- [65] S. A. Tiwari, K.P. Bhattacharyya, D. Goswami, V.K. Srivastava, dan M. S. Hanra, "Hydrodynamic considerations of reverse osmosis membrane modules & their merits and demerits with respect to their applications," *Bhabha At. Res. Cent.*, vol. 249, pp. 220–225, 2004.
- [66] Y. Moran, S. Elizabeth, J. Skelly, D. Volpe, and J. Plummer, "Green reverse osmosis pretreatment for shipboard desalination," *Wpi.Edu*, pp. 1–80, 2010, [Online]. Available: <https://web.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042710161430/unrestricted/GreenReverseOsmosisPretreatment.pdf>.
- [67] Pall Corporation, *Understanding Direct Flow and Crossflow Microfiltration in Food and Beverage Industry Applications*. California: Pall Corporation, 2016.
- [68] D. Bonta, "Fundamentals of Reverse Osmosis," *Vertex Water Products: Tech Update Membranes*, 2011.
- [69] MicrodynNadir, *Membrane Filtration Processes Dead-End vs Cross-Flow*. Ludwigsburg: MANN+HUMMEL Company, 2019.
- [70] I. G. Wenten, A. N. Hakim, Khoiruddin, dan P. T. P. Aryanti, *Desain Proses Berbasis Membran*. Bandung: Departemen Teknik Kimia, Institut Teknologi Bandung (ITB), 2014.
- [71] A. Munir, "Dead end membrane filtration," *Lab. Feasibility Stud. Environ. Eng.*, vol. 33, pp. 1–33, 2006.
- [72] Kennedy/ Jenks Consultant, *SCWD2 Seawater Desalination Intake Technical Feasibility Study*. California: K/J Project, 2011.
- [73] World Health Organization (WHO), "Desalination for safe water supply: guidance for the health and environmental aspects applicable to desalination," *Public Heal. Environ. Geneva*, 2007.
- [74] E. Guler, G. Onkal Engin, M. Celen, dan H. Sari Erkan, "Cost analysis of seawater desalination using an integrated reverse osmosis system on a cruise ship," *Glob. NEST J.*, vol. 17, no. 2, 2015.
- [75] Headquarters, *Technical Manual, Water Desalination*, No. 5-813. Washington, D.C: Department of the Army, 1986.
- [76] World Health Organization (WHO), "Guidelines for drinking- water quality," *Fourth Ed. Inc. First Add.*, 2017.
- [77] Ship Technology, "Drinkable Water Processing Plants for Vessels," [Ship-technology.com.London.2021](https://www.ship-technology.com/contractors/separators/kow-watertreatment/).<https://www.ship-technology.com/contractors/separators/kow-watertreatment/>.
- [78] M. F. Idrees, "Performance analysis and treatment technologies of reverse osmosis plant– a case study," *Case Stud. Chem. Environ. Eng.*, vol. 2, 2020.
- [79] Y. M. Kim, S. J. Kim, Y. S. Kim, S. Lee, I. S. Kim, dan J. H. Kim, "Overview of systems engineering approaches for a large-scale seawater desalination plant with a reverse osmosis network," *Desalination*, vol. 238, no. 1–3, pp. 312–332, 2009.
- [80] C. J and Bartram J, eds, *Calcium and Magnesium in Drinking- Water: Public health Significance*. Spain: World Health Organization, 2009.
- [81] H. Takabatake, M. Taniguchi, dan M. Kurihara, "Advanced technologies for stabilization and high performance of seawater ro membrane desalination plants," *Membranes (Basel)*, vol. 11, no. 2, 2021.
- [82] UNEP (United Nations Environment Programme), *Source Book of Alternative Technologies for Freshwater Augmentation in Latin America and the Caribbean*. Washington, D.C: UNEP (United Nations Environment Programme), 1997.
- [83] T. F. Nugroho, A. Baheramsyah, dan N.A. Trikurnia, "Analysis of port-based discharge water treatment of ships, case study: terminal petikemas surabaya," *Int. J. Mar. Eng. Innov. Res.*, vol. 3, no. 4, pp. 141–147, 2019.
- [84] Ž. Kobojević dan Ž. Kurtela, "Comparison of Marine Sewage Treatment Systems," 2011.
- [85] D. Cecconet, A. Callegari, P. Hlavínek, dan A. G. Capodaglio, "Membrane bioreactors for sustainable, fit-for-purpose greywater treatment: a critical review," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 21, pp. 745–762, 2019.
- [86] A. Ballard, Bentley dan I, "Black and grey water treatment solutions using membrane bioreactors," *Nav. Archit.*, 2003.
- [87] A. Vorkapić, I. Komar, dan G. Jelić Mrčelić, "Shipboard ballast water treatment systems on seagoing ships," *Trans. Marit.*, vol. 5, no. 1, pp. 19–28, 2016.
- [88] B. K. Pramanik, L. Shu, dan V. Jegatheesan, "A review of the management and treatment of brine solutions," *Environ. Sci. Water Res. Technol.*, vol. 3, no. 4, 2017.