

NASKAH ORISINAL

Pemberdayaan Masyarakat Desa Mandangin Melalui Pembuatan dan Instalasi SWRO Dalam Membantu Pemenuhan Kebutuhan Air Bersih

Totok Ruki Biyanto^{1,*} | Purwadi Agus Darwito¹ | Detak Yan Pratama¹ | Gunawan Nugroho¹ | Bambang Lelono W¹ | Aulia Siti Aisjah¹ | Katherin Indriawati¹ | Suyanto¹ | Ali Musyafa¹ | Toto Haksoro² | Yumna Almira Indrasandi¹ | Ghozi Athallah Ridho Hidayat¹ | Salsabilla Rizkita Putri¹ | Muthiutthoriq Thoyyibi¹ | Thoriq Akbar Hanafi¹ | Safania Erlyana Putri¹ | Ahmad Zidane Maulana¹ | Khayyir Noorachman Munawir¹ | Dewanti Maylaffaira¹ | Hafizh Syahsia Shafi¹ | I Dewa Gede Pramanatha Satriatama¹

¹Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.

²Teknologi Rekayasa Elektrikal Mekanik, Politeknik Krakatau, Kota Cilegon, Indonesia.

Korespondensi

*Totok Ruki Biyanto, Departemen Teknik Fisika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia. Alamat e-mail: trb@ep.its.ac.id

Alamat

Departemen Teknik Fisika, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS, Keputih Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia.

Abstrak

Pulau Mandangin di Kabupaten Sampang, Jawa Timur, menghadapi krisis air bersih kronis akibat keterbatasan sumber air tawar, intrusi air laut, dan tingginya biaya distribusi air dari daratan. Masyarakat bergantung pada air hujan dan sumur galian yang kualitasnya menurun, terutama saat kemarau. Sebagai respon, tim pengabdian masyarakat melaksanakan pemberdayaan warga melalui pembuatan dan instalasi sistem *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) portabel yang hemat energi dan ramah lingkungan. Sistem dirancang modular agar mudah dipindahkan, dioperasikan, dan dirawat oleh masyarakat, dengan tahapan survei kebutuhan, perancangan PFD, fabrikasi, pelatihan operator lokal, serta penyusunan panduan operasi dan pemeliharaan. Hasil pengujian kontinyu di *workshop* menunjukkan air umpan dengan TDS 8.480 ppm dapat diturunkan menjadi *TDS permeate* rata-rata 681,93 ppm (653–700 ppm) dengan *rejection rate* sekitar 92% dan debit *permeate* 1,66 L/menit pada tekanan operasi sekitar 20 bar. Kualitas *permeate* tergolong “fair” menurut WHO, namun masih belum memenuhi ambang TDS air minum <500 ppm sesuai Permenkes No. 2 Tahun 2023. Program ini meningkatkan akses air bersih serta kapasitas masyarakat dalam pengelolaan teknologi secara mandiri.

Kata Kunci:

Air bersih, Desalinasi air laut, SWRO, Pemberdayaan Masyarakat, Pulau Mandangin.

1 | PENDAHULUAN

1.1 | Latar Belakang

Desa Mandangin terletak di Kecamatan Sampang, Kabupaten Sampang, Jawa Timur. Wilayah ini merupakan salah satu pulau kecil di pesisir utara Madura dengan luas sekitar 1,67 kilometer persegi dan jumlah penduduk lebih dari 19.000 jiwa. Secara administratif dan geografis, Mandangin termasuk ke dalam kategori wilayah 3T, yaitu terdepan, terluar, dan tertinggal. Kondisi geografis pulau yang dikelilingi laut membuat masyarakatnya sangat bergantung pada sumber daya air lokal yang terbatas. Berdasarkan data Badan Pusat Statistik Kabupaten Sampang, mayoritas penduduk di wilayah ini masih mengandalkan air sumur galian dan air hujan sebagai sumber air bersih utama, karena tidak terdapat aliran sungai dan akuifer air tawar yang memadai^[1]. Keterbatasan sumber air bersih ini menjadi persoalan serius yang telah berlangsung selama bertahun-tahun. Pada musim penghujan, sebagian besar warga menampung air hujan di tandon sebagai cadangan untuk keperluan konsumsi, sedangkan pada musim kemarau mereka terpaksa menggunakan air sumur meskipun kualitasnya kurang layak. Banyak laporan menyebutkan bahwa air sumur di Mandangin memiliki rasa asin dan kadar garam yang tinggi akibat intrusi air laut. Pada kondisi yang lebih ekstrem, masyarakat bahkan harus membeli air bersih yang didatangkan dari daratan Sampang atau Situbondo dengan harga mencapai tiga hingga lima kali lipat dari tarif air PDAM di perkotaan. Hal ini tentu menambah beban ekonomi warga dan memperparah kerentanan sosial masyarakat pulau^[2].

Upaya penyediaan air bersih sebenarnya telah dilakukan oleh pemerintah pada tahun 2012 melalui pembangunan instalasi *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO). Sistem ini diharapkan dapat mengubah air laut menjadi air tawar yang layak konsumsi. Namun, berdasarkan hasil liputan media lokal dan keterangan pihak Dinas Perumahan Rakyat dan Kawasan Permukiman (DPRKP) Kabupaten Sampang, instalasi tersebut kini tidak berfungsi karena mengalami kerusakan dan tidak ada perawatan rutin sejak awal pengoperasian^[3]. Di sisi lain, masyarakat belum memiliki kemampuan teknis untuk memperbaiki dan mengoperasikan sistem tersebut. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan besar antara penyediaan infrastruktur teknologi dan kapasitas sumber daya manusia lokal dalam mengelolanya. Permasalahan yang dihadapi Pulau Mandangin sesungguhnya mencerminkan situasi umum yang dialami oleh banyak pulau kecil di Indonesia. Berdasarkan dokumen Melestarikan Air, Merawat Kehidupan, dan Mewujudkan Kemakmuran yang diterbitkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), sebagian besar pulau kecil di Indonesia menghadapi risiko tinggi terhadap kekeringan dan keterbatasan air tawar akibat minimnya infrastruktur penyediaan air bersih dan meningkatnya intrusi air laut^[4]. Kondisi ini menjadikan masyarakat pesisir dan pulau kecil sangat bergantung pada curah hujan dan sistem penampungan air sederhana, yang kualitasnya kerap kali tidak memenuhi standar kesehatan. Teknologi desalinasi air laut berbasis *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) telah menjadi salah satu solusi teknis yang banyak digunakan untuk mengatasi keterbatasan air di wilayah kepulauan. Proses SWRO bekerja dengan menggunakan tekanan tinggi untuk memaksa air laut melewati membran *semi-permeabel*, sehingga ion garam dan kontaminan lainnya tertinggal sementara air murni dapat menembus membran^[5]. Teknologi ini terbukti efektif menghasilkan air dengan kadar garam di bawah 500 mg/L, sesuai dengan standar air minum WHO. Akan tetapi, sistem ini juga memiliki tantangan besar, terutama dalam hal konsumsi energi, biaya operasi, dan kompleksitas pemeliharaan.^[6]

Hasil penelitian yang dilakukan oleh Al-Karaghoul dan Kazmerski^[7] menunjukkan bahwa konsumsi energi untuk sistem desalinasi konvensional dapat mencapai 3 hingga 6 kWh per meter kubik air, tergantung pada tekanan operasi dan efisiensi pompa yang digunakan. Konsumsi energi yang tinggi menyebabkan biaya produksi air menjadi mahal dan sulit dijangkau oleh masyarakat berpendapatan rendah di daerah terpencil. Selain itu, sistem SWRO konvensional sering kali membutuhkan perawatan rutin yang melibatkan penggantian membran dan filter, sehingga memerlukan operator dengan pengetahuan teknis yang memadai. Untuk mengatasi kendala tersebut, banyak penelitian yang mulai mengembangkan sistem SWRO skala kecil dan *portable*. Huang et al.^[8] dalam studinya mengenai desain sistem desalinasi air laut skala kecil menjelaskan bahwa rancangan modular dan integrasi teknologi hemat energi dapat menurunkan konsumsi listrik hingga 30% dibandingkan sistem konvensional. Sistem *portable* semacam ini sangat cocok untuk diterapkan di daerah kepulauan, karena mudah diinstalasi, dirawat, dan dipindahkan sesuai kebutuhan. Di Indonesia sendiri, penelitian Ariyanti dan Widiasta^[9] menunjukkan bahwa penerapan teknologi *Reverse Osmosis* (RO) skala rumah tangga dapat menghasilkan air bersih dengan efisiensi tinggi serta kualitas air yang memenuhi standar kesehatan. Mengacu pada beberapa *datasheet* pompa yang dapat memberikan suplai tekanan pada kebutuhan operasi SWRO (≈ 20 bar), *jet pump* berbasis pompa KDK-8100 dipilih karena pompa ini memiliki daya relatif rendah, yaitu 450 W, namun mampu menghasilkan debit teoritis 10 L/min dan tekanan maksimum 100 bar, sehingga cukup potensial untuk menyuplai tekanan ke

membran tanpa menggunakan pompa *high-pressure* industri yang umumnya lebih mahal dan memiliki daya yang lebih besar. Namun, pada kondisi operasinya, *jet pump (ejector)* perlu *nozzle* atau penyempitan luas penampang aliran fluida untuk menciptakan *back static pressure*, sehingga pada praktiknya, *choked flow* digunakan dengan memberikan *regulating valve* pada *outlet retentate* membran agar kebutuhan tekanan pada sisi *inlet* membran dapat tercukupi dan terjaga stabil.

Dengan mempertimbangkan seluruh aspek tersebut teknis, sosial, ekonomi, dan lingkungan maka pembangunan sistem SWRO *portable* dan program pemberdayaan masyarakat menjadi solusi paling relevan untuk mengatasi krisis air bersih di Pulau Mandangin. Kegiatan ini diharapkan dapat menyediakan akses air bersih yang mudah dijangkau, meningkatkan kapasitas masyarakat dalam pengelolaan sumber daya air, dan mewujudkan kemandirian dalam memenuhi kebutuhan dasar. Secara lebih luas, program ini juga mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (*Sustainable Development Goals*), khususnya tujuan ke-6 tentang air bersih dan sanitasi serta tujuan ke-3 tentang kesehatan dan kesejahteraan.

1.2 | Solusi Permasalahan atau Strategi Kegiatan

Gambaran permasalahan dan solusi yang ditawarkan pada program pengabdian kepada masyarakat ini dapat dilihat pada tabel berikut.

Tabel 1 Permasalahan dan Solusi

No	Permasalahan	Solusi	Target Luaran	Indikator Pencapaian
1	Keterbatasan akses air bersih untuk kebutuhan sehari-hari membuat masyarakat setempat membeli air galon seharga Rp25.000 hingga lima kali dalam sehari.	Pengembangan dan implementasi sistem SWRO <i>portable</i> yang dapat menghasilkan air layak konsumsi dari air laut secara mandiri dan efisien	Tersedianya 1 unit sistem SWRO <i>portable</i> yang dapat digunakan oleh masyarakat	1 unit SWRO terpasang, berfungsi dengan baik, dan mampu menghasilkan air bersih layak minum secara kontinu
2	Keterbatasan pengetahuan masyarakat mengenai cara mengoperasikan dan merawat sistem SWRO	Sosialisasi, edukasi, serta pelatihan penggunaan dan pemeliharaan sistem SWRO kepada mitra	Masyarakat memahami manfaat air laut sebagai sumber air bersih serta mampu mengoperasikan alat SWRO	Minimal 8 peserta mengikuti pelatihan dan mampu melakukan operasi serta perawatan dasar SWRO
3	Alat SWRO hanya dibangun satu unit, yang pada akhirnya menimbulkan ketimpangan masyarakat di daerah lain	Pengembangan sistem SWRO <i>portable</i> yang dapat dipindahkan ke lokasi berbeda sesuai kebutuhan Masyarakat	Pengembangan sistem SWRO <i>portable</i> yang dapat dipindahkan ke lokasi berbeda sesuai kebutuhan masyarakat	Sistem SWRO dapat beroperasi di minimal 2 lokasi berbeda selama periode pelaksanaan program
4	Konsumsi energi yang tinggi oleh pompa bertekanan tinggi pada sistem SWRO menyebabkan biaya produksi air menjadi mahal dan sulit dijangkau oleh masyarakat berpendapatan rendah di daerah terpencil	Memanfaatkan <i>jet pump (ejector)</i> berdaya rendah yang dirancang bekerja pada kondisi aliran tercekik (<i>choked</i>) sehingga mampu menghasilkan tekanan operasi yang dibutuhkan membran dengan konsumsi daya lebih rendah.	Terealisasi satu unit prototipe SWRO di mana <i>jet pump</i> berdaya rendah berfungsi sebagai penghasil tekanan utama, tanpa pompa HP konvensional.	<i>Jet pump</i> sebagai pompa utama mampu menghasilkan tekanan operasi yang memenuhi kebutuhan membran secara stabil pada kondisi uji.

Berdasarkan permasalahan mitra yang telah diidentifikasi, tim pengusul merencanakan solusi berupa pengembangan dan implementasi sistem desalinasi air laut *portable*. Solusi ini dirancang untuk menjawab empat permasalahan utama yang dipilih berdasarkan tingkat urgensi dan dampaknya terhadap kehidupan masyarakat Pulau Mandangin, yaitu:

1. Keterbatasan air bersih untuk kehidupan sehari-hari
Guna memenuhi kebutuhan dasar air bersih, akan disediakan sistem SWRO *portable* yang dirancang untuk dapat menghasilkan air layak konsumsi dari air laut secara mandiri dan efisien, khususnya pada musim kemarau saat ketersediaan air tawar sangat terbatas. Perancangan sistem ini mengacu pada hasil penelitian Ariyanti & Widiyasa yang menunjukkan bahwa teknologi *reverse osmosis* (RO) terbukti efektif dalam memurnikan air laut pada skala rumah tangga serta memiliki potensi efisiensi energi yang dapat ditingkatkan^[4].
2. Keterbatasan pengetahuan masyarakat mengenai cara mengoperasikan dan merawat sistem SWRO
Upaya peningkatan kesadaran bagi masyarakat dilakukan kegiatan sosialisasi dan edukasi mengenai penggunaan dan pemeliharaan alat desalinasi SWRO, sehingga tercipta pemahaman yang menyeluruh sekaligus kemampuan teknis yang memadai.
3. Terbatasnya jumlah dan akses terhadap fasilitas SWRO yang telah ada
Sebagai solusi terhadap keterbatasan distribusi dan akses, sistem yang dikembangkan akan bersifat *portable*, sehingga memungkinkan penyebaran ke berbagai lokasi strategis di pulau. Hal ini diharapkan dapat memperluas jangkauan pemanfaatan desalinasi di tengah masyarakat.
4. SWRO dengan sistem hemat energi
Sistem SWRO yang ada sebelumnya belum optimal secara operasional. Harga air yang dirasa oleh masyarakat terlalu tinggi membuat masyarakat tetap memilih membeli air dari luar pulau. Dengan menggunakan pompa berdaya rendah, pendekatan ini relevan dengan hasil studi yang menunjukkan bahwa desain sistem RO skala kecil dengan konsumsi energi rendah dan struktur modular sangat ideal untuk wilayah terpencil dan kebutuhan mandiri masyarakat^[5].

Melalui solusi yang ditawarkan, diharapkan tercapai beberapa dampak positif untuk jangka panjang, antara lain:

- a. Peningkatan pemahaman dan kesadaran masyarakat terhadap pemanfaatan air laut sebagai alternatif sumber air bersih.
- b. Peningkatan akses air bersih bagi masyarakat Pulau Mandangin secara mandiri dan berkelanjutan.
- c. Efisiensi ekonomi rumah tangga melalui pengurangan biaya pembelian air bersih dari luar pulau.

Selain itu, desain SWRO *portable* ini juga memperhatikan aspek kemudahan pemeliharaan dan ketersediaan komponen lokal. Dengan demikian, apabila terjadi kerusakan, masyarakat dapat melakukan perbaikan dasar tanpa harus menunggu bantuan teknisi dari luar pulau. Desain sistem yang sederhana namun efektif sangat penting dalam konteks wilayah terpencil seperti Mandangin, di mana logistik dan biaya transportasi menjadi faktor pembatas utama. Strategi kegiatan ini juga melibatkan pelatihan masyarakat lokal melalui program *capacity building*. Masyarakat dilibatkan sejak tahap awal perencanaan, mulai dari pemahaman dasar mengenai proses desalinasi, pengoperasian alat, hingga pemeliharaan sistem. Keterlibatan masyarakat sejak tahap perancangan bertujuan agar mereka memiliki rasa tanggung jawab terhadap sistem yang dibangun dan memahami prinsip dasar pengelolaan air bersih. Model pendekatan partisipatif semacam ini terbukti efektif dalam meningkatkan keberlanjutan program air bersih di berbagai daerah pesisir^[10]. Selanjutnya, kegiatan ini juga mencakup penyusunan panduan teknis operasi dan pemeliharaan sistem (*Standard Operating Procedure*). Dokumen ini berisi langkah-langkah operasional, prosedur pembersihan, penggantian filter, serta panduan penanganan masalah sederhana yang sering terjadi pada sistem SWRO. Adanya panduan ini akan memudahkan masyarakat dalam menjaga performa alat dan memperpanjang umur operasional sistem.

Dari sisi kelembagaan, strategi kegiatan juga mendorong pembentukan kelompok pengelola air bersih yang terdiri dari perwakilan masyarakat lokal. Kelompok ini berfungsi sebagai entitas pengelola yang bertanggung jawab terhadap operasional harian, pengumpulan iuran masyarakat untuk biaya listrik dan perawatan, serta pelaporan kondisi alat secara berkala kepada pihak desa dan mitra pengabdian. Struktur kelembagaan yang jelas menjadi kunci keberhasilan sistem air bersih berbasis masyarakat, sebagaimana disampaikan oleh Purwandari et al.^[10] bahwa proyek penyediaan air di pulau kecil akan berkelanjutan hanya bila ada sistem tata kelola yang transparan dan partisipatif.

Untuk memastikan kegiatan berjalan efektif, pelaksanaan program ini dibagi ke dalam beberapa tahap utama, yaitu:

1. Survei awal dan analisis kebutuhan masyarakat: mengidentifikasi sumber air yang tersedia, volume konsumsi rata-rata, dan persepsi masyarakat terhadap sistem air bersih.
2. Perancangan dan fabrikasi sistem SWRO *portable*: mencakup penyusunan *process flow diagram* (PFD), perakitan unit, serta pengujian awal performa sistem di laboratorium.
3. Pemasangan dan uji lapangan: melakukan instalasi sistem di lokasi sasaran di Pulau Mandangin serta mengevaluasi kinerja alat terhadap kondisi salinitas dan debit air laut setempat.
4. Pelatihan masyarakat dan penyusunan SOP pengoperasian: kegiatan pelatihan teknis dan administrasi untuk memastikan keberlanjutan operasional.
5. Pendampingan kelembagaan dan monitoring berkelanjutan: mendampingi kelompok pengelola air bersih selama beberapa bulan pasca-instalasi untuk memastikan sistem berfungsi optimal.

Secara keseluruhan, strategi kegiatan ini menitikberatkan pada kemandirian masyarakat dan keberlanjutan sistem. Teknologi yang diterapkan bersifat adaptif dan dapat direplikasi di pulau kecil lain dengan kondisi serupa. Dengan mengombinasikan inovasi teknis, pemberdayaan sosial, dan tata kelola lingkungan, kegiatan ini diharapkan mampu menjadi model percontohan penyediaan air bersih berbasis masyarakat di kawasan pesisir Indonesia.

1.3 | Target Luaran

Target utama dari kegiatan pengabdian masyarakat ini adalah tercapainya kemandirian masyarakat Desa Mandangin dalam pengelolaan air bersih melalui penerapan teknologi desalinasi air laut berbasis *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) *portable*. Sistem ini dirancang sebagai solusi berkelanjutan untuk mengatasi krisis air bersih di wilayah pesisir terpencil dengan pendekatan yang efisien, adaptif, dan partisipatif.

Luaran utama kegiatan ini meliputi:

1. Tersusunnya prototipe sistem SWRO *portable* hemat energi, yang mampu mengolah air laut menjadi air bersih layak konsumsi dengan efisiensi energi yang lebih baik.
2. Tersedianya dokumen teknis berupa *Process Flow Diagram* (PFD), *layout* instalasi, dan panduan operasi serta pemeliharaan sistem yang dapat digunakan sebagai acuan penerapan sistem serupa di lokasi lain.
3. Peningkatan kapasitas dan kesadaran masyarakat terhadap pengelolaan sumber daya air yang berkelanjutan, termasuk aspek efisiensi penggunaan air, pengelolaan limbah *brine*, serta dampak lingkungan.
4. Terbitnya publikasi media massa (ITS *Online*)
5. Terbitnya jurnal nasional (SEWAGATI)

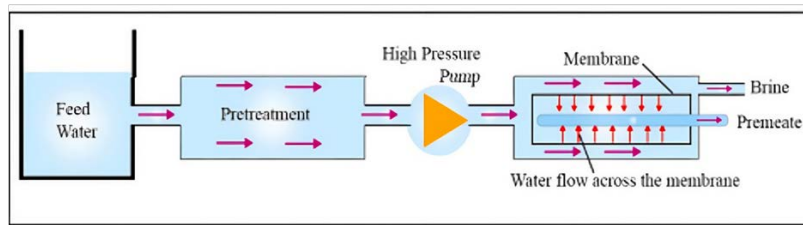
Selain luaran teknis dan sosial tersebut, kegiatan ini juga menargetkan luaran akademik berupa publikasi ilmiah di jurnal pengabdian masyarakat (Sewagati), dokumentasi *video* kegiatan, dan laporan teknis akhir sebagai bukti pelaksanaan program. Dengan tercapainya luaran-luaran ini, kegiatan pengabdian diharapkan mampu memberikan manfaat jangka panjang bagi masyarakat Mandangin, sekaligus menjadi model implementasi teknologi penyediaan air bersih berbasis masyarakat yang dapat direplikasi di pulau-pulau kecil lainnya di Indonesia.

2 | TINJAUAN PUSTAKA

2.1 | Reverse Osmosis

Reverse osmosis merupakan proses pemisahan air dengan padatan terlarut, zat organik, pirogen, materi koloid submikron, pewarna, dan juga bakteri menggunakan membran *semi permeabel spiral*. Pada proses ini, air yang mengandung kandungan-kandungan tersebut akan dipompa dengan pompa bertekanan tinggi untuk dapat menembus membran *semi permeabel* dan keluar

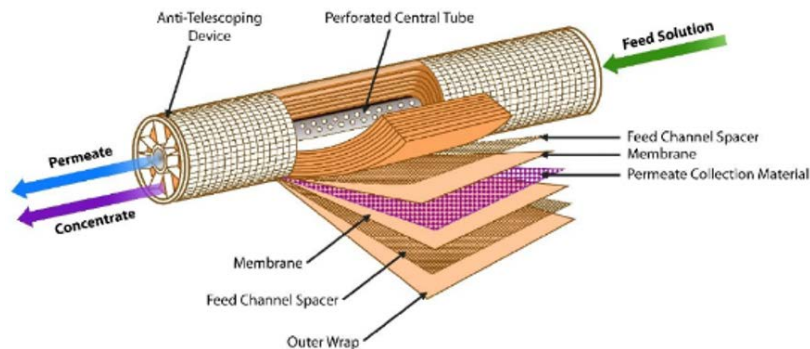
sebagai aliran air bersih yang siap minum^[11]. Proses *Reverse osmosis* yang dilakukan dengan memompa air hingga mencapai tekanan tinggi ke membran *semi-permeabel*. Aliran akan terbagi dua lalu menembus membran *semi permeabel* karena tekanan yang dihasilkan oleh pompa. *Reverse osmosis* memiliki rentang tekanan yang berbeda untuk aplikasinya, untuk aplikasinya pada air laut, diperlukan tekanan 55 hingga 82 Bar, sementara untuk aplikasi pada air payau diperlukan tekanan 17 hingga 27 bar^[12]. Proses *Reverse Osmosis* sendiri dibagi menjadi *Pre-Treatment*, *Principals*, dan *post-treatment*.



Gambar 1 Skematik Proses *Reverse Osmosis*.

2.2 | Membran Reverse Osmosis

Dalam pengolahan air limbah, desalinasi air laut, maupun air payau, *membrane* berperan penting dalam pemurnian air dari pengotor sehingga aman untuk dibuang ke lingkungan maupun untuk diminum, hal ini karena membran tidak memakan banyak ruang, laju volumetriknya tinggi, performa penyaringan (*permeate*) yang bagus, dan kemampuan disinfeksi yang mumpuni^[13]. Dalam aplikasinya pada *Reverse Osmosis*, Membran berperan dalam menyaring partikel terlarut maupun tersuspensi dalam air sehingga air dapat diminum. Dalam membran *Reverse osmosis* terjadi proses yang disebut *transport* massa akibat terjadinya perbedaan atau gradien tekanan hidrostatik yang mendorong air untuk menembus membran atau *permeating*^[12]. Air yang terdorong oleh tekanan pompa akan melewati membran *Reverse Osmosis* dan mengalir keluar melalui *perforated tube*. Zat kontaminan dalam air akan mengalami penyaringan akibat ukuran, muatan, maupun melalui interaksi fisikokimia pada zat terlarut dengan pelarutnya. Membran *Reverse Osmosis* diharuskan untuk tahan terhadap agen kimia maupun mikroba dan disusun dalam susunan tertentu, dapat berupa susunan tunggal maupun berlapis-lapis. Susunan membran *Reverse Osmosis* adalah berupa lembaran datar yang digulung pada material *spacer* berpori dan dapat berbeda pada hidrofobisitas, muatan, maupun morfologi permukaan^[14].



Gambar 2 Struktur Membran *Reverse Osmosis*.

2.3 | Total Dissolved Solids (TDS)

Total Dissolved Solids atau TDS merupakan parameter yang menentukan kualitas dari air minum sendiri. TDS terdiri atas konsentrasi berupa karbonat, bikarbonat, klorida, sulfat, fosfat, besi, kalsium, magnesium, sodium, potassium, dan ion-ion lainnya^[15]. Menurut aturan Permenkes No. 2 Tahun 2023, maksimal TDS pada air minum adalah 500 mg/L atau 500 ppm. Nilai TDS pada hasil *permeate* atau produk air minum *Reverse osmosis* dapat ditekan dengan cara menaikkan tekanan air umpan yang masuk ke membran *semi permeabel*^[16]. Menurut WHO^[6], Klasifikasi air minum berdasarkan *Total Dissolved Solids* (TDS) umumnya didasarkan pada tingkat keterterimaan rasa (*palatability rating*), yaitu: “*excellent*” untuk TDS kurang dari 300 mg/L; “*good*” untuk 300–600 mg/L; “*fair*” untuk 600–900 mg/L; “*poor*” untuk 900–1200 mg/L; dan “*unacceptable*” untuk TDS lebih dari 1200 mg/L.

2.4 | Flushing

Flushing merupakan salah satu metode penggelontoran sedimen dengan energi potensial dari air. Metode ini menggunakan prinsip penggelontoran sedimen dengan memanfaatkan energi potensial air di mana endapan yang terakumulasi pada pipa saluran air laut dengan menggunakan energi hidrolis akibat perbedaan elevasi air antara sisi masuk dan keluar sistem. Hal ini menyebabkan beda tinggi tersebut berperan sebagai sumber energi bagi mekanisme *flushing*^[17]. Dalam *reverse osmosis*, prosedur *flushing* merupakan bagian yang penting dalam operasi dan pemeliharaan untuk mengendalikan *fouling*, *scaling*, dan penumpukan sedimen baik pada jalur *intake*, maupun bagian membran. Pada unit membran, *low pressure flushing* dengan air *permeate* yang telah difiltrasi berfungsi untuk menyapu deposit ringan dan melarutkan kembali akumulasi garam di permukaan membran^[18]. *Flushing* juga diterapkan sebagai tahapan wajib pada saat *start-up* dan *shutdown* untuk mengganti air laut pekat di dalam aliran pipa dengan air yang lebih bersih sehingga mencegah pengendapan garam dan pertumbuhan mikroorganisme ketika sistem tidak beroperasi^[19].

2.5 | Jet Pump

Jet pumplejector adalah alat pemindah fluida tanpa komponen bergerak. Fluida primer bertekanan dipercepat melalui *nozzle* sehingga tekanan statis turun dan fluida sekunder tertarik masuk ke *suction chamber*. Setelah itu, kedua aliran bercampur di *throat/mixing section*, lalu *diffuser* menaikkan kembali tekanan keluaran. Kinerja *jet pump* umumnya dinilai dari rasio *entrainment*, rasio tekanan, dan efisiensi hidraulik. Untuk *water jet pump*, rasio debit primer dan sekunder menjadi parameter penting karena menunjukkan kemampuan *jet* primer menarik aliran sekunder.

$$Q^* = \frac{Q_s}{Q_p} \quad (1)$$

$$P^* = \frac{P_d - P_s}{P_p - P_d} \quad (2)$$

$$\eta = Q^* \cdot P^* \quad (3)$$

dengan Q_p = laju aliran primer, Q_s = laju aliran sekunder, P_p = tekanan primer, P_s = tekanan *suction*, dan P_d = tekanan *discharge*^[20]. Pada sistem SWRO portabel, performa ini perlu dihubungkan dengan konsumsi energi spesifik agar klaim hemat energi dapat dibuktikan secara kuantitatif.

$$SEC = \frac{P_{elec}}{Q_{permeate}} \quad (4)$$

Dengan P_{elec} = daya *electrical* sistem dan $Q_{permeate}$ = laju aliran *permeate*^[21].

2.6 | Fenomena Choked Flow

Fenomena *choked flow* merupakan kondisi ketika laju aliran massa fluida mencapai nilai maksimum sehingga penurunan tekanan pada sisi hilir (*downstream pressure*) tidak lagi meningkatkan debit aliran. Pada teori aliran kompresibel, kondisi ini terjadi

ketika kecepatan fluida pada penampang kritis (*throat*), sehingga gangguan tekanan dari sisi hilir tidak dapat merambat kembali ke arah hulu. Akibatnya, laju aliran massa menjadi terbatas dan hanya dipengaruhi oleh kondisi fluida pada sisi hulu^{[22], [23]}.

Pada sistem *ejector* atau *jet pump*, fenomena *choked flow* berperan penting dalam menentukan karakteristik *entrainment* dan pembangkitan tekanan. Ketika kondisi *choked flow* tercapai pada *nozzle* atau ruang pencampuran (*mixing chamber*), debit aliran primer dan sekunder cenderung menjadi konstan terhadap perubahan tekanan keluaran. Kondisi tersebut menghasilkan operasi *ejector* yang lebih stabil dan memungkinkan terjadinya peningkatan tekanan pada sisi keluaran sistem^[20]. Hasil penelitian Djajadiwinata et al. menunjukkan bahwa performa *ejector* sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi kritis ketika aliran primer maupun sekunder mengalami *choking*, yang ditandai dengan kestabilan rasio *entrainment* dan karakteristik tekanan sistem^[20]. Untuk aliran kompresibel isentropik, rasio tekanan kritis yang menyebabkan terjadinya *choked flow* dapat dinyatakan sebagai berikut^{[22], [23]}:

$$\frac{P^*}{P_0} = \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma - 1}} \quad (5)$$

dengan P^* merupakan tekanan kritis pada penampang *throat*, P_0 adalah tekanan stagnasi sisi hulu, dan γ merupakan rasio kalor spesifik fluida. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa kondisi *choking* ditentukan oleh rasio tekanan antara sisi hulu dan sisi kritis aliran^[22].

Dalam pengembangan sistem SWRO portabel pada penelitian ini, konsep *choked flow* dimanfaatkan melalui pengaturan bukaan katup pada jalur *reject flow* untuk menghasilkan *back pressure* yang membantu mempertahankan tekanan operasi membran. Dengan memanfaatkan kondisi pembatasan aliran tersebut, tekanan operasi yang dibutuhkan membran SWRO dapat dicapai menggunakan *jet pump* berdaya relatif rendah sehingga konsumsi energi sistem dapat ditekan dibandingkan penggunaan pompa tekanan tinggi konvensional^[20].

2.7 | Studi Pengabdian Masyarakat Terdahulu pada Penyediaan Air Bersih di Wilayah Pesisir dan Pulau Terpencil

Berbagai kegiatan pengabdian masyarakat menunjukkan bahwa penyediaan air bersih di wilayah pesisir dan pulau terpencil memerlukan kombinasi antara penerapan teknologi dan penguatan kapasitas masyarakat. Program Pengembangan Desa Mitra (PPDM) di Desa Bangun Purba yang menerapkan teknologi tepat guna (TTG) untuk penyediaan air bersih menunjukkan bahwa keberhasilan program tidak hanya ditentukan oleh ketersediaan instalasi pengolahan air, tetapi juga oleh peningkatan kapasitas kelembagaan masyarakat dalam mengelola dan mengoperasikan sistem secara mandiri. Melalui penyediaan teknologi pengolahan air dan pelatihan pengelola lokal, program tersebut berhasil meningkatkan akses masyarakat terhadap air bersih sekaligus membentuk sistem pengelolaan yang lebih berkelanjutan. Namun demikian, keberlanjutan operasional sistem tetap sangat bergantung pada kemampuan *operator* lokal dan tata kelola kelembagaan yang dibangun selama program berlangsung^[24].

Studi pengabdian lainnya yang dilakukan pada masyarakat pesisir Desa Sungai Itik, Kabupaten Mempawah, Kalimantan Barat, menunjukkan bahwa penerapan teknologi pengolahan air laut dapat menjadi alternatif penyediaan air bersih bagi masyarakat yang mengalami keterbatasan sumber air tawar. Program tersebut berhasil meningkatkan ketersediaan air bersih untuk kebutuhan masyarakat pesisir, namun juga mengidentifikasi bahwa keberhasilan jangka panjang sistem sangat dipengaruhi oleh kegiatan pendampingan teknis, pelatihan *operator*, serta kemampuan masyarakat dalam melakukan pemeliharaan rutin terhadap instalasi yang telah dibangun^[25].

Selain itu, penerapan teknologi tepat guna untuk penyediaan air bersih pada masyarakat daerah gambut di Kecamatan Sungai Gelam, Jambi, menunjukkan bahwa keterlibatan masyarakat sejak tahap perencanaan hingga pengoperasian mampu meningkatkan tingkat penerimaan teknologi dan memperkuat keberlanjutan program. Hasil kegiatan tersebut menegaskan bahwa keberhasilan implementasi teknologi penyediaan air bersih tidak hanya ditentukan oleh aspek teknis peralatan, tetapi juga oleh kesiapan sumber daya manusia yang mengelola sistem setelah program selesai dilaksanakan^[26].

Berdasarkan berbagai studi tersebut, dapat disimpulkan bahwa keberhasilan program penyediaan air bersih di wilayah pesisir maupun daerah terpencil tidak hanya ditentukan oleh performa teknis sistem pengolahan air, tetapi juga oleh kemampuan masyarakat dalam mengoperasikan, memelihara, dan mengelola teknologi yang diterapkan^[24, 26]. Oleh karena itu, program pengabdian di Desa Mandangin dirancang tidak hanya berfokus pada pembangunan sistem SWRO portabel, tetapi juga pada

penguatan kapasitas masyarakat melalui pelatihan, pendampingan operasional, dan *transfer* pengetahuan guna menjamin keberlanjutan pemanfaatan teknologi.

2.8 | Transfer Teknologi Tepat Guna (TTG) dan Capacity Building

Teknologi Tepat Guna (TTG) merupakan pendekatan pengembangan teknologi yang menekankan kesesuaian antara teknologi dengan kebutuhan masyarakat, kondisi lingkungan, kemampuan ekonomi, serta ketersediaan sumber daya lokal. Konsep TTG menempatkan masyarakat sebagai subjek utama dalam proses pemanfaatan teknologi sehingga teknologi yang diterapkan tidak hanya mampu menyelesaikan permasalahan teknis, tetapi juga dapat dioperasikan dan dipelihara secara mandiri oleh pengguna. Berbagai program pengabdian menunjukkan bahwa penerapan TTG pada sistem penyediaan air bersih mampu meningkatkan efektivitas pemanfaatan teknologi apabila disertai dengan pelibatan aktif masyarakat selama proses implementasi^{[24], [26]}.

Sejalan dengan konsep TTG, *capacity building* atau penguatan kapasitas merupakan proses peningkatan pengetahuan, keterampilan, dan kemampuan organisasi masyarakat agar mampu mengelola teknologi secara berkelanjutan. Dalam program penyediaan air bersih, *capacity building* umumnya dilakukan melalui pelatihan teknis, penyusunan prosedur operasi standar (*Standard Operating Procedure*), pendampingan *operator* lokal, serta pembentukan kelompok pengelola. Pengalaman berbagai program pengabdian menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas masyarakat mampu memperkuat keberhasilan *transfer* teknologi, meningkatkan rasa kepemilikan (*sense of ownership*), serta menjaga keberlanjutan operasional sistem setelah program selesai dilaksanakan^[24, 25].

Dalam kegiatan pengabdian ini, konsep TTG dan *capacity building* diterapkan melalui perancangan sistem SWRO portabel yang mudah dioperasikan, penggunaan komponen yang relatif mudah diperoleh, serta pelaksanaan pelatihan pengoperasian dan pemeliharaan kepada masyarakat Desa Mandangin. Pendekatan tersebut diharapkan mampu meningkatkan kemandirian masyarakat dalam memenuhi kebutuhan air bersih sekaligus menjaga keberlanjutan operasional sistem dalam jangka panjang.

3 | METODE KEGIATAN

3.1 | Tahapan Pelaksanaan

Untuk mengatasi permasalahan spesifik mitra, yaitu keterbatasan akses terhadap air bersih dan rendahnya pemanfaatan teknologi pemurnian air di pulau Mandangin, kegiatan pengabdian Masyarakat akan dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahapan sebagai berikut:

1. **Survei dan Analisis Kebutuhan Mitra**

Tim melakukan survei langsung ke lokasi mitra untuk mengidentifikasi kondisi sumber air, kebutuhan air bersih harian, kendala yang dihadapi, serta kemampuan operasional mitra dalam pemanfaatan unit SWRO.

2. **Studi Literatur terkait *Sea Water Reverse Osmosis***

Dilakukan kajian literatur mengenai teknologi SWRO sebagai dasar penyusunan desain sistem yang sesuai dengan kebutuhan mitra, termasuk efektivitas proses desalinasi dan parameter kualitas air yang harus dipenuhi.

3. **Pembuatan Desain Sistem SWRO**

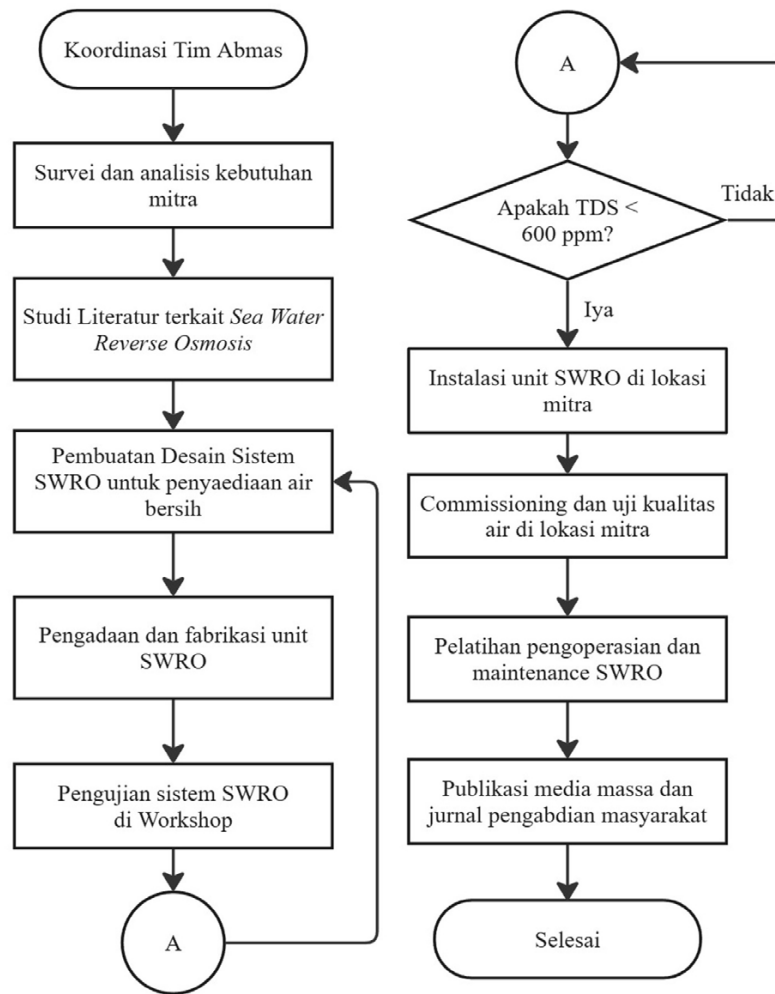
Tim merancang sistem SWRO yang dapat menyediakan air bersih dari sumber air laut, meliputi penentuan kapasitas, pemilihan komponen, spesifikasi teknis, serta rancangan instalasi yang sesuai dengan lokasi mitra.

4. **Pengadaan dan Fabrikasi Unit SWRO**

Berdasarkan desain yang telah disepakati, dilakukan proses pengadaan material dan pembuatan unit SWRO di *workshop*. Tahap ini memastikan seluruh komponen telah terpasang dan berfungsi sebelum dibawa ke lokasi.

5. **Pengujian Sistem SWRO di *Workshop***

Unit SWRO diuji fungsinya menggunakan variasi kualitas air untuk memastikan performa alat, seperti tekanan pompa, kualitas air keluaran, serta stabilitas sistem selama pengoperasian.



Gambar 3 Flowchart Metode Pelaksanaan.

6. Pengukuran TDS Output Air

Sebelum instalasi di lokasi mitra, dilakukan pemeriksaan *Total Dissolved Solid* (TDS). Apabila hasil pengujian menunjukkan nilai TDS > 600 ppm, maka dilakukan kalibrasi ulang dan optimasi unit SWRO hingga kualitas air memenuhi standar.

7. Instalasi SWRO di Lokasi Mitra

Unit SWRO yang telah lulus uji coba kemudian diinstalasi di lokasi mitra, meliputi proses pemasangan sistem perpipaan, listrik, serta integrasi dengan sumber air setempat.

8. Commissioning dan Uji Kualitas Air

Setelah instalasi, dilakukan *commissioning* untuk memastikan unit beroperasi secara optimal dalam kondisi lingkungan nyata. Pengujian kualitas air dilakukan untuk membuktikan bahwa hasil air telah memenuhi standar kelayakan konsumsi.

9. Pelatihan Pengoperasian dan Maintenance SWRO

Tim memberikan pelatihan kepada mitra mengenai cara pengoperasian, perawatan rutin, *troubleshooting*, serta prosedur keselamatan dalam menjalankan unit SWRO agar keberlanjutan program dapat terjaga.

10. Publikasi Media Massa dan Jurnal Pengabdian

Sebagai bentuk diseminasi hasil kegiatan, dilakukan publikasi melalui media massa dan penyusunan artikel ilmiah untuk jurnal pengabdian masyarakat agar manfaat kegiatan dapat diketahui lebih luas.

3.2 | Partisipasi Mitra

Mitra akan terlibat secara aktif dalam pelaksanaan kegiatan pengabdian dengan tanggung jawab sebagai berikut:

1. Penyediaan lokasi pemasangan alat
2. Koordinasi kebutuhan logistik selama proses instalasi dan pelatihan
3. Seleksi warga yang akan menjadi *operator* alat
4. Proses pelaporan kondisi alat pasca instalasi

3.3 | Evaluasi dan Keberlanjutan Program

Pendekatan sosial dalam pembentukan pengelola sistem SWRO ini dilakukan melalui serangkaian kegiatan bersama mitra, yaitu Pondok Pesantren Al-Hasaniyah. Proses diawali dengan pembukaan jalur komunikasi langsung antara tim pengusul dan pihak pesantren sebagai mitra utama, dilanjutkan dengan kegiatan survei lapangan untuk mengidentifikasi kebutuhan dan kondisi eksisting sumber air di lingkungan pesantren. Berdasarkan hasil survei, tim kemudian mengadakan musyawarah bersama perwakilan pesantren untuk menyepakati mekanisme pengelolaan, pembagian peran, serta rencana keberlanjutan operasional alat SWRO secara mandiri oleh mitra sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Dokumentasi Survey Lapangan

Sementara evaluasi program dilakukan untuk mengukur efektivitas dan keberlanjutan dari sistem SWRO, melalui:

1. Kuesioner kepuasan dan wawancara mendalam dengan masyarakat penerima manfaat
2. Pemeriksaan data volume air hasil pemurnian
3. Pemeriksaan kadar TDS pada air hasil *reverse osmosis*
4. Evaluasi teknis dengan interval 1 minggu sekali selama 3 minggu. Setelah masa evaluasi selesai, mitra masyarakat yang telah dilatih akan melanjutkan pengoperasian dan pemeliharaan alat secara mandiri. Tim pengusul juga akan membuka kanal komunikasi daring untuk konsultasi teknis pasca kegiatan.

3.4 | Peran dan Tugas Tim Pengabdian

Tim pengabdian terdiri dari dosen pembimbing dan mahasiswa yang masing-masing memiliki peran penting dalam keberhasilan kegiatan. Berikut adalah uraian peran dan tugas anggota tim:

1. Dosen Peserta Pengabdian Masyarakat

Dosen bertanggung jawab dalam perancangan teknis dan pengawasan keseluruhan program, termasuk pengembangan sistem desalinasi, pengujian kualitas air, serta memberikan bimbingan kepada mahasiswa selama seluruh rangkaian kegiatan. Dosen juga akan melakukan evaluasi teknis terhadap hasil sistem SWRO yang diterapkan dan memastikan sistem berjalan sesuai dengan standar yang telah ditetapkan.

2. Mahasiswa

Mahasiswa bertanggung jawab dalam pelaksanaan kegiatan lapangan, termasuk survei kondisi awal, instalasi alat SWRO, dan pengujian hasil desalinasi. Mahasiswa juga akan dilibatkan dalam pelatihan masyarakat terkait penggunaan dan pemeliharaan alat, serta dalam pembentukan dokumentasi kegiatan untuk evaluasi dan laporan akhir. Mahasiswa akan mengumpulkan data untuk evaluasi program dan memberikan umpan balik untuk perbaikan sistem.

4 | HASIL DAN DISKUSI

Luaran utama dari kegiatan ini adalah keberhasilan perakitan dan pengujian awal unit *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) portabel. Evaluasi kinerja dilakukan untuk menilai kemampuan sistem dalam menurunkan nilai *Total Dissolved Solid* (TDS), menghasilkan debit *permeate* yang stabil, serta memberikan gambaran konsumsi energi pada skala operasi masyarakat. Pengujian dilakukan menggunakan air umpan dengan TDS sebesar 8480 ppm, tekanan operasi pompa 20 bar, dan debit *permeate* rata-rata 1,66 L/menit.

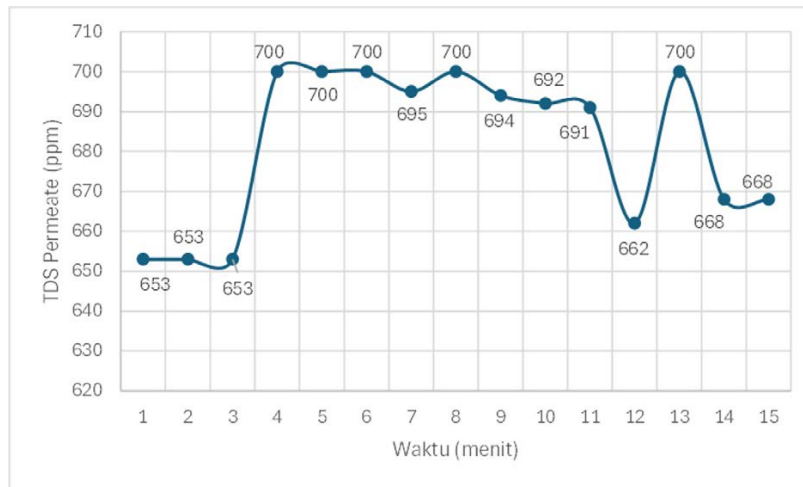
Tabel 2 Hasil pengujian alat SWRO di workshop

TDS Feed (ppm)	Menit ke <i>running</i>	TDS <i>permeate</i> (ppm)
8480	1	653
	2	653
	3	653
	4	700
	5	700
	6	700
	7	695
	8	700
	9	694
	10	692
	11	691
	12	662
	13	700
	14	668
	15	668

Berdasarkan Tabel 2, diperoleh rata-rata TDS 681.93 ppm, yang mana termasuk dalam kategori *fair* menurut WHO^[6]. Dari air *feed* 8480 ppm menjadi 681.93 ppm menunjukkan *rejection rate* sebesar 92%, dengan debit *permeate* yang dihasilkan sebesar 1.66 L/min. Nilai ini menunjukkan bahwa sistem SWRO portabel mampu menurunkan kadar padatan terlarut secara signifikan.

Pada Gambar 5 menunjukkan bahwa nilai TDS *permeate* relatif stabil selama 15 menit pengujian, meskipun terdapat fluktuasi pada menit ke-4 hingga ke-13. TDS *permeate* awal berada pada 653 ppm selama tiga menit pertama, kemudian meningkat hingga 700 ppm dan kembali menurun hingga 668 ppm pada akhir pengujian. Fluktuasi ini dapat dipengaruhi oleh kestabilan

tekanan operasi, kondisi awal membran, dan dinamika aliran pada sisi *reject*. Secara umum, data ini menunjukkan bahwa sistem telah bekerja secara fungsional dengan performa pemisahan garam yang masih dinilai *fair* oleh WHO^[6].



Gambar 5 Grafik TDS permeate selama 15 menit pengujian sistem SWRO.

a. Meningkatkan Akses Air Bersih dan Penghematan Biaya Rumah Tangga

Ketersediaan air bersih yang layak konsumsi merupakan persoalan utama di Desa Mandangin. Sebelum adanya sistem SWRO portabel, masyarakat perlu membeli air galon dengan harga sekitar Rp25.000 per galon. Apabila kebutuhan air diasumsikan sebesar 5 galon per hari, maka kebutuhan bulanan mencapai 150 galon. Dengan volume 19 liter per galon, kebutuhan tersebut setara dengan 2850 liter atau 2,85 m³ per bulan.

$$\text{Volume air} = 150 \text{ galon/bulan} \times 19 \text{ liter/galon} = 2850 \text{ liter/bulan} = 2,85 \text{ m}^3/\text{bulan}$$

$$\text{Waktu operasi} = 2850 \text{ liter} \div 1,66 \text{ liter/menit} = 1716,87 \text{ menit} \approx 29 \text{ jam}$$

Dengan debit *permeate* sebesar 1,66 L/menit, sistem SWRO portabel perlu dioperasikan sekitar 29 jam untuk memenuhi kebutuhan air sebesar 2,85 m³ per bulan. Jika tarif listrik yang digunakan adalah Rp1.352/kWh dan daya pompa sebesar 0,45 kW, maka biaya listrik untuk produksi air bersih selama satu bulan adalah sebagai berikut.

$$\text{Biaya listrik produksi} = 0,45 \text{ kW} \times 29 \text{ jam} \times \text{Rp}1.352/\text{kWh} = \text{Rp}17.643,60$$

Perhitungan tersebut menunjukkan bahwa biaya energi listrik untuk produksi air menggunakan sistem SWRO portabel relatif rendah dibandingkan biaya pembelian air galon. Pada skenario kebutuhan 150 galon per bulan, biaya pembelian air dapat mencapai Rp3.750.000 per bulan. Dengan demikian, sistem SWRO portabel berpotensi mengurangi beban biaya air bersih masyarakat, meskipun analisis ekonomi lengkap masih perlu memasukkan biaya penggantian filter, membran, perawatan, dan depresiasi alat.

Selain biaya listrik bulanan, parameter penting untuk mengevaluasi klaim hemat energi adalah konsumsi energi spesifik atau *Specific Energy Consumption* (SEC). SEC menyatakan jumlah energi listrik yang diperlukan untuk menghasilkan satu meter kubik air produk. Pada sistem SWRO portabel ini, SEC dihitung berdasarkan daya pompa dan debit *permeate* hasil pengujian.

$$Q_p = 1,66 \text{ L/menit} \times 60 \div 1000 = 0,0996 \text{ m}^3/\text{jam}$$

$$\text{SEC} = P/Q_p = 0,45 \text{ kW} / 0,0996 \text{ m}^3/\text{jam} = 4,52 \text{ kWh/m}^3$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa SEC sistem SWRO portabel pada mode produksi air adalah 4,52 kWh/m³. Nilai ini menjadi dasar kuantitatif untuk menilai efisiensi energi sistem. Apabila kebutuhan *flushing* membran diperhitungkan, yaitu sekitar 48 kali pembilasan per bulan dengan kebutuhan air *permeate* 15 liter per pembilasan, maka tambahan volume *permeate* untuk *flushing* adalah 720 liter. Dengan debit 1,66 L/menit, kebutuhan waktu operasi tambahan untuk *flushing* adalah sekitar 7,3 jam per bulan.

$$\text{Energi total} = 0,45 \text{ kW} \times (29 \text{ jam} + 7,3 \text{ jam}) = 16,34 \text{ kWh/bulan}$$

$$\text{SEC total operasional} = 16,34 \text{ kWh} \div 2,85 \text{ m}^3 = 5,73 \text{ kWh/m}^3$$

Dengan memasukkan kebutuhan *flushing*, SEC operasional meningkat dari 4,52 kWh/m³ menjadi 5,73 kWh/m³. Kenaikan ini menunjukkan bahwa strategi operasi dan perawatan membran memiliki pengaruh langsung terhadap efisiensi energi sistem. Oleh karena itu, optimasi interval *flushing*, stabilitas tekanan operasi, dan peningkatan debit *permeate* menjadi aspek penting untuk pengembangan alat berikutnya.

Tabel 3 Perbandingan kuantitatif konsumsi energi sistem SWRO tanpa ERD

Parameter	SWRO portabel hasil fabrikasi	SWRO Konvensional ^[21]
<i>Energy recovery device</i>	Tidak digunakan	Tidak digunakan
Tekanan operasi/HP <i>pumping</i>	20 bar	64 bar
Daya pompa/HP <i>pumping</i>	0,45 kW	4,64 kW
Debit <i>permeate</i> /produk	1,66 L/menit	1,00 m ³ /jam
Debit <i>permeate</i> /produk	0,0996 m ³ /jam	24,00 m ³ /hari
Energi total proses	10,80 kWh/hari	150,26 kWh/hari
Energi HP <i>pumping</i>	-	111,40 kWh/hari
Kontribusi HP <i>pumping</i>	-	74,16% total energi
SEC produksi	4,52 kWh/m ³	6,26 kWh/m ³
SEC dengan <i>flushing</i>	5,73 kWh/m ³	6,26 kWh/m ³
Selisih SEC produksi	27,8% lebih rendah	-
Selisih SEC dengan <i>flushing</i>	8,5% lebih rendah	-

Perbandingan energi dilakukan pada basis teknologi yang setara, yaitu sistem tanpa *energy recovery device* (ERD). Pada Tabel menyajikan konsumsi energi proses RO tanpa ERD dengan tekanan *high-pressure pumping* 64 bar, kebutuhan energi total 150,26 kWh/hari, dan SEC sebesar 6,26 kWh/m³. Komponen *high-pressure pumping* menjadi beban energi terbesar, yaitu 111,4 kWh/hari atau 74,16% dari total energi proses. Data tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan energi pada sistem RO tanpa ERD sangat didominasi oleh proses pembangkitan tekanan tinggi^[21].

Dibandingkan dengan pembanding tanpa ERD tersebut, sistem SWRO portabel hasil fabrikasi memiliki SEC produksi sebesar 4,52 kWh/m³, atau sekitar 27,8% lebih rendah daripada nilai 6,26 kWh/m³ pada Gude (2011). Apabila kebutuhan *flushing* dimasukkan, SEC operasional meningkat menjadi 5,73 kWh/m³, tetapi masih sekitar 8,5% lebih rendah daripada pembanding tanpa ERD. Dengan demikian, klaim hemat energi dapat dinyatakan berdasarkan perbandingan kuantitatif SEC pada basis sistem tanpa ERD, dengan catatan bahwa efisiensi total masih dapat ditingkatkan melalui optimasi interval *flushing*, peningkatan debit *permeate*, pengaturan tekanan operasi, dan pemilihan pompa dengan efisiensi lebih tinggi.

b. Memberdayakan Masyarakat dalam Pengelolaan Teknologi

Selain memberikan solusi teknis terhadap kebutuhan air bersih, kegiatan ini juga berfokus pada aspek penguatan kapasitas masyarakat melalui pendekatan pemberdayaan teknologi. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem SWRO yang telah diinstalasi dapat dimanfaatkan secara berkelanjutan dan tidak bergantung sepenuhnya pada tim pengabdian. Pemberdayaan ini menjadi bagian penting dalam mendukung kemandirian masyarakat dalam memenuhi kebutuhan dasar kehidupannya, terutama dalam penyediaan air bersih.

Proses pemberdayaan dilakukan secara bertahap, mencakup kegiatan edukasi, pelatihan teknis, serta pendampingan operasional. Tim memberikan pemahaman tentang prinsip dasar teknologi SWRO, alasan pemilihan teknologi tersebut, serta manfaat jangka panjang bagi masyarakat. Edukasi ini bertujuan meningkatkan literasi teknologi di tingkat lokal sehingga masyarakat dapat lebih mudah menerima inovasi yang diberikan.

Selanjutnya, pelatihan teknis difokuskan pada keterampilan pengoperasian sistem SWRO secara mandiri. Operator lokal dipilih dari masyarakat setempat dan diberikan pengajaran mengenai:

- (a) Prosedur *start-up* dan *shutdown* unit SWRO
- (b) Pemantauan parameter penting seperti tekanan operasi, TDS
- (c) Prosedur sanitasi dan pembersihan filter secara berkala
- (d) Penanganan gangguan teknis ringan (*troubleshooting*)
- (e) Pencatatan *logsheet* produksi air untuk evaluasi operasional

Dengan keterampilan tersebut, masyarakat mampu menjaga performa sistem agar tetap optimal serta meminimalkan risiko kerusakan dini pada peralatan. Selain pelatihan operasional, pendampingan terkait manajemen operasional dan biaya juga diberikan kepada perwakilan masyarakat. Dampak dari kegiatan pemberdayaan ini terlihat pada meningkatnya rasa tanggung jawab, kemandirian, dan partisipasi masyarakat. Mereka tidak hanya menjadi pengguna akhir teknologi, tetapi juga menjadi bagian aktif dalam perawatannya. Rekap hasil dari pelatihan ditunjukkan pada tabel 4.

Tabel 4 Hasil evaluasi pelatihan *capacity building*

No	Materi Pelatihan	Jumlah Peserta	Skor <i>Pre-test</i> (Kognitif)	Skor <i>Post-test</i> (Kognitif)	Peningkatan Kognitif (%)	Tingkat Kelulusan Praktik (%)
1	Prosedur <i>start-up</i> dan <i>shutdown</i> unit SWRO	8	45.8	87.5	90.9	87.5
2	Pemantauan parameter penting (tekanan operasi, TDS)	8	45.8	79.2	72.7	87.5
3	Prosedur sanitasi dan pembersihan filter secara berkala	8	66.7	95.8	43.8	87.5
4	Penanganan gangguan teknis ringan (<i>troubleshooting</i>)	8	50.0	75.0	50.0	87.5
5	Pencatatan <i>logsheet</i> produksi air untuk evaluasi operasional	8	50.0	91.7	83.3	87.5
Rata-rata Kumulatif		8	51.7	85.8	66.1	87.5

Keberhasilan ini menunjukkan bahwa *transfer* teknologi berjalan efektif dan memberikan fondasi kuat terhadap keberlanjutan pemanfaatan unit SWRO dalam jangka panjang.

Pada pengujian yang dilakukan pada alat SWRO yang telah dilakukan perakitan, sampel yang digunakan adalah air asin dengan parameter *Total Dissolved Solid* (TDS) sebesar 8480 ppm. Selama pengujian, dapat diamati proses yang terjadi pada umpan air pada sistem SWRO bahwa aliran umpan (*feed*) dari air keruh yang memiliki TDS tinggi masuk kedalam pompa dengan tekanan *discharge* yang diatur nilainya dengan memanipulasi bukaan pada katup bagian *reject flow discharge* dengan bukaan 60%. Tekanan *discharge* yang dihasilkan adalah 20 bar. Air memasuki membran SWRO dan mengalami penyaringan sebelum akhirnya akan keluar sebagai *permeate* dari membran melalui *perforated tube*. Selain itu, air juga akan keluar sebagai *reject flow*.

Berdasarkan hasil pengujian alat SWRO yang telah dilakukan, pengujian dengan menggunakan air dengan nilai TDS 8480 ppm menghasilkan hasil air permeate dengan rata-rata TDS 619 ppm dan hasil *reject* dengan TDS 8480 ppm. Rentang waktu

pengujian adalah 15 menit dengan laju aliran air adalah 1,66 L/m dan tekanan operasi pompa pada 20 bar. Berdasarkan hasil pengujian yang telah didapatkan tersebut, nilai akhir TDS 680 ppm masih belum cukup aman untuk menjadi air minum dengan kualitas yang telah ditetapkan oleh Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 2 tahun 2023 yaitu dibawah 500 ppm, namun angka TDS tersebut masih tergolong relatif aman diminum mengacu pada penggolongan tingkat kualitas air menurut WHO dengan rentang 600-900 ppm tergolong *fair*.



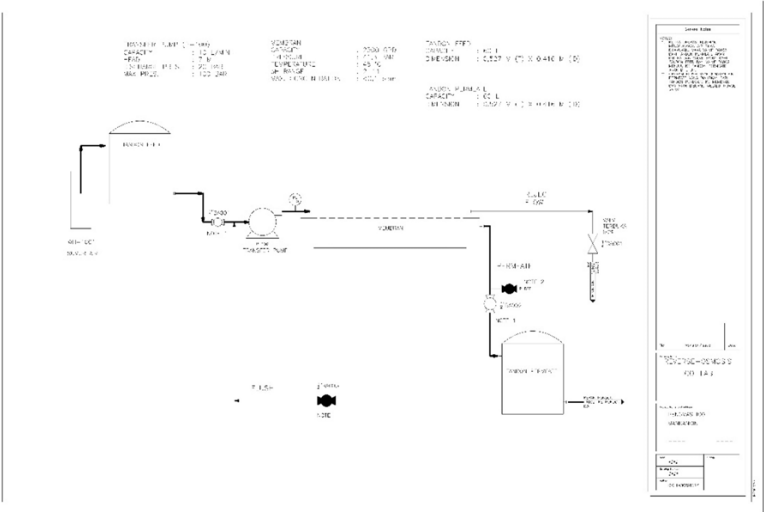
Gambar 6 (a) Hasil TDS saat penyerahan alat; (b) Sesi Dokumentasi Penyerahan Alat.

5 | KESIMPULAN DAN SARAN

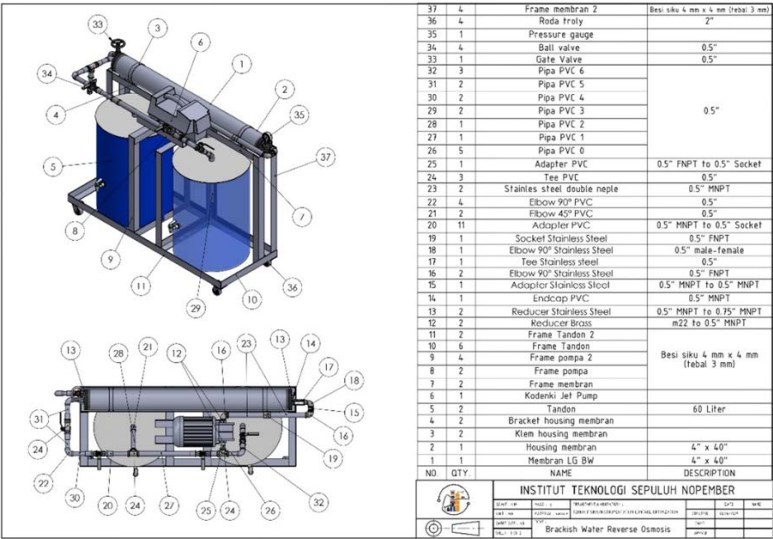
Berdasarkan rangkaian kegiatan pengabdian masyarakat pulau Mandangin, didapatkan kesimpulan bahwa mitra pengabdian masyarakat memiliki permasalahan dalam akses sumber air bersih dan minimnya pemanfaatan teknologi pemurnian air untuk kebutuhan air minum masyarakat dari mitra. Telah disusun metode terstruktur yang mencakup kegiatan survei lapangan, perancangan dan perakitan alat *Sea Water Reverse Osmosis*, melakukan instalasi dan pelatihan kepada masyarakat terkait teknis alat yang telah dirancang, dan melakukan evaluasi terkait alat yang telah terpasang. Berdasarkan hasil survei, ditemukan bahwa TDS air di lokasi pengabdian masyarakat memiliki TDS sebesar 8480 yang selanjutnya dijadikan sampel untuk pengujian alat SWRO. Pada tahap pengujian alat SWRO, dicapai *rejection rate* sebesar 92%, dari air dengan TDS 8480 ppm sebagai *feed* menjadi air *permeate* dengan rata-rata sebesar 680 ppm. Dari hasil tersebut, disimpulkan bahwa TDS pada *permeate* belum memenuhi standar TDS air minum menurut Permenkes No 2 tahun 2023 yaitu kurang dari 500 ppm, namun masih dikatakan berada dalam rentang *fair* jika mengacu pada rentang yang ditetapkan WHO. Hasil pelatihan *capacity building* menunjukkan bahwa seluruh peserta dari kelompok mitra Pondok Pesantren Al-Hasaniyah berhasil mencapai tingkat kelulusan evaluasi praktik sebesar 87,5% pada semua materi SOP operasional. Rata-rata peningkatan kognitif peserta mencapai 66,1% dengan skor *post-test* kumulatif sebesar 85,8, mengindikasikan adanya adopsi teknologi yang signifikan oleh *operator* lokal yang ditunjuk. Capaian ini menjadi indikator terukur bahwa sumber daya manusia mitra telah memiliki kompetensi dasar yang memadai untuk menjalankan dan memelihara sistem SWRO secara mandiri pasca-kegiatan.

Sebagai saran strategis, pengembangan unit SWRO portabel berikutnya perlu memperhatikan aspek keberlanjutan lingkungan melalui perancangan sistem penanganan atau pemanfaatan limbah *brine*/air pekat agar pembuangannya tidak menyebabkan peningkatan salinitas lokal di sekitar lokasi penerapan, limbah *brine* dari unit SWRO portabel tidak hanya perlu dikelola agar tidak mencemari ekosistem pantai dangkal, tetapi juga dapat dikaji sebagai potensi sumber daya melalui integrasi dengan unit pemekatan garam. Pendekatan ini sejalan dengan konsep *brine valorization*, yaitu pemanfaatan kembali *brine* desalinasi untuk pemulihan garam atau mineral, meskipun pada sistem ini masih diperlukan peningkatan konsentrasi *brine* karena TDS *reject* hasil pengujian belum cukup tinggi untuk langsung dikristalisasi menjadi garam. Selain itu, studi lanjutan juga disarankan untuk mengintegrasikan unit SWRO portabel dengan sistem hibrida PLTS lokal agar operasional alat menjadi lebih mandiri, hemat energi, dan sesuai untuk diterapkan pada wilayah pulau kecil yang memiliki keterbatasan akses listrik dan air bersih.

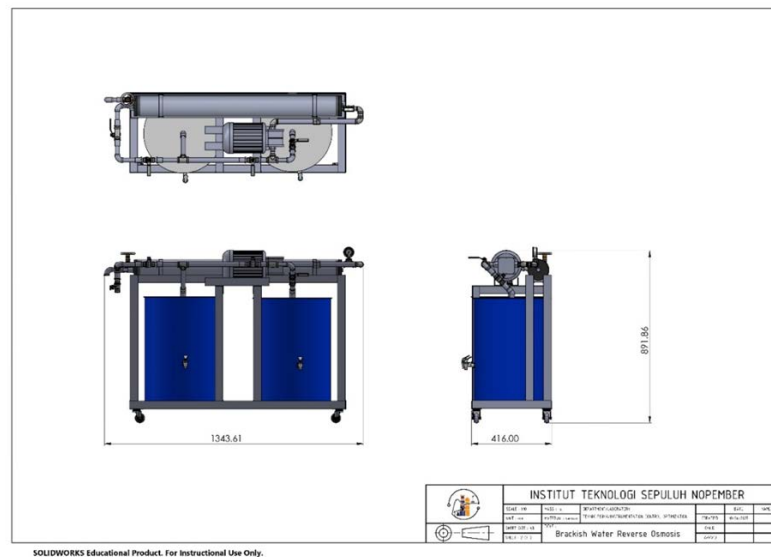
6 | LAMPIRAN



Gambar 7 PFD Alat SWRO.



Gambar 8 3D Drawing dari Prototipe.



Gambar 9 3D Drawing dari Prototipe.

7 | UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Pondok Pesantren Al-Hasaniyah dan masyarakat Desa Mandangin, Pulau Madura, atas dukungan, kerja sama, serta partisipasi aktif dalam implementasi dan pemanfaatan sistem *Sea Water Reverse Osmosis* (SWRO) pada kegiatan pengabdian masyarakat ini. Keterlibatan para santri, pengelola pesantren, dan warga setempat dalam proses pelatihan serta operasional perangkat sangat membantu keberhasilan kegiatan dan keberlanjutan program.

Penghargaan juga disampaikan kepada institusi, mitra pendanaan, serta seluruh tim pelaksana yang telah berkontribusi dalam perencanaan, instalasi, dan evaluasi sistem secara langsung maupun tidak langsung. Semoga program ini memberikan manfaat nyata bagi ketersediaan air bersih dan peningkatan kualitas hidup masyarakat di wilayah tersebut.

Referensi

1. Badan Pusat Statistik Kabupaten Sampang. Badan Pusat Statistik Kabupaten Sampang; 2025. <https://sampangkab.bps.go.id/#:~:text=TAHUKAH%20ANDA%3F%20Pulau%20Mandangin%20atau%20sering%20dikenal%20dengan,luas%20wilayah%201%2C67%20km2%20dan%20dihuni%2019.570%20jiwa>, diakses 10 April 2025.
2. Asid NJ, Pengelolaan Air Minum di Kawasan Pulau Studi Kasus: Pengelolaan Air Minum dengan Sistem Sea Water Reverse Osmosis (SWRO) di Pulau Mandangin Kecamatan Sampang, Kabupaten Sampang. Surabaya; 2016.
3. Wedi A, Meski Punya SWRO, Warga Pulau Mandangin Belum Menikmati Air Bersih; 2020. <https://maduraindepth.com/meski-punya-swro-warga-pulau-mandangin-belum-menikmati-air-bersih>, diakses 29 Januari 2024. Madura Indepth.
4. Ariyanti D, Widiasta IN. Aplikasi Teknologi Reverse Osmosis untuk Pemurnian Air Skala Rumah Tangga. TEKNIK 2011;32(3):193–198.
5. Huang S, Wang X, Li J, Liu J, Wang B. Design and Energy Consumption Analysis of Small Reverse Osmosis Seawater Desalination Equipment. Energies 2021;14(8):2275. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/8/2275>.
6. World Health Organization. Total dissolved solids in drinking-water: Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-water Quality. Geneva: World Health Organization; 2003.

7. Al-Karaghoul A, Kazmerski LL. Energy consumption and water production cost of conventional and renewable-energy-powered desalination processes. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013;24:343–356.
8. Huang S, Wang X, Li J, Liu J, Wang B. Design and energy consumption analysis of small reverse osmosis seawater desalination equipment. *Energies* 2021;14(8):2275.
9. Ariyanti D, Widiasta IN. Aplikasi teknologi reverse osmosis untuk pemurnian air skala rumah tangga. *Jurnal Teknik Undip* 2011;32(3):193–198.
10. Purwandari TW, Kazama S, Takizawa S. Water consumption analysis of small islands supplied with desalinated water in Indonesia. *JSCE Journal of Environmental Engineering* 2021;77(7):III–129–III–140. https://www.jstage.jst.go.jp/article/jscej/77/7/77_III_129/_pdf.
11. Garud RM, Kore SV, Kore VS, Kulkarni GS. A Short Review on Process and Application of Reverse Osmosis. *Universal Journal of Environmental Research and Technology* 2011;1(3):233–238.
12. Tayeh YA. A comprehensive review of reverse osmosis desalination: Technology, water sources, membrane processes, fouling, and cleaning. *Desalination and Water Treatment* 2024;320.
13. Qrenawi LI, Abuhabib AA. A review on sources, types, mechanisms, characteristics, impacts and control strategies of fouling in RO membrane systems. *Desalination and Water Treatment* 2020;208:43–69.
14. Fonseca-Teodoro P, Dunlop J, Gagen E, Purtill J. A review and comparison of approaches to treat coal mine affected water in Queensland. Brisbane: Office of the Queensland Mine Rehabilitation Commissioner; 2022.
15. Budiyo, Buchori L. The Performance of Reverse Osmosis in Water Treatment. *Jurnal Teknik Universitas Diponegoro* 2008;29(1).
16. Kementerian Kesehatan Republik Indonesia. Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia Nomor 2 Tahun 2023 Tentang Peraturan Pelaksanaan Peraturan Pemerintah Nomor 66 Tahun 2014 Tentang Kesehatan Lingkungan. Jakarta; 2023.
17. Mansida A, Mut L, Irmawati I. Pengaruh variasi panjang pipa isap flushing conduit terhadap volume penggelontoran sedimen di waduk (uji eksperimental). *Jurnal Teknik Hidro* 2018;11(2):26–37.
18. DuPont Water Solutions. FilmTec™ Reverse Osmosis Membranes Technical Manual. DuPont, Wilmington, DE, USA; 2025.
19. Mito M, Mitra M. Reverse osmosis (RO) membrane desalination driven by renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2019;.
20. Djajadiwinata E, Kitamura T, Saito T. Numerical and One-Dimensional Studies of Supersonic Ejector Performance. *Applied Sciences* 2021;11(7):3245.
21. Gude VG. Energy consumption and recovery in reverse osmosis. *Desalination and Water Treatment* 2011;36(1–3):239–260.
22. Ortwerth PJ. On the Rational Design of Compressible Flow Ejectors. Air Force Weapons Laboratory, NASA; 1979.
23. Metsue A, Lemort V, Quoilin S. An Improved Thermodynamic Model for Supersonic Real-Gas Ejectors. *International Journal of Refrigeration* 2022;136:152–163.
24. Febriani Y, et al. Peningkatan Kapasitas Desa Bangun Purba sebagai Desa Mandiri Air Bersih Berkelanjutan. E-Dimas: Jurnal Pengabdian kepada Masyarakat 2020;.
25. Danial MM, et al. Pengolahan Air Laut untuk Bisnis Air Minum Isi Ulang untuk Masyarakat Pesisir Desa Sungai Itik. Jurnal Pengabdian dan Pemberdayaan Masyarakat 2022;.
26. Naswir M, Johari A, Ilfan F. Penerapan Teknologi Tepat Guna untuk Penyediaan Air Bersih Masyarakat Daerah Gambut. Universitas Jambi; 2020.

Cara mengutip artikel ini: Biyanto, T. R., Darwito, P. A., Pratama, D. Y., Nugroho, G., Lelono W, B., Aisjah, A. S., Indriawati, K., Suyanto, Musyafa, A., Haksoro, T., Indrasandi, Y. A., Hidayat, G. A. R., Putri, S. R., Thoyyibi, M., Hanafi, T. A., Putri, S. E., Maulana, A. Z., Munawir, K. N., Maylaffaira, D., Shafi, H. S., Satriatama, I. D. G. P., (2026), Pemberdayaan Masyarakat Desa Mandangin Melalui Pembuatan dan Instalasi SWRO Dalam Membantu Pemenuhan Kebutuhan Air Bersih, *Sewagati*, 10(4):717–752, <https://doi.org/10.12962/j26139960.v10i4.9570>.