

## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Panel Surya



Gambar 2. 1 Panel Surya

Panel surya, atau lebih tepat disebut panel *photovoltaic* (PV), adalah perangkat yang mengonversi energi cahaya matahari menjadi listrik melalui efek fotolistrik. Teknologi ini telah berkembang pesat sejak penemuan sel surya pertama pada 1954 oleh Bell Laboratories, dan kini menjadi sumber energi terbarukan utama di seluruh dunia. Panel surya dibuat dari sel-sel semikonduktor (umumnya silikon) yang disusun dalam modul. Jenis - jenis panel surya dibedakan berdasarkan bahan, proses pembuatan, dan struktur, yang memengaruhi efisiensi, biaya, dan aplikasi.

##### 2.1.1 Jenis – Jenis Panel Surya

Berikut adalah penjelasan mengenai jenis-jenis panel surya utama. Saya akan membahas prinsip dasar, kelebihan, kekurangan, serta perbandingan untuk memudahkan pemahaman. Data efisiensi dan biaya bersifat umum berdasarkan laporan International Renewable Energy Agency (IRENA, 2023) dan Green et al. (2023), yang dapat bervariasi tergantung produsen.

###### 1. Panel Surya *Monocrystalline*

Jenis ini dibuat dari silikon kristal tunggal yang ditarik dari batang silikon murni melalui proses Czochralski. Sel surya memiliki tampilan hitam seragam dan bentuk persegi panjang dengan sudut membulat. Proses pembuatannya rumit dan memerlukan silikon berkualitas tinggi, sehingga efisiensinya paling tinggi di antara

jenis kristalin.



Gambar 2. 2 Solar Panel *Monocrystalline*

Efisiensi: 18-22% (bisa mencapai 25% pada model premium).

Kelebihan:

- Efisiensi tinggi, cocok untuk ruang terbatas (misalnya atap rumah).
- Performa baik di suhu tinggi dan kondisi rendah cahaya.
- Umur panjang (25-30 tahun) dengan degradasi rendah (0.5% per tahun).

Kekurangan:

- Biaya produksi tinggi karena pemborosan silikon (sampah dari pemotongan kristal).
- Kurang fleksibel untuk aplikasi non-standar.

Aplikasi: Ideal untuk instalasi residensial, komersial, atau sistem off - grid seperti panel surya untuk *Reverse Osmosis* (RO) di daerah terpencil, di mana efisiensi tinggi diperlukan untuk memaksimalkan output daya (misalnya 300 Wp dari luas 1,5 m<sup>2</sup>).

Contoh Produk: Panel dari SunPower atau LG, dengan harga sekitar Rp 3-5 juta per 300 Wp.

## 2. Panel Surya *Polycrystalline*

Dibuat dari silikon kristal ganda (polikristal) yang dicairkan dan dituang ke dalam cetakan persegi. Sel surya memiliki tampilan biru keabu-abuan dengan pola kristal yang terlihat. Prosesnya lebih sederhana daripada *monocrystalline*, sehingga lebih murah.



Gambar 2. 3 Solar Panel *Polycrystalline*

Efisiensi: 15-18%.

Kelebihan:

- Biaya lebih rendah (20-30% lebih murah daripada *monocrystalline*).
- Proses produksi ramah lingkungan karena limbah silikon lebih sedikit.
- Ukuran panel lebih besar, cocok untuk instalasi skala besar.

Kekurangan:

- Efisiensi lebih rendah, memerlukan luas permukaan lebih besar untuk output sama.
- Performa menurun lebih cepat di suhu tinggi dibandingkan *monocrystalline*.
- Umur sekitar 20-25 tahun dengan degradasi 0.7-1% per tahun. Aplikasi: Digunakan untuk proyek skala besar seperti pembangkit listrik surya (solar farm) atau sistem RO komunitas di pedesaan, di mana biaya menjadi prioritas utama. Contoh Produk: Panel dari Canadian Solar atau Trina Solar, harga sekitar Rp 2-3,5 juta per 300 Wp.

### 3. Panel Surya Thin-Film (Film Tipis)

Jenis ini menggunakan lapisan tipis (1-2 mikrometer) dari bahan semikonduktor seperti cadmium telluride (CdTe), copper indium gallium selenide (CIGS), atau amorphous silicon (a-Si), yang didepositkan pada substrat kaca, plastik, atau logam melalui proses vakum atau printing. Tidak bergantung pada silikon kristal, sehingga lebih ringan dan fleksibel.



Gambar 2. 4 Solar Panel Thin-Film

Efisiensi: 10-13% (CdTe dan CIGS bisa mencapai 15-18% pada model terbaru).

Sub-jenis Utama:

- CdTe (Cadmium Telluride): Efisiensi 18-22%, murah untuk produksi massal, tapi mengandung cadmium (racun).
- CIGS (Copper Indium Gallium Selenide): Efisiensi hingga 23%, fleksibel dan tahan korosi, cocok untuk aplikasi outdoor.
- Amorphous Silicon (a-Si): Efisiensi 6-12%, paling murah dan ringan, tapi degradasi cepat (Staebler-Wronski effect).

Kelebihan:

- Ringan, fleksibel, dan tahan terhadap bayangan parsial atau suhu ekstrem.
- Biaya produksi rendah (bisa 30-50% lebih murah daripada kristalin). Performa baik di kondisi cahaya rendah (misalnya pagi/sore hari).

Kekurangan:

- Efisiensi rendah, memerlukan luas lebih besar.
- Umur lebih pendek (10-20 tahun) dan degradasi lebih tinggi (1-2% per tahun).
- Beberapa sub-jenis (seperti CdTe) memiliki isu lingkungan karena bahan beracun.

Aplikasi: Cocok untuk struktur fleksibel seperti tenda, kendaraan, atau integrasi bangunan (BIPV). Untuk RO, thin-film CIGS bisa digunakan di lokasi dengan ruang terbatas tapi cahaya variabel, meskipun kurang umum karena efisiensi rendah.

Contoh Produk: Panel First Solar (CdTe) atau MiaSole (CIGS), harga Rp 1,5-2,5 juta per 300 Wp.

#### 4. Panel Surya Bifacial

Panel surya bifacial adalah panel yang dapat menghasilkan listrik dari kedua sisi, baik sisi depan yang menghadap langsung ke matahari maupun sisi belakang yang menangkap cahaya pantulan atau difusi dari permukaan di bawahnya, seperti tanah, salju, atau atap berwarna terang. Teknologi ini menjadi salah satu inovasi yang paling menonjol di bidang tenaga surya, menawarkan peningkatan efisiensi dan hasil energi.



Gambar 2. 5 Solar Panel Bifacial

##### Cara kerja panel bifacial

- Penyerapan sisi depan: Sama seperti panel konvensional (monofacial), sisi depan panel bifacial menyerap sinar matahari langsung dan mengubahnya menjadi listrik melalui sel fotovoltaik.
- Penyerapan sisi belakang: Sisi belakang panel ini terbuat dari kaca transparan, bukan lapisan buram. Ini memungkinkan cahaya yang dipantulkan dari permukaan di bawahnya (dikenal sebagai efek albedo) untuk masuk dan diserap oleh sel-sel fotovoltaik yang ada di sisi belakang.

##### Kelebihan panel bifacial

- Peningkatan hasil energi: Dapat menghasilkan 5% hingga 30% lebih banyak daya daripada panel monofacial, tergantung kondisi pemasangan dan reflektivitas permukaan.
- Kinerja optimal pada kondisi tertentu: Menghasilkan energi tambahan dari cahaya sekitar, menjadikannya ideal di area bersalju, berpasir, atau saat cuaca mendung.
- Daya tahan lebih baik: Kebanyakan panel bifacial menggunakan konstruksi kaca

ganda yang lebih kuat, memberikan perlindungan ekstra dari kelembapan, debu, dan kondisi cuaca ekstrem seperti angin kencang atau hujan es.

- Degradasi lebih rendah: Karena lapisan kaca ganda, risiko degradasi yang disebabkan oleh potensial (PID) berkurang, yang berarti masa pakai panel bisa lebih lama.

#### Kekurangan panel bifacial

- Biaya lebih tinggi: Harga awal panel bifacial umumnya lebih mahal karena teknologi dan proses produksinya lebih rumit.
- Instalasi lebih kompleks: Memerlukan sistem pemasangan khusus yang ditinggikan dan dirancang untuk meminimalkan bayangan di sisi belakang, yang menambah biaya instalasi.
- Ketergantungan permukaan: Efektivitasnya sangat bergantung pada permukaan di bawah panel. Permukaan gelap seperti aspal akan memantulkan lebih sedikit cahaya, mengurangi keuntungan bifacial.
- Kurang cocok untuk atap konvensional: Untuk atap yang dipasang rata, sisi belakang panel akan tertutup, sehingga keunggulan bifacial tidak dapat dimanfaatkan secara maksimal.

#### 2.1.2 Perbandingan Jenis – Jenis Panel Surya

Untuk memudahkan, berikut tabel perbandingan berdasarkan parameter utama (data rata – rata 2023):

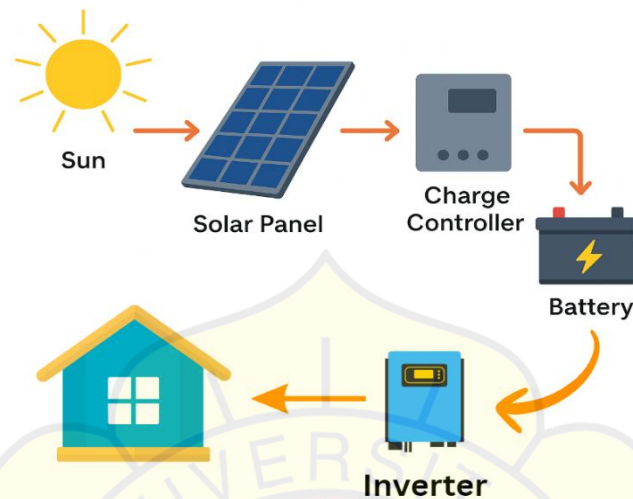
Tabel 2. 1 Jenis – Jenis Panel Surya

Jenis Panel	Efisiensi (%)	Biaya Relatif (per Wp)
Monocrystalline	18 – 22	Tinggi (Rp. 10.000 – 15.000)
Polikeristalin	15 - 18	Sedang (Rp. 7.000 – 10.000)
Thin – Film (CdTe/Cigs)	10 – 18	Rendah (Rp. 5.000 – 8.000)
Thin - Film (a – Si)	6 - 12	Sangat Rendah (Rp. 4.000 – 6.000)
Bifacial	20 - 23	Sangat Rendah (Rp. 3.500 – 5.000)

#### 2.1.3 Prinsip Kerja Panel Surya

Panel surya terdiri dari banyak sel surya (solar cell) yang disusun secara seri dan paralel untuk mendapatkan tegangan dan arus yang diinginkan. Saat cahaya

matahari mengenai permukaan sel surya, energi foton akan menabrak elektron dalam bahan semikonduktor dan membuatnya bergerak. Pergerakan elektron ini menimbulkan arus listrik DC (arus searah).



Gambar 2. 6 Prinsip Kerja Panel Surya

#### 2.1.4 Relevansi untuk Aplikasi *Reverse Osmosis*

Dalam konteks rancang bangun panel surya untuk RO (seperti pada skripsi Anda), *polycrystalline* sering dipilih karena efisiensi tinggi yang memastikan output daya stabil (minimal 200-300 W) untuk pompa RO, terutama di iklim tropis Indonesia dengan irradiasi 4-6 kWh/m<sup>2</sup>/hari. *Polycrystalline* lebih ekonomis untuk skala besar, sementara thin-film cocok jika instalasi memerlukan fleksibilitas (misalnya di perahu atau struktur mobile). Pilihan tergantung pada faktor seperti anggaran, lokasi, dan kebutuhan daya RO (rata-rata 2-5 kWh/m<sup>3</sup> air).

## 2.2 Energi Terbarukan

Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari sumber daya alam yang dapat diperbaharui secara alami dan berkelanjutan, seperti sinar matahari, angin, air, dan biomassa. Energi terbarukan memiliki keunggulan utama yaitu ramah lingkungan, tidak menghasilkan emisi karbon dalam proses konversinya, serta tersedia secara melimpah. Salah satu bentuk energi terbarukan yang banyak dikembangkan adalah energi surya.

Energi terbarukan sering disebut juga sebagai energi hijau atau energi bersih, karena proses produksinya menghasilkan emisi karbon yang sangat rendah

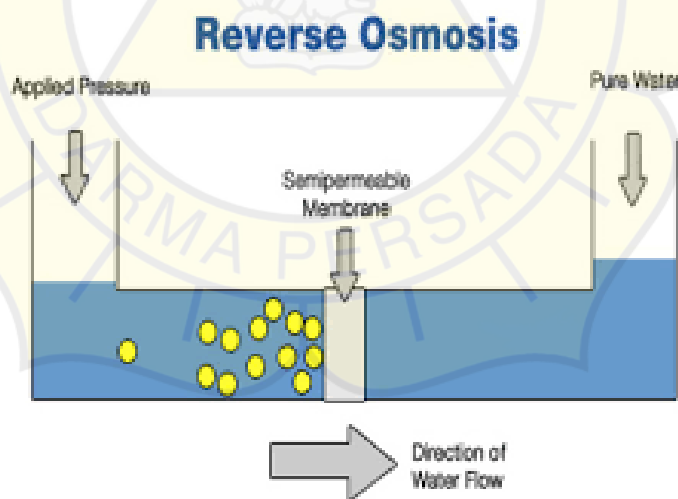
atau bahkan tidak menghasilkan emisi sama sekali, sehingga lebih ramah lingkungan dibandingkan energi fosil.

### 2.3 Teknologi *Reverse Osmosis* (RO)

*Reverse Osmosis* adalah metode pemurnian air dengan menggunakan membran semi-permeabel untuk menyaring zat padat terlarut seperti garam, mineral, dan kontaminan lainnya. Pada proses RO, air diberi tekanan tinggi agar melewati membran, sedangkan garam dan zat lain tertahan.

#### 2.3.1 Prinsip Dasar

*Reverse Osmosis* (RO) merupakan salah satu teknologi membran paling efektif dalam pemurnian air, yang bekerja berdasarkan prinsip fisik osmosis yang dibalik melalui penerapan tekanan eksternal. Teknologi ini telah menjadi andalan dalam desalinasi air payau dan air laut, pemurnian air minum, serta pengolahan limbah industri. Dalam konteks penelitian ini, pemahaman prinsip dasar dan sejarah RO krusial untuk merancang integrasi dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya, mengingat konsumsi energi RO yang tinggi (rata-rata 3-5 kWh/m<sup>3</sup> air) memerlukan optimasi efisiensi.



Gambar 2. 7 Prinsip Dasar RO

Prinsip Dasar *Reverse Osmosis* didasarkan pada sifat membran semipermeabel yang memungkinkan molekul air (H<sub>2</sub>O) melewati sementara menahan solute (seperti garam, mineral, bakteri, dan polutan organik). Dalam konteks rancang bangun panel surya untuk RO, pemahaman prinsip ini esensial karena proses

memerlukan energi signifikan (2-5 kWh/m<sup>3</sup> air) untuk pompa tekanan, yang dapat dioptimalkan melalui sumber energi terbarukan.

Prinsip RO pertama kali dikembangkan dari konsep osmosis yang ditemukan pada 1748 oleh Jean-Antoine Nollet, dan dirumuskan secara matematis oleh Jacobus van 't Hoff pada 1884. RO modern, seperti yang dikembangkan oleh Loeb dan Sourirajan pada 1960, memungkinkan aplikasi praktis dengan efisiensi tinggi (penolakan solute >99%). Berikut penjelasan rinci prinsip dasar RO.

### 2.3.2 Sejarah *Reverse Osmosis*

Konsep dasar osmosis pertama kali ditemukan pada abad ke-18 oleh ilmuwan Prancis Jean-Antoine Nollet pada tahun 1748. Nollet mengamati bahwa air dapat mengalir melalui membran semipermeabel (seperti kulit babi yang direndam dalam alkohol) dari larutan encer ke larutan pekat, sebuah fenomena yang disebut osmosis (van 't Hoff, 1887).



Gambar 2. 8 Sejarah RO

Perkembangan RO sebagai teknologi modern dimulai pada pertengahan abad ke-20, didorong oleh kebutuhan desalinasi air untuk mengatasi krisis air global. Pada 1950-an, penelitian di Amerika Serikat oleh U.S. Department of the Interior dan National Academy of Sciences mendorong eksplorasi membran sintetis. Terobosan utama terjadi pada 1960, ketika Sidney Loeb dan Srinivasa Sourirajan dari University of California, Los Angeles (UCLA), berhasil mengembangkan membran asimetris selulosa asetat yang tipis dan berpori, memungkinkan aliran air tinggi dengan penolakan garam hingga 98% (Loeb & Sourirajan, 1963). Membran ini memungkinkan RO beroperasi pada tekanan rendah (sekitar 50 bar), jauh lebih

efisien daripada metode distilasi termal sebelumnya.

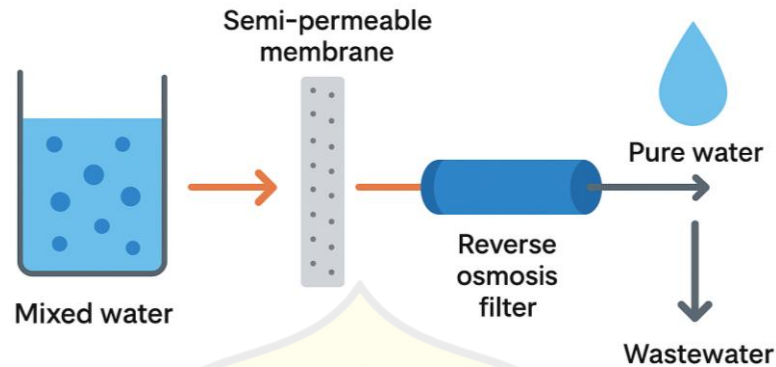
Komersialisasi RO dimulai pada 1960-an melalui proyek Desalination Research and Development Program oleh DuPont dan General Electric. Pada 1965, instalasi RO pertama untuk desalinasi air laut dibangun di Coalinga, California, dengan kapasitas 10.000 galon/hari. Pada 1970-an, RO menyebar ke Timur Tengah, di mana negara seperti Arab Saudi mengadopsi teknologi ini untuk mengatasi kelangkaan air, dengan pabrik desalinasi RO terbesar dunia (seperti di Jeddah) mencapai 1 juta m<sup>3</sup>/hari pada 1980-an (Eltawil et al., 2009). Di Indonesia, RO diperkenalkan pada 1980-an untuk pengolahan air tanah di Jakarta dan Surabaya, dan kini digunakan secara luas di industri makanan, farmasi, dan pemurnian air rumah tangga (Kementerian Pekerjaan Umum, 2020).

Perkembangan selanjutnya mencakup membran polimer non-selulosa (seperti polyamide thin-film composite pada 1970-an oleh DuPont), yang meningkatkan ketahanan terhadap klorin dan pH ekstrem. Pada 1990-an, integrasi RO dengan energi terbarukan seperti panel surya mulai dieksplorasi, terutama di negara berkembang (Ghaffour et al., 2015). Saat ini, kapasitas global RO mencapai lebih dari 100 juta m<sup>3</sup>/hari, dengan efisiensi energi turun dari 10 kWh/m<sup>3</sup> (1960-an) menjadi 2-4 kWh/m<sup>3</sup> (2020-an) berkat inovasi seperti membran nanofiltrasi hibrida dan pompa energi tinggi (Crittenden et al., 2012). Di Indonesia, program pemerintah seperti Sanitasi Total Berbasis Masyarakat (STBM) mendorong adopsi RO skala kecil untuk daerah terpencil, meskipun tantangan energi fosil masih dominan (BPS, 2022).

### 2.3.3 Prinsip Kerja RO

Proses RO bekerja melawan arah osmosis alami. Osmosis adalah pergerakan pelarut (air) dari konsentrasi rendah ke tinggi melalui membran semi-permeabel. Pada RO, tekanan tinggi diterapkan untuk memaksa air bergerak dari konsentrasi tinggi (air asin) ke konsentrasi rendah (air murni), menghasilkan air yang dapat dikonsumsi.

## Prinsip Kerja Alat Reverse Osmosis



Gambar 2. 9 Prinsip Kerja RO

### 2.3.4 Komponen Sistem RO

1. Pompa bertekanan tinggi untuk mendorong air melewati membran RO.
2. Membran RO memfilter garam dan zat terlarut lainnya.
3. Pre-filter menyaring partikel kasar dan kotoran sebelum masuk ke membran.
4. Post-filter (opsional) meningkatkan kualitas air akhir.
5. Tangki air bersih tempat penampungan hasil filtrasi.
6. Lampu UV

### 2.3.5 Karakteristik Listrik dan Efisiensi

Karakteristik listrik panel surya photovoltaic (PV) menggambarkan hubungan antara arus (I), tegangan (V), daya (P), dan faktor eksternal seperti irradiansi matahari (G) dan suhu (T). Pemahaman ini krusial untuk rancang bangun sistem PV yang diintegrasikan dengan *Reverse Osmosis* (RO), karena pompa RO memerlukan input daya stabil (200-300 W) untuk tekanan 50-60 bar, sementara output PV variabel. Karakteristik listrik dinilai melalui kurva I-V (arus-tegangan) dan P-V (daya-tegangan), yang diukur pada kondisi standar (STC:  $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ,  $T = 25^\circ\text{C}$ , AM 1.5). Efisiensi PV menentukan ukuran panel yang diperlukan; misalnya, panel *monocrystalline* 300 Wp dengan efisiensi 20% memerlukan luas  $\sim 1.5 \text{ m}^2$  untuk mendukung RO skala kecil (50 L/jam).

Menurut Green et al. (2023), efisiensi PV komersial mencapai 15-25%,

dengan degradasi tahunan 0.5-1%. Dalam iklim tropis Indonesia ( $G$  rata-rata 4-6 kWh/m<sup>2</sup>/hari), karakteristik ini memengaruhi kestabilan sistem off-grid, di mana MPPT controller digunakan untuk memaksimalkan daya pada titik Maximum Power Point (MPP).

Karakteristik listrik panel surya didasarkan pada model diode tunggal (single-diode model), yang menggambarkan sel surya sebagai sumber arus fotolistrik ( $I_L$ ) paralel dengan diode dan resistor seri ( $R_s$ ) serta shunt ( $R_{sh}$ ). Persamaan dasar arus keluaran ( $I$ ) adalah:

## 2.4 Konfigurasi Sistem RO

Konfigurasi sistem *Reverse Osmosis* (RO) merujuk pada susunan komponen dan alur proses yang dirancang untuk memaksimalkan efisiensi pemisahan air murni dari feed water (sumber air masukan) sambil meminimalkan konsumsi energi dan fouling membran. Sistem RO skala kecil (seperti yang digunakan dalam penelitian ini, kapasitas 50 L/jam) biasanya mengadopsi konfigurasi modular yang kompak, cocok untuk integrasi dengan sumber energi terbarukan seperti panel surya. Konfigurasi ini didasarkan pada prinsip solution-diffusion model, di mana tekanan transmembran mengatasi tekanan osmotik ( $\pi = MRT$ ) untuk menghasilkan permeat (air murni) dan concentrate (brine).

Dalam konteks off grid, konfigurasi RO harus mempertimbangkan kestabilan daya input (DC dari PV dikonversi ke AC via inverter) dan recovery rate (tipikal 50-75%). Menurut Baker (2004), konfigurasi standar RO terdiri dari pra-perlakuan, pompa tekanan, modul membran, dan pasca-perlakuan, dengan variasi berdasarkan kualitas feed water (air payau TDS 1.000-5.000 ppm atau air laut TDS >35.000 ppm). Untuk penelitian ini, konfigurasi dipilih sebagai single-pass dengan satu tahap membran untuk kesederhanaan dan biaya rendah, dengan potensi ekspansi ke two-pass untuk kualitas permeat lebih tinggi.

## 2.5 Integrasi Panel Surya dengan Sistem RO

Integrasi antara sistem panel surya dan RO melibatkan konversi energi dari panel surya untuk menjalankan komponen utama sistem RO, khususnya pompa tekanan tinggi. Beberapa faktor teknis penting dalam integrasi ini meliputi:

1. Perhitungan kebutuhan daya: Untuk mengetahui berapa watt panel surya

yang dibutuhkan.

2. Kapasitas baterai: Agar sistem dapat beroperasi saat cuaca mendung atau malam hari.
3. Efisiensi energi: Menentukan seberapa besar energi surya yang dapat dimanfaatkan secara optimal oleh sistem RO.

## 2.6 Hipotesis Penelitian

Prototipe panel surya *polycrystalline* 150 Wp yang dirancang dan dibangun dapat berfungsi sebagai sumber energi mandiri untuk alat RO skala kecil, mencapai efisiensi sistem integrasi PV-RO 54%% dan produksi air murni stabil 2,1 L/min pada irradiasi matahari 500 - 1000 W/m<sup>2</sup>, sehingga menggantikan energi fosil 100% untuk operasi off-grid dan mendukung akses air bersih berkelanjutan.

