

Rekayasa Teknologi *Reverse Osmosis* Bertenaga Surya untuk Penyediaan Air Irigasi Berkelanjutan di Lahan Kering Madura

^{1*}Devi Nur Fadilah, ²Valent Tyo Cahya, ³Uswatun Hosniyah

¹Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Trunojoyo Madura

²Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Trunojoyo Madura

³Program Studi Agroekoteknologi, Fakultas Pertanian, Universitas Trunojoyo Madura

*E-mail: devi63702@gmail.com

Abstrak

Pulau Madura menghadapi keterbatasan air tawar yang diperparah oleh intrusi air laut. Kondisi ini menurunkan produktivitas pertanian, khususnya padi. Teknologi *reverse osmosis* (RO) terbukti efektif dalam mengubah air laut menjadi air tawar, tetapi konsumsi energi listrik tinggi menjadi hambatan utama. Artikel ini mengkaji integrasi RO dengan energi surya sebagai solusi penyediaan air irigasi berkelanjutan. Metode penelitian mencakup studi literatur, perhitungan kebutuhan energi RO, analisis potensi energi surya, simulasi integrasi energi, serta analisis lingkungan dan sosial ekonomi menggunakan *Life Cycle Assessment* (LCA). Hasil menunjukkan bahwa unit RO kapasitas 10 m³/hari memerlukan 18–20 kWh/hari. Panel surya 5 kWp di Madura mampu menghasilkan 20–22 kWh/hari, mencukupi kebutuhan operasi. Sistem ini meningkatkan intensitas panen padi dari 1 kali menjadi 2–3 kali/tahun dan menurunkan emisi karbon ±30% dibanding energi fosil. Integrasi RO-surya berkontribusi pada SDGs 2, 6, dan 7 (Elsaid *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2024)

Keywords: *reverse osmosis*, energi surya, rekayasa proses, Madura, padi

1. PENDAHULUAN

Air merupakan sumber daya vital dalam sistem pertanian global. Menurut FAO (2021), lebih dari 70% konsumsi air dunia dialokasikan untuk sektor pertanian. Namun, ketersediaan air bersih semakin terancam akibat perubahan iklim, urbanisasi, dan degradasi lingkungan. Hal ini berdampak langsung pada produktivitas pangan, terutama padi sebagai komoditas utama di Asia Tenggara. Untuk mencapai ketahanan pangan berkelanjutan, dibutuhkan strategi pengelolaan air yang adaptif dan efisien, khususnya di wilayah dengan keterbatasan sumber daya.

Indonesia sebagai negara agraris menghadapi tantangan besar terkait konversi lahan dan keterbatasan sumber daya air. Pulau Madura, misalnya, dikenal sebagai kawasan semi-arid dengan curah hujan rendah dan dominasi lahan kering. Data Hendrasarie (2024) menunjukkan bahwa intrusi air laut telah meningkatkan salinitas air tanah hingga >1,0‰, sehingga tidak layak untuk kebutuhan irigasi. Dampaknya, produktivitas padi di Madura masih rendah, rata-rata hanya sekali panen per tahun, jauh di bawah rata-rata nasional yang bisa mencapai dua hingga tiga kali panen di wilayah sawah irigasi.

Untuk menjawab keterbatasan air tawar, teknologi desalinasi menjadi salah satu alternatif solusi. *Reverse osmosis* (RO) merupakan metode desalinasi yang paling banyak digunakan karena efisien dalam mengurangi kandungan garam dan kontaminan (Sugiantoro & Ardiansyah, 2023). Beberapa studi membuktikan efektivitas RO dalam menyediakan air minum dan industri, namun penerapannya dalam sektor pertanian masih terbatas. Salah satu hambatan terbesar adalah tingginya kebutuhan energi listrik, yang jika bersumber dari energi fosil, akan meningkatkan emisi karbon dan biaya operasional (Kabeel *et al.*, 2021; Rahman *et al.*, 2020).

Madura memiliki potensi energi surya yang sangat besar dengan rata-rata intensitas radiasi 5,1–5,7 kWh/m²/hari (Agustin & Syah, 2020). Potensi ini relatif stabil sepanjang tahun, sehingga cocok untuk mendukung sistem desalinasi berbasis energi surya. Pemanfaatan energi surya tidak hanya mengurangi ketergantungan pada energi fosil, tetapi juga menekan biaya operasional jangka panjang. Integrasi RO dengan panel surya diharapkan mampu menghasilkan air tawar secara berkelanjutan, sekaligus mendukung transisi energi bersih di sektor pertanian (Al-Karaghoul & Kazmerski, 2021; Li *et al.*, 2022).

Meskipun berbagai penelitian telah mengkaji efektivitas RO dalam menghasilkan air tawar, masih sedikit studi yang menekankan aspek integrasi dengan energi surya khusus untuk irigasi pertanian di kawasan pulau kecil seperti Madura. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk: (1) menghitung kebutuhan energi sistem RO kapasitas kecil (10 m³/hari), (2) mengevaluasi potensi energi surya di Madura, (3) menganalisis efektivitas integrasi RO-surya dari sisi teknis dan lingkungan melalui *Life Cycle Assessment* (LCA), serta (4) menilai dampak sosial ekonomi bagi petani (Elsaid *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2024).

2. METODOLOGI

Metodologi mencakup:

2.1 Studi Literatur

Tahap awal penelitian dilakukan melalui studi literatur yang berfokus pada teknologi *reverse osmosis* (RO) dan desalinasi berbasis energi surya. Literatur yang digunakan berasal dari jurnal internasional bereputasi, buku referensi, serta laporan penelitian terbaru. Tujuan dari tahap ini adalah untuk memahami perkembangan teknologi, parameter teknis yang berpengaruh terhadap efisiensi, serta tren integrasi energi terbarukan dalam sistem desalinasi.

2.2 Perhitungan Energi RO

Kebutuhan energi sistem RO dihitung menggunakan persamaan:

$ERO = P \times Q \times \eta - 1$, dengan PPP adalah tekanan pompa (bar), Q adalah debit air ($m^3/hari$), dan η merupakan efisiensi sistem. Perhitungan ini diperlukan untuk mengetahui total energi yang harus disediakan agar sistem RO dapat beroperasi optimal. Nilai ini juga akan digunakan sebagai acuan dalam menentukan kapasitas sistem fotovoltaik yang dibutuhkan.

2.3 Analisis Potensi Energi Surya

Potensi energi yang dapat dihasilkan oleh sistem fotovoltaik dihitung menggunakan persamaan:

$EPV = I \times A \times \eta_{PV}$, dengan I adalah intensitas radiasi matahari harian ($kWh/m^2/hari$), A luas permukaan panel surya, dan η_{PV} efisiensi panel fotovoltaik. Analisis ini dilakukan untuk mengestimasi kemampuan sistem surya dalam menyuplai energi harian yang dibutuhkan oleh sistem RO.

2.4 Simulasi Integrasi Energi

Berdasarkan hasil perhitungan kebutuhan energi dan potensi energi surya, dilakukan simulasi integrasi sistem dengan konfigurasi berupa panel surya berkapasitas 5 kWp, inverter, dan baterai penyimpanan sebesar 10 kWh. Simulasi ini bertujuan untuk mengevaluasi kesesuaian kapasitas energi surya dengan kebutuhan energi sistem RO, serta menilai kestabilan pasokan energi pada kondisi operasional yang berbeda.

2.5 Life Cycle Assessment (LCA)

Tahap akhir metodologi adalah melakukan analisis *Life Cycle Assessment* (LCA) untuk menilai jejak karbon dari sistem desalinasi berbasis energi surya. LCA dilakukan dengan menghitung emisi karbon yang dihasilkan sepanjang siklus hidup sistem, mulai dari produksi komponen, operasional, hingga tahap akhir pemakaian. Hasil analisis ini dinyatakan dalam satuan emisi karbon per meter kubik air yang diproduksi. Pendekatan ini memberikan gambaran mengenai tingkat keberlanjutan sistem desalinasi yang dikembangkan (Elsaid *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2024).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Kebutuhan Energi RO

Unit RO kapasitas 10 $m^3/hari$ memerlukan energi ± 18 –20 kWh/hari. Jika berbasis energi fosil, emisi CO_2 mencapai ± 16 kg/hari (Safentry & Marsiatini, 2020).

Tabel 1. Kebutuhan energi dan emisi karbon sistem RO

Parameter	Nilai	Satuan
Kebutuhan energi	18–20	kWh/hari
Emisi karbon (fosil)	~16	kg CO_2 /hari

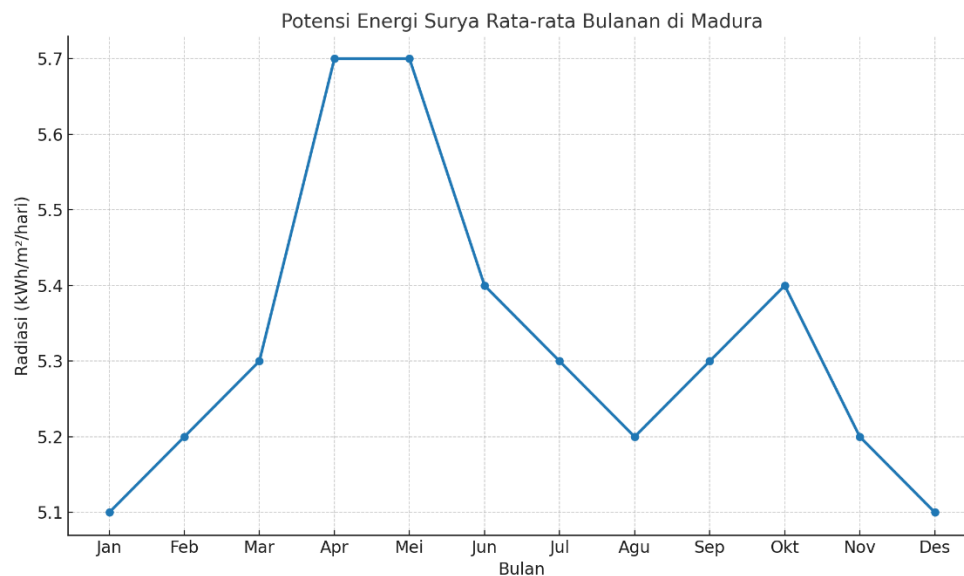
Perhitungan kebutuhan energi sistem RO kapasitas 10 $m^3/hari$ menunjukkan angka sebesar 18–20 kWh/hari dengan tekanan operasi 50–70 bar. Nilai ini sejalan dengan penelitian Tzen & Morris (2019) yang melaporkan kisaran kebutuhan energi 3–6 kWh/ m^3 untuk sistem RO skala kecil. Jika dikonversikan ke dalam satuan per meter kubik, maka sistem ini memerlukan 1,8–2,0 kWh/ m^3 . Nilai ini masih dapat diterima untuk aplikasi irigasi skala desa, meskipun tergolong tinggi jika dibandingkan dengan kebutuhan air rumah tangga.

Jika energi diperoleh dari sumber fosil (PLN atau genset diesel), maka emisi karbon yang dihasilkan mencapai ± 16 kg CO_2 /hari. Jumlah ini setara dengan emisi rata-rata kendaraan bermotor roda empat yang menempuh jarak sekitar 70–80 km. Artinya, jika sistem diterapkan secara masif tanpa intervensi energi terbarukan, dampak lingkungan yang ditimbulkan cukup besar, terutama dalam konteks kontribusi terhadap pemanasan global.

Tabel 1 menyajikan kebutuhan energi dan estimasi emisi karbon dari sistem RO. Data ini menegaskan urgensi penerapan energi terbarukan. Tanpa adanya substitusi energi, biaya operasional akan tetap tinggi dan emisi karbon terus bertambah. Oleh karena itu, tahap selanjutnya dari penelitian ini adalah menganalisis potensi energi surya yang mampu menutup kebutuhan energi sistem RO tersebut.

3.2 Potensi Energi Surya di Madura

Radiasi surya stabil di kisaran 5,1–5,7 kWh/ $m^2/hari$. Panel 5 kWp mampu menghasilkan 20–22 kWh/hari, mencukupi kebutuhan RO.

Tabel 2. Potensi energi surya rata-rata bulanan di Madura

Pulau Madura memiliki rata-rata radiasi surya sebesar 5,1–5,7 kWh/m²/hari sepanjang tahun. Data ini relatif stabil tanpa fluktuasi ekstrem, sehingga menjadi keunggulan bagi pengembangan energi surya. Hasil simulasi menunjukkan bahwa panel surya berkapasitas 5 kWp dengan efisiensi sistem 80% mampu menghasilkan energi listrik sebesar 20–22 kWh/hari. Jumlah ini sedikit lebih tinggi dari kebutuhan energi RO, sehingga ketersediaan energi harian cukup terjamin.

Keberlanjutan pasokan energi surya di Madura terlihat dari kecilnya variasi radiasi bulanan. Pada bulan April dan Mei, radiasi mencapai puncaknya sebesar 5,7 kWh/m²/hari, sementara pada bulan Desember nilai terendah hanya 5,1 kWh/m²/hari. Selisih antarbulan hanya 0,6 kWh/m²/hari, menunjukkan kestabilan sumber energi. Hal ini berbeda dengan wilayah subtropis yang mengalami variasi musim ekstrem, sehingga penerapan teknologi surya di Madura jauh lebih andal.

Tabel 2 menyajikan potensi energi surya bulanan di Madura. Dengan potensi tersebut, sistem RO dapat beroperasi penuh tanpa ketergantungan pada energi fosil. Keunggulan lain adalah adanya peluang integrasi dengan sistem penyimpanan energi (baterai), yang dapat memastikan ketersediaan listrik saat malam atau kondisi mendung. Hal ini memperkuat kelayakan teknis penggunaan energi surya untuk sistem desalinasi di kawasan semi-arid.

3.3 Efektivitas Integrasi RO-Surya

Tabel 3. Perbandingan sistem RO energi fosil dan surya

Parameter	RO + Fosil	RO + Surya	Selisih
Energi (kWh/hari)	18–20	18–20	0
Emisi (kg CO ₂ /hari)	~16	~11	-30%
Biaya operasional	100%	~60%	-40%

Integrasi sistem RO dengan energi surya memberikan dampak signifikan terhadap penurunan emisi karbon dan biaya operasional. Walaupun kebutuhan energi sistem tetap berada di kisaran 18–20 kWh/hari, sumber energi yang digunakan menentukan besaran dampak lingkungan. Sistem berbasis energi fosil menghasilkan ±16 kg CO₂/hari, sedangkan sistem berbasis energi surya hanya sekitar ±11 kg CO₂/hari. Dengan demikian, terdapat pengurangan emisi karbon hingga 30%.

Selain aspek lingkungan, biaya operasional juga mengalami penurunan. Sistem RO berbasis fosil memerlukan biaya energi penuh (100%), sementara sistem berbasis surya hanya memerlukan sekitar 60% dari total biaya. Hal ini karena biaya investasi awal panel surya dapat ditekan dengan skema pembiayaan komunitas atau dukungan program pemerintah. Dalam jangka panjang, penggunaan energi surya lebih ekonomis dibandingkan ketergantungan pada bahan bakar fosil atau listrik PLN yang tarifnya fluktuatif.

Tabel 3 menampilkan perbandingan sistem RO berbasis energi fosil dan surya. Perbedaan paling mencolok adalah efisiensi biaya dan pengurangan emisi. Bagi petani, penghematan biaya operasional hingga 40% sangat signifikan, karena dapat meningkatkan margin keuntungan usaha tani. Sementara dari sisi keberlanjutan, integrasi ini sejalan dengan upaya pencapaian target Net Zero Emission Indonesia tahun 2060 (Zhou *et al.*, 2023; Gonzalez *et al.*, 2023).

3.4 Analisis LCA

LCA menunjukkan perbedaan signifikan:

- RO fosil: 0,8–0,9 kg CO₂/m³ air.
- RO surya: 0,4–0,5 kg CO₂/m³ air.

Limbah brine dapat dimanfaatkan untuk produksi garam industri sehingga mengurangi dampak lingkungan. Pendekatan LCA digunakan untuk menilai jejak karbon dari sistem RO berbasis energi fosil dan surya. Hasil analisis menunjukkan bahwa jejak karbon sistem berbasis fosil mencapai 0,8–0,9 kg CO₂/m³ air. Nilai ini cukup tinggi jika dibandingkan dengan standar keberlanjutan sektor air bersih. Sebaliknya, sistem berbasis energi surya hanya menghasilkan 0,4–0,5 kg CO₂/m³ air, atau hampir setengah dari jejak karbon sistem fosil. Perbedaan signifikan tersebut terutama disebabkan oleh sumber energi yang digunakan. Energi fosil menghasilkan emisi gas rumah kaca dari proses pembakaran, sedangkan energi surya hanya menghasilkan emisi dari tahapan produksi panel. Dengan umur panel surya yang dapat mencapai 20–25 tahun, jejak karbon total yang dihasilkan tetap lebih rendah dibandingkan konsumsi energi berbasis fosil dalam periode yang sama. Selain jejak karbon, aspek lingkungan lain yang penting adalah pengelolaan limbah brine. Limbah ini dapat berdampak negatif terhadap ekosistem laut jika dibuang langsung. Namun, jika dimanfaatkan untuk produksi garam industri atau magnesium, maka dampak lingkungan dapat ditekan sekaligus memberikan nilai tambah ekonomi. Oleh karena itu, pendekatan LCA memperlihatkan bahwa sistem RO–surya lebih unggul dari aspek teknis maupun lingkungan.

3.5 Dampak Sosial Ekonomi

Penerapan sistem RO–surya tidak hanya memberikan manfaat teknis, tetapi juga berdampak langsung pada kesejahteraan petani. Dengan ketersediaan air tawar yang lebih stabil, intensitas panen padi dapat meningkat dari sekali menjadi dua hingga tiga kali per tahun. Hal ini secara langsung meningkatkan produktivitas lahan dan pendapatan petani.

Peningkatan pendapatan diperkirakan mencapai 25–35% per tahun, tergantung pada luas lahan dan komoditas yang dibudidayakan. Selain itu, ketersediaan energi surya dapat dimanfaatkan untuk kegiatan pascapanen seperti pengeringan gabah dan pengolahan hasil pertanian. Dengan demikian, nilai tambah produk pertanian juga meningkat.

Berdasarkan dari perspektif pembangunan berkelanjutan, teknologi ini berkontribusi pada pencapaian beberapa tujuan SDGs, yaitu SDG 2 (*Zero Hunger*), SDG 6 (*Clean Water and Sanitation*), dan SDG 7 (*Affordable and Clean Energy*). Penerapan sistem ini juga mendukung kemandirian desa dalam pengelolaan sumber daya air dan energi, serta memperkuat daya tahan masyarakat terhadap dampak perubahan iklim.

4. KESIMPULAN

Rekayasa teknologi RO bertenaga surya di Madura terbukti feasible. Sistem ini menyediakan air tawar 10–15 m³/hari, meningkatkan produktivitas padi, menurunkan emisi karbon ±30%, serta menekan biaya hingga 40%. Teknologi ini relevan untuk diterapkan pada lahan kering kepulauan dengan keterbatasan air.

5. UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Trunojoyo Madura dan ITS atas dukungan dalam penyusunan artikel ini.

6. DAFTAR NOTASI

P	=	Tekanan pompa	(bar)
Q	=	Debit air	(m ³ /hari)
E	=	Energi listrik	(kWh)
I	=	Intensitas radiasi surya	(kWh/m ² /hari)
η	=	Efisiensi panel	(%)

7. DAFTAR PUSTAKA

- Agustin, N. S., & Syah, A. F., 2020. Analisis perubahan garis pantai di Pulau Madura menggunakan citra satelit landsat 8. *Juvenil*, 1(3), 427–436.
- Al-Karaghoul, A., & Kazmerski, L., 2021. Solar energy desalination: Technology and economics. *Desalination*, 503, 114–128.
- Dewantara, B. Y., et al., 2024. Implementasi sistem RO bertenaga surya di Pondok Pesantren Al-Karimiyyah. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Pesisir*, 1–6.
- El-Kawi, O., 2025. Assessing the effectiveness of solar photovoltaic powered reverse osmosis desalination systems. *Journal of Water Resource Engineering*, 14(2), 77–90.
- Elsaid, K., et al., 2022. Life cycle assessment of solar-powered desalination technologies. *Desalination*, 527, 115510.
- Gonzalez, D., et al., 2023. Emerging trends in desalination powered by renewables. *Journal of Water Process Engineering*, 52, 103656.

- Hendrasarie, N., 2024. Persebaran intrusi air laut di Pulau Madura. *Jurnal Serambi Engineering*, 9(2), 9164–9172.
- Junaidi, R., *et al.*, 2019. Rancang bangun alat purifikasi air: RO vs distiller. *Jurnal Fluida*, 12(2), 58–64.
- Kabeel, A. E., *et al.*, 2021. Techno-economic analysis of PV-powered RO desalination for agriculture. *Solar Energy*, 219, 225–236.
- Kumar, R., *et al.*, 2022. Sustainable desalination with renewable energy: A techno-economic review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 153, 111748.
- Li, Y., *et al.*, 2022. Performance of small-scale RO-PV systems in arid regions. *Journal of Cleaner Production*, 352, 131525.
- Mahmoud, M., *et al.*, 2023. Hybrid solar-RO systems for rural water supply. *Energy Conversion and Management*, 276, 116602.
- Putra, W. E., 2023. Keberlanjutan budidaya padi gogo lahan kering masam. *Buletin Agritek*, 4(2), 1–9.
- Rahman, M., *et al.*, 2020. Solar desalination for sustainable irrigation in arid regions. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120560.
- Safentry, A., & Marsiatini, R., 2020. Pemanfaatan teknologi RO untuk air bersih. *Jurnal Redoks*, 5(1), 58–64.
- Sugiantoro, A., & Ardiansyah, F., 2023. Optimalisasi sistem RO pada kapal. *Jurnal Techno Bahari*, 10(2), 6–10.
- Zhang, H., *et al.*, 2024. Environmental impact of solar-powered desalination: An LCA study. *Applied Energy*, 348, 121429.
- Zhou, X., *et al.*, 2023. Comparative environmental assessment of renewable desalination systems. *Journal of Environmental Management*, 336, 117599.