

Model Proses Pengolahan Air Laut Metode *Reverse Osmosis* memanfaatkan Sumber Energi Sinar Surya

PERLUHUTAN SIAHAAN¹, NAZARUDDIN SINAGA², JAKA WINDARTA³

¹Magister Energi, Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro

²Departemen Teknik Mesin, Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro

³Departemen Teknik Elektro, Sekolah Pascasarjana Universitas Diponegoro

Email: tulussiahaan@students.undip.ac.id

Received 20 Januari 2022 | *Revised* 4 April 2022 | *Accepted* 10 April 2022

ABSTRAK

Teknologi membrane Cellulose Triacetate (CTA), Hollow Fiber (HF) dan Sel Surya Perovskite. Kemampuan membrane mereduksi air garam dan Perovskite mengonversi sinar surya. Model proses pemurnian air laut Reverse Osmosis (RO) menjadi air bersih di mana kebutuhan energi spesifik ditekan menggunakan Energi Dukung Turbin (EDT). Produksi air bersih kapasitas 3000 m³ per jam dengan kebutuhan energi spesifik (KES) 43,589.7 kWh. Efisiensi 50% KES kontribusi dari EDT dan membrane mereduksi garam 99,5%. Kombinasi RO dan Perovskite serta didukung EDT efisiensi tinggi diperoleh dan dapat menurunkan tingkat gas emisi setara 1,547,048 ton CO₂e per tahun.

Kata kunci: *air bersih, CO₂, membrane, reverse osmosis, sel surya*

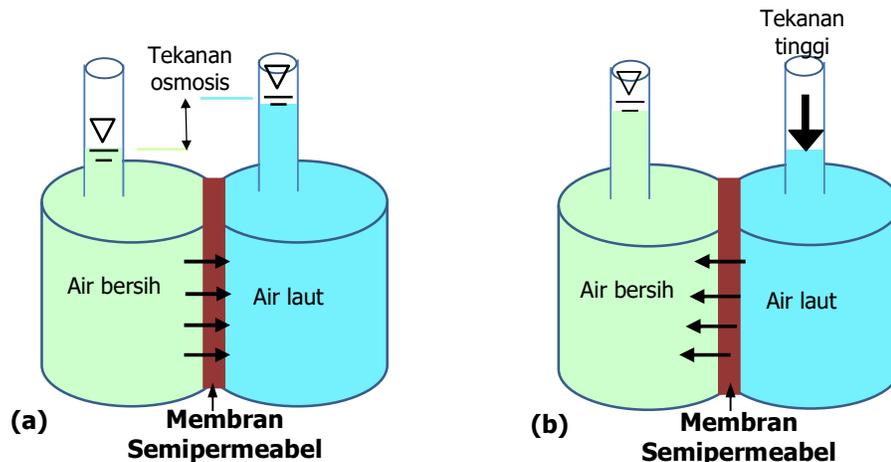
ABSTRACT

Technology of membrane is Cellulose Triacetate (CTA), Hollow Fiber (HF) and Perovskite Solar Cell. Membrane performance is to reduce of salt substance and Perovskite to convert irradiance. Model seawater purification process Reverse Osmosis (RO) converts into clean water however the requirement of specific energy is reduced which utilize of Energy Recovery Turbin (EDT). Production of clean water capacity 3000 m³ per hour require Specific Energy Consumption (KES) 43,589.7 kWh of electrical energy. Efficiency 50% of KES is contribution of EDT and performance of membrane to reduce salt substance 99,5 %. The combination of RO and Perovskite as well as EDT has reached significant efficiency and the gas emissions is reduced to aproximatly 1,547,048 ton CO₂e per year.

Keywords: *clean water, CO₂, membrane, reverse osmosis, solar cell*

1. PENDAHULUAN

Indonesia memiliki luas wilayah 8,300,000 km² terdiri dari luas wilayah daratan 1,900,000 km² dan luas wilayah perairan 6,400,000 km², khusus luas wilayah lautan 290,000 km² (**Dermawan, dkk, 2019**). Sumber air laut yang berlimpah ini dapat dikelola menjadi air bersih dan baik untuk diminum dengan teknologi pemurnian air laut *Reverse Osmosis*. Kebutuhan air bersih di Indonesia khususnya wilayah Jawa mendapat perhatian khusus dikarenakan pertumbuhan penduduk yang tinggi dan perkembangan industri yang semakin meningkat menyebabkan permintaan air bersih meningkat juga. Kelangkaan air bersih akan menjadi ancaman ke depannya apabila ketersediaan air bersih tidak dikelola dengan baik. Proses pemurnian air laut pada prinsipnya dapat dilakukan dengan teknologi *membrane-reverse osmosis* dan termal. Penelitian ini menggunakan teknologi *membrane*, karena memiliki keunggulan secara keekonomian dan lebih aman. Konsumsi energi listrik proses RO sebesar 3-4 kWh/m³ dibandingkan 7,5 – 12 kWh/m³ pada proses termal (**Ghaffour, dkk, 2015**). Sumber energi yang digunakan dalam pemurnian air memanfaatkan teknologi sinar surya, dengan tujuan dapat mengurangi tingkat emisi CO₂, dibandingkan apabila menggunakan sumber energi berbasis bahan bakar fosil. Proses osmosis alami yaitu proses perpindahan air dari media salinitas rendah ke media salinitas tinggi sampai pada kesetimbangan Gambar 1(a), sebaliknya pada proses *Reverse Osmosis* adalah perpindahan air dari media salinitas tinggi ke media salinitas rendah dengan cara memberikan tekanan yang tinggi pada media salinitas tinggi dengan menggunakan pompa air bertekanan tinggi Gambar 1(b). Air yang melewati *membrane* pada media salinitas rendah meninggalkan unsur garam dan kandungan logam atau endapan lainnya sehingga menghasilkan air bersih.



Gambar 1. Proses Aliran Natural Osmosis (a) dan Proses Aliran Osmosis Terbalik dengan Tekanan Tinggi (b)

Parameter kualitas air bersih ditentukan oleh tingkat konduktivitas listrik (*EC, Electrical Conductivity*) dan total zat padat terlarut (*TDS, Total Dissolved Solid*) (**Rusydi, dkk, 2018**). Merujuk pada KepMenKes nomor 416/1990 bahwa TDS maksimum pada air minum yang diperbolehkan sebesar 1,000 mg/l. *Membrane semipermeable* merupakan komponen utama untuk pemurnian air laut menjadi air bersih yang aman untuk diminum. Proses pemurnian air laut dengan menggunakan *membrane* ada dua jenis *membrane* yang banyak digunakan karena memiliki kehandalan yang tinggi yaitu *membrane Hollow Fiber (HF)* berbasis *Cellulose Triacetate (CTA)* dan *membrane* berbasis *polyamide (PA)*. *Membrane* CTA HF memiliki keunggulan lebih tinggi karena memiliki kehandalan memproduksi air bersih dari sumber air laut, fleksibel dalam konsumsi energi, tingkat penolakan air garam (*salt*) sebesar >99,5% serta tidak berdampak pada lingkungan (*brine* komposisi) (**Nakao, dkk, 2021**). *Membrane* HF

digunakan pada proses pemurnian air laut RO tahap pertama dan *membrane* PA digunakan pada proses pemurnian air laut RO tahap kedua dan ketiga. Pemurnian air laut RO pada industri skala besar yang berlokasi berdekatan di pinggiran pantai seperti pembangkit listrik, industri logam dan industri kimia. Air bersih merupakan kebutuhan utama untuk mendukung operasional dan konsumsi sebagai air minum. Nilai tambah dari proses pemurnian air laut RO dengan memanfaatkan sumber energi sinar surya adalah meningkatkan efisiensi biaya operasional karena sumber energi matahari selalu tersedia dan didukung teknologi sel surya serta berdampak menurunkan tingkat emisi gas CO₂.

Model proses RO menggunakan *software Aspen Hysys* dengan kapasitas produksi air bersih sebesar 3000 m³/jam, tingkat kapasitas produksi yang tinggi akan diperoleh keekonomian yang tinggi. Konsumsi Energi Spesifik (KES) proses pemurnian air laut dengan teknologi *membrane* RO memerlukan energi listrik yang tinggi dibandingkan dengan teknologi konvensional, pompa bertekanan tinggi digunakan untuk memisahkan kandungan garam dan unsur pengotor lain. Pengembangan teknologi *membrane* saat ini, KES dapat diturunkan sampai dengan 1,8 kWh/m³ dengan tingkat pemurnian air bersih 50% (Park, dkk, 2020). Penurunan energi KES ini didukung dengan memanfaatkan sumber tekanan tinggi yang masih dimiliki pada modul RO tahap pertama dengan cara menggunakan pompa Energi Dukung Turbin (EDT) (Urrea, dkk, 2019). Perencanaan Minimum KES merupakan parameter penting dalam menentukan kehandalan proses pemurnian air laut. Satuan minimum KES adalah kWh/m³ atau dapat dinyatakan bahwa diperlukan energi untuk menghasilkan produk air bersih sebesar 1 m³. Beberapa faktor utama yang dapat mempengaruhi KES di antaranya tekanan *osmotic*, resistensi air yang melalui *membrane*, rugi rugi gesekan pada *membrane* RO dan efisiensi pada motor bertekanan tinggi. Model matematika dalam perhitungan KES disederhanakan dengan mempertimbangkan aliran ideal pada proses RO *membrane*, rugi rugi tekanan dan polarisasi konsentrasi dapat diabaikan (Wang, dkk, 2021). Daya pompa bertekanan tinggi ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$WHP = \frac{Q_f \times (P_f - P_0)}{\mu HP} \quad (1)$$

Dimana;

Q_f = kapasitas/debit aliran m³/h , P₀ = Tekanan awal, P₁ = tekanan keluaran dan μHP = efisiensi pompa bertekanan tinggi

Menentukan KES dapat ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$KES = \frac{WHP}{Q_{p1} + Q_{p2}} \quad (2)$$

Sumber energi sinar surya dimanfaatkan dalam proses pemurnian air laut RO, di mana potensi energi sinar surya di Indonesia sangat besar yaitu sebesar 4,8 kWh/m² atau setara dengan 112,000 GWp (Hariyati, dkk, 2019). Pemanfaatan energi sinar surya bertujuan mengurangi tingkat emisi CO₂, dibandingkan dengan penggunaan energi berbasis bahan bakar fosil. Estimasi pengurangan emisi CO₂ oleh pemanfaatan energi sinar surya pada proses pemurnian air laut RO sebesar 10 kg-CO₂e untuk setiap 1 m³ air bersih (Alhaj, dkk, 2021). Hal ini sesuai dengan kebijakan pemerintah Indonesia untuk meningkatkan penggunaan energi baru terbarukan (EBT) melalui PP79/2014 terkait Kebijakan Energi Nasional (KEN) dan Perpres 22/2017 terkait Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Energi sinar surya dapat dimanfaatkan secara maksimal untuk memproduksi energi listrik dengan memperhatikan faktor utama seperti potensi radiasi matahari dan temperatur dalam rentang waktu tertentu. Potensi radiasi matahari pada lokasi tempat pembangkit energi listrik dapat diketahui dengan cara

menggunakan alat seperti termometer, *luxmeter*, menggunakan aplikasi *meteonorm* dan aplikasi *website based* NASA (<https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>). Data potensi radiasi dan temperatur yang digunakan untuk perencanaan energi pembangkit sinar surya yang digunakan pada proses pemurnian air laut RO diperoleh dengan aplikasi NASA (Gambar 2). Lokasi tempat pembangkit berbasis energi sinar surya (*site point*) ditentukan di Surabaya-Jawa Timur, *Latitude* -7.3801 *Longitude* 112.7850.



Gambar 2. Site Point Lokasi Pembangkit PLTS di Surabaya-Jawa Timur

Tabel 1. Data Radiasi Matahari Timeline Jan-Des 2020 (NASA)

No	Bulan	Radiasi matahari (W/m ²)	No	Bulan	Radiasi matahari (W/ m ²)
1	Jan-20	12.66	7	Jul-20	13.34
2	Feb-20	15.12	8	Agu-20	15.09
3	Mar-20	14.50	9	Spt-20	16.33
4	Apr-20	14.16	10	Okt-20	15.03
5	May-20	12.53	11	Nov-20	14.15
6	Jun-20	12.48	12	Des-20	13.93
Rata - rata					14.11

Tabel 2. Rata-Rata Temperatur Timeline Jan-Des 2020 (NASA)

Bulan	Rata rata temperature (°C)	Bulan	Rata rata temperature
Jan-20	27.96	Jul-20	27.73
Feb-20	27.47	Agu-20	28.69
Mar-20	27.87	Spt-20	30.21
Apr-20	28.23	Okt-20	29.58
May-20	28.35	Nov-20	28.71
Jun-20	27.65	Des-20	28.32
Rata - rata			28.40

Perencanaan energi pembangkit listrik berbasis sinar surya menggunakan data Tabel 1 dan Tabel 2 (diperoleh dari NASA) sebagai referensi untuk menghitung daya energi listrik yang dapat dihasilkan modul panel surya dan jumlahnya. Sebagai referensi model perhitungan potensi energi listrik menggunakan aplikasi *web based* HelioScope. HelioScope memproses perhitungan dengan basis data di point lokasi PLTS Latitude -7.38003072406 Longitude 112.80134052099999 berdekatan ke lokasi proses pemurnian air laut metode RO. *Perovskite Solar Cell* (PSC) memiliki keunggulan tingkat penyerapan iradian yang tinggi dan mengonversi menjadi energi listrik dibandingkan dengan sel surya dari jenis lain, struktur material PSC memiliki lapisan lapisan yang terdiri dari TCO/WS₂/MAPbI₃(n)/MAPbI₃(p)/MoO₃/Metal di mana *Methylammonium lead iodide* (MAPbI₃) digunakan sebagai cell penyerap di antara lapisan *tungsten disulfide* (WS₂) dan *molybdenum oxide* (MoO₃) (Yousuf, dkk, 2021).

2. METODE

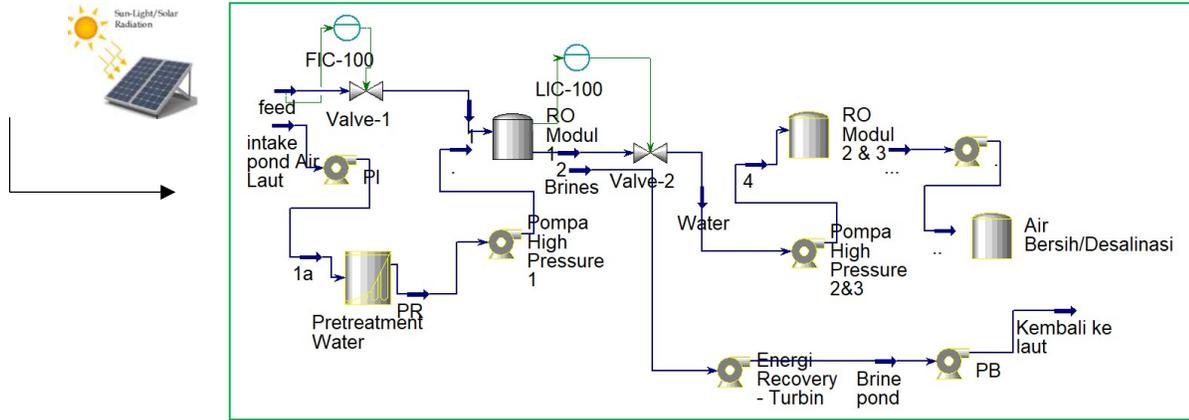
2.1 Model Pengolahan Air Laut Metode *Reverse Osmosis*

Desain proses pengolahan air laut metode RO menggunakan pompa bertekanan tinggi dengan memanfaatkan sumber energi sinar surya untuk memperoleh air murni secara optimal pertama-tama dilakukan dengan menentukan kapasitas produksi air bersih, komposisi sumber air laut masukan yaitu air laut dari wilayah Jawa Timur (Tabel 3). Komposisi air laut yang terdiri dari ion utama dimasukkan sebagai referensi *software* Hysys untuk membuat proses *flow diagram* RO sistem. Jenis *membrane* yang digunakan ada dua yaitu *Hollow Fiber* dari Toyobo pada modul RO pemurnian air laut tahap pertama dan jenis *membrane* Spiral dari Nitto pada modul RO tahap kedua dan ketiga.

Tabel 3. Komposisi Air Laut di Perarian Benowo Jawa Timur Indonesia (Apriani, dkk, 2018).

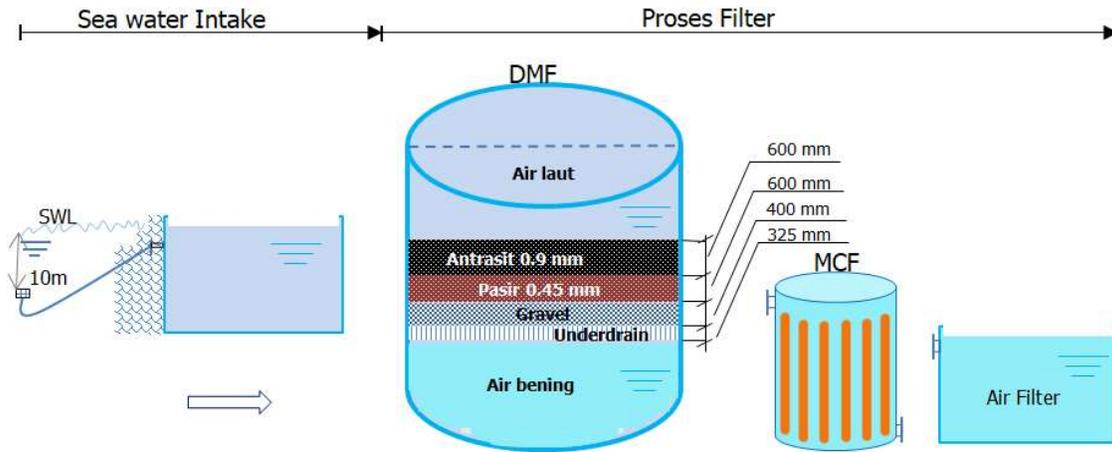
No	Komposisi ion utama	mg/l
1	Natrium Na ⁺	21,530
2	Kalium K ⁺	9,62
3	Magnesium Mg ²⁺	2,280
4	Kalsium Ca ²⁺	1,257
5	Bromida Br ⁻	0,21
6	Amonium NH ₄ ⁺	0,61
7	Fluorida F ⁻	2,51
8	Klorida Cl ⁻	33,200
9	Iodida I ⁻	6,02
10	Nitrit NO ₃ ⁻	0,2
11	Sulfat SO ₄ ²⁻	5,464
12	Fosfat PO ₄ ³⁻	0,03
13	pH	7,4

Kapasitas pengolahan air laut metode RO dirancang produksinya sebesar 3000 m³/h, tahap pengolahan air laut dimulai dari pengambilan sumber air laut (*seawater intake*), proses pemurnian awal (*pre-treatment*), RO tahap pertama, RO tahap ke dua dan RO ke tiga sampai diperoleh air bersih (Gambar 4). *Chemical dosing* bagian dari proses penting berfungsi mengatur dan mengontrol tingkat komposisi kimia air yang diperlukan selama proses RO beroperasi.



Gambar 4. Proses Flow Diagram RO dihubungkan ke Sumber Energi Solar Panel

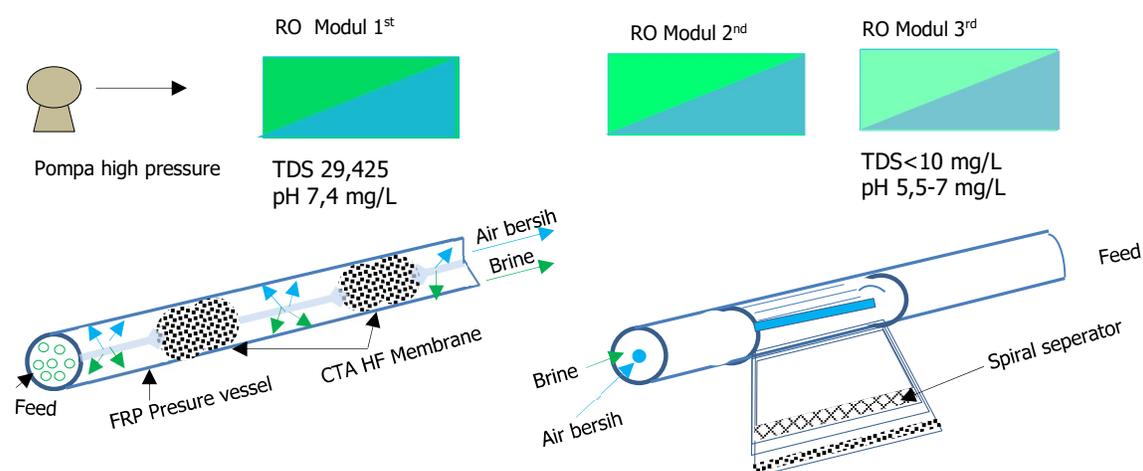
Kondisi *feed* air laut sebelum dialirkan ke proses pemurnian tahap awal (*pretreatment*) memiliki komposisi ion utama (Tabel 3) dan TDS 29,425 mg/l, temperatur 25,8 °C (**Mugisidi & Heriyani, 2018**). *Feed* air laut dialirkan ke media *pretreatment* menggunakan pompa centrifugal kapasitas 5000 m³/h dan energi listrik 616,7 kWh. Proses filter air laut menggunakan peralatan *Dual Media Filter (DMF)* berfungsi menghilangkan koloid material air laut dan *Micron Cartridge Filter (MCF)* berfungsi menghilangkan kotoran terlarut >10 mikron.



Gambar 5. Proses Filter Air Laut Tahap Awal

Tahapan proses RO mencakup beberapa tahap proses pemurnian sehingga diperoleh air bersih yang sesuai kualitas yang dibutuhkan. Sumber air laut dialirkan melalui pipa ke kolam penampungan dengan memanfaatkan perbedaan ketinggian (energi potensial 10 m dari permukaan laut) (**Al-Kaabi & Mackey, 2019**). *Feed* air filter digunakan untuk menyuplai proses pemurnian tahap lanjut di modul RO tahap 1 dengan menggunakan pompa bertekanan tinggi *multistage horizontal* kapasitas 1,312 m³/h dengan energi listrik 3,056 kWh. *Membrane* yang digunakan jenis CTA *Hollow Fiber* dari Toyobo. Energi Dukung Turbin (EDT) jenis Pelton kapasitas 750 m³/h beroperasi dengan memanfaatkan energi bertekanan tinggi air *brine* pada RO tahap 1, turbin dihubungkan ke poros generator bertegangan 13,2 kV berfungsi untuk mengalirkan air *brine* dari modul RO tahap 1 ke tempat penampungan sebelum dialirkan kembali ke laut (Gambar 5). Keunggulan memanfaatkan EDT yaitu dapat mengurangi KES hingga 50%. Proses pemurnian air dilanjutkan ke modul RO tahap 2, air dari modul RO tahap

1 dialirkan ke modul RO tahap 2 dengan menggunakan pompa sentrifugal horisontal berkapasitas 617m³/h dengan energi 313.7 kWh. *Membrane* yang digunakan jenis spiral dari Nitto. Proses pemurnian air dilanjutkan ke modul RO tahap 3, air dari modul RO tahap 2 dialirkan ke modul RO tahap 3 dengan menggunakan pompa sentrifugal horisontal berkapasitas 556m³/h dengan energi 300.9 kWh. Air bersih yang diproduksi dari modul RO tahap 3 dialirkan ke tempat penyimpanan dengan menggunakan dua pompa sentrifugal berkapasitas 2,050 m³/h dengan energi 530,7 kWh, air bersih yang dihasil memiliki komposisi pH 5,5 – 7 dan TDS <10 mg/l sesuai dengan KepMenKes 416/1990 (Gambar 6). Air *brine* dari tempat penampungan dialirkan kembali ke laut dengan menggunakan pompa sentrifugal berkapasitas 4,100 m³/h dengan energi 535,4 kWh. Sebelumnya pada air *brine* di tempat penampungan sudah dilakukan pengelolaan lanjut supaya tidak berdampak pada biota laut dan lingkungan.



Gambar 6. Proses Pemurnian Air Laut menggunakan Membrane

2.2 Model Pembangkit Listrik Sumber Energi Sinar Surya (PLTS)

Prinsip dasar pembangkit listrik sumber energi sinar surya ditentukan oleh tingkat intensitas radiasi (iradiasi) matahari. Semakin tinggi iradiasi yang mengenai modul sinar surya/*solar cell*, semakin besar energi listrik yang dapat dihasilkan. Teknologi *Perovskite solar cell* yang dikembangkan saat ini memiliki efisiensi konversi daya (PCE, *Power Conversion Efficiency*) *extra ordinary* sebesar 25,2% (Yeo & Jeong, 2020), namun dengan teknologi baru *solar cell* berbasis *perovskite* PCE dapat diperoleh hingga 30,5%-35% dengan model tandem *solar cell*, *cell* bagian atas dan bawah, efisiensi dicapai dengan cara di antaranya menyesuaikan ketebalan lapisan *cell*, memperbesar laju mobilitas dan mengurangi rugi-rugi dari *cell*/tandem (Zhao, dkk, 2021). PCE mempengaruhi luas efektif modul yang dibutuhkan, semakin besar nilai PCE semakin kecil luas efektif modulnya, hal ini dapat mengurangi luas area PLTS terpasang dan di sisi lain meningkatkan keekonomian. Menghitung luas efektif modul dan jumlah modul ditunjukkan pada Persamaan (3) dan (4) (Kencana, dkk, 2018).

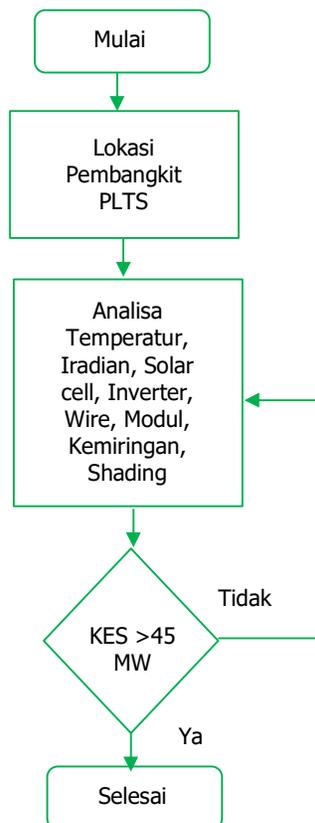
$$\text{Area efektif (m}^2\text{)} = \frac{kWp}{PCE} \quad (3)$$

Dimana;

kWp = Daya Puncak PLTS, PCE = Efisiensi Konversi Energi

$$\text{Jumlah Modul (unit)} = \frac{\text{Daya Puncak Modul (total } W_p)}{W_p \text{ Modul}} \quad (4)$$

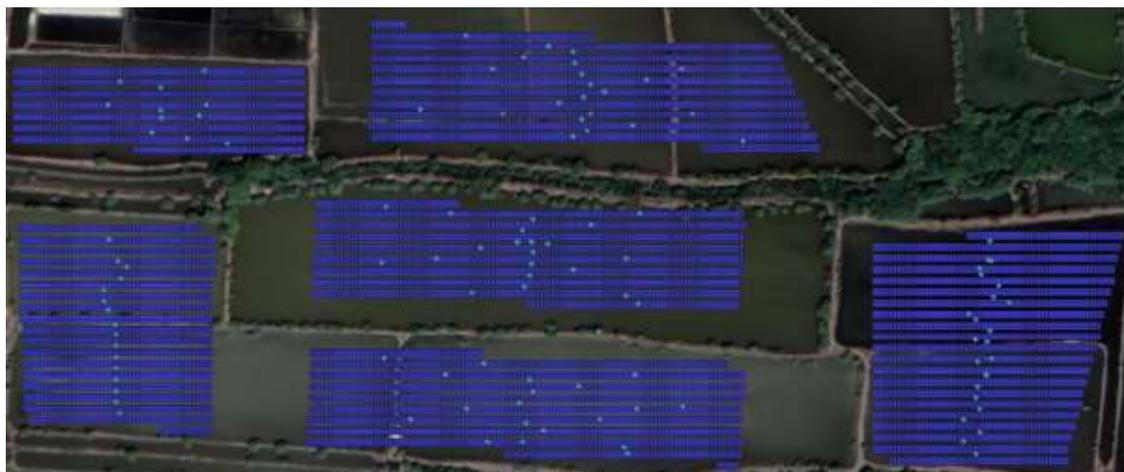
Faktor cuaca yang relatif tidak stabil dapat mempengaruhi kehandalan PLTS, maka jumlah modul dapat ditambah 20%-30% dari hitungan awal untuk menaikkan kapasitas energi listrik. Penentuan kemiringan dari modul dan arah posisi modul pada titik azimuth juga dapat mempengaruhi kehandalan PLTS. Model pembangkit PLTS menggunakan *software* HelioScope untuk menentukan kapasitas energi listrik yang dapat dihasilkan untuk memenuhi kebutuhan energi listrik pada proses pemurnian air laut metode RO kapasitas 3000 m³/h. Gambar 7 di bawah menunjukkan tahap merancang pembangkit PLTS menggunakan HelioScope. Lokasi PLTS merupakan faktor penting untuk memproduksi energi listrik maksimal, selanjutnya menganalisis kemiringan panel dan dampak bayangan (*shading*).



Gambar 7. Tahapan Merancang Pembangkit PLTS menggunakan Helioscope

Penentuan lokasi pembangkit PLTS bertujuan untuk mendapat energi sinar surya yang maksimal, Tabel 1 dan Tabel 2 menunjukkan tingkat iradian rata rata dalam setahun sebesar 14,11 dan temperatur 28,40 °C. Potensi iradiasi dan temperatur yang relatif tinggi ini akan menghasilkan energi listrik yang tinggi. Area lokasi PLTS memiliki kontur yang datar, tidak ada gunung dan minim pohonan besar sehingga pontensi iradiasi dapat diserap oleh modul surya secara maksimal untuk memproduksi energi listrik. HelioScope melakukan proses perhitungan tingkat intensitas iradian yang dapat dikonversi menjadi energi listrik berdasarkan data langsung dari lokasi pembangkit PLTS dan didukung oleh *data based* peralatan sistem pembangkit yang memadai untuk mendapatkan gambaran kapasitas produksi llistrik PLTS yang diperlukan. Kapasitas PLTS disesuaikan dengan kebutuhan konsumsi listrik (KES) untuk

operasional proses pemurnian air laut RO kapasitas 3000 m³/h dengan total energi pompa utama dan peralatan pendukung operasional sebesar 7227,1 kWh. Analisis teknis yang dilakukan dengan mempertimbangkan spesifikasi *solar cell*, jumlah modul, jenis dan jumlah *inverter*, kemiringan modul, jenis *wire* dan bayangan dari modul atau pohonan. Gambar 8 *Layout* lokasi area pembangkit PLTS dirancang memiliki enam lajur (segmen), masing masing lajur terpasang bebas dari bayangan dan memiliki akses mobilitas yang memadai dan aman untuk melakukan aktivitas di area PLTS.



Gambar 8. Layout Lokasi Area Pembangkit PLTS

Tabel 4. Menunjukkan Peralatan Utama PLTS yang digunakan untuk Memproduksi Energi Listrik Secara Maksimal.

Peralatan	Jenis	Jumlah
Modul	Canadian solar, CS6U 345M	25,284 unit
Inverter	Sunny Tripower 60-10 (480 Vac) SMA	117 unit

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Operasional Proses Pemurnian Airlaut Metode *Reverse Osmosis*

Faktor penting dalam operasi pemurnian air laut RO yaitu proses filterasi awal menggunakan peralatan DMF/ MCF dan penggunaan *membrane* yang tepat untuk memproduksi air bersih yang maksimal. Zat-zat organik dan non-organik dalam *feeder* air laut dapat menyumbat aliran *membrane* yang berdampak menurunkan kinerja operasional. DMF/ MCF adalah peralatan yang handal untuk menurunkan tingkat kandungan zat organik non-organik dalam *feeder* air laut sebelum air dialirkan ke tahap proses RO. *Membrane type Cellulose Triacetate (CTA) Hollow Fiber (HF)* dan *type Spiral* memiliki daya guna yang tahan lama dan tingkat pemurnian air yang sangat tinggi >99,5%. Pompa sebagai alat pendukung utama untuk mendistribusikan kebutuhan air pada masing-masing tahapan proses pemurnian air laut hingga diperoleh produksi air bersih. Perhitungan energi listrik (KES) yang diperlukan dalam pengoperasian pemurnian air laut ini dengan mempertimbangkan minimum KES pada pompa utama (Tabel 5), sedangkan kebutuhan energi listrik untuk peralatan pendukung lainnya seperti pompa dosing untuk mengalirkan bahan kimia *sodium bisulfite* ke dalam proses pemurnian untuk menghilangkan sisa zat klorin, mengalirkan *caustic soda* pada proses RO modul 3rd untuk menurunkan tingkat kandungan pH air, mengalirkan *sodium hypochlorite* pada proses RO modul

1st sebagai disinfektan, sistem kontrol automasi operasi RO (*computer/printer*) dan sistem pencahayaan/*lighting* pada ruangan proses RO 1st, 2nd dan 3rd. Estimasi kebutuhan energi listrik peralatan pendukung operasi sebesar 50% dari kebutuhan minimum KES, dengan pertimbangan menutupi rugi-rugi dari pompa, kebutuhan energi listrik tidak langsung pada proses RO dan stabilitas operasional. Energi listrik disuplai dari pembangkit PLTS dan sebagai cadangan dihubungkan ke jaringan PLN.

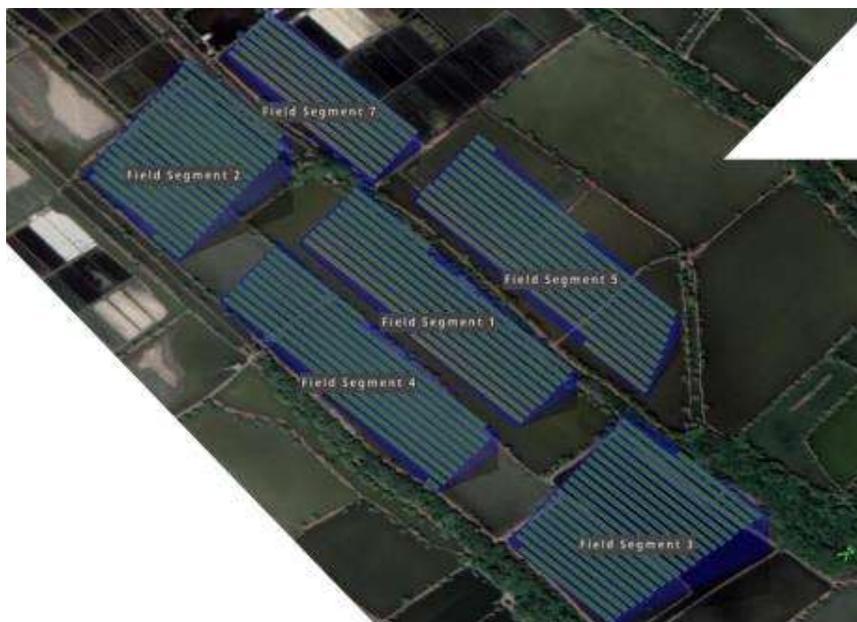
Tabel 5. Minimum KES Operasional RO

Proses	Laju aliran (m ³ /h)	Energi (kWh)		Keterangan
<i>Sea Water Intake</i>	7500			Sumber air laut dialirkan melalui pipa ke kolam penampungan dengan memanfaatkan perbedaan ketinggian (energi potential 10m dari permukaan laut)
<i>Pretreatment</i>	5000	2x616.7	1233.4	Filter air laut menggunakan alat <i>Dual Media Filter (DMF)</i> berfungsi menghilangkan koloid material air laut dan <i>Micron Cartridge Filter (MCF)</i> berfungsi menghilangkan kotoran terlarut >10 mikron
<i>Reverse Osmosis</i>				
1 st RO	1312	7x3056	21392	CTA HF, Toyobo <i>membrane</i> memiliki keunggulan menghilangkan zat organik non-organik dan kandungan garam sampai dengan 99,6%
EDT	750			Turbin - Pelton
2 nd RO	617	7x313.7	2195.9	<i>Spiral Wound</i> , Nitto <i>membrane</i> dapat menghilangkan zat organik non-organik dan kandungan garam sampai dengan 99,8%
3 rd RO	556	7x300.9	2106.3	<i>Spiral Wound</i> , Nitto <i>membrane</i> dapat menghilangkan zat organik non-organik dan kandungan garam sampai dengan 99,8%
Pemurnian Air Bersih	2050	2x530.7	1061.4	Produk air bersih pH 5,5 – 7 dan TDS
Pembuangan brine ke laut	4100	2x535.4	1070.8	Komposisi brine tidak berdampak pada biota laut dan lingkungan
TOTAL minimum KES			29059.8	Ditambah daya untuk peralatan pendukung 50% (14592.9 mWh)
TOTAL		43589.7		29059.8 + 14529.9

3.2 Operasional Pembangkit PLTS

Teknologi *Solar Cell* (SC) merupakan faktor kunci dalam pengoperasian PLTS, kemampuan SC menyerap *photon* dan mengonversi menjadi energi listrik dengan efisiensi tinggi menjadikan PLTS handal dan menjanjikan. SC yang digunakan pada rancangan PLTS ini dari jenis Silicon yang ideal dengan jenis *Perovskite*. Kapasitas energi listrik pembangkit PLTS rata-rata per bulan sebesar 780.502 kWh dengan modul terpasang 25,284 unit dan jumlah *inverter* sebanyak 117 unit. Kebutuhan energi listrik untuk mengoperasikan pemurnian air laut sebesar

43.589,7 kWh, sehingga potensi *excess power* sebesar 736.912,3 kWh (780.502 – 43.589,7) akan diekspor ke Grid PLN dan untuk rencana pengembangan kapasitas produksi pemurnian air laut menjadi air bersih tahap selanjutnya ke depan.



Gambar 9. 3D PLTS Area Per Bidang Segmen

Gambar 9 menunjukkan area PLTS memiliki enam bidang segmen dan akses masing masing bidang segmen memiliki jarak yang cukup untuk melakukan perawatan berkala.

Tabel 6. Kapasitas Daya Terpasang Per Area dan Jumlah Modul

Area	Module (unit)	Power (MWp)
Field Segment 1	4326	1,49
Field Segment 2	3984	1,37
Field Segment 3	5224	1,80
Field Segment 4	4436	1,53
Field Segment 5	4796	1,65
Field Segment 7	2520	0,8694
TOTAL	35704	8,7094

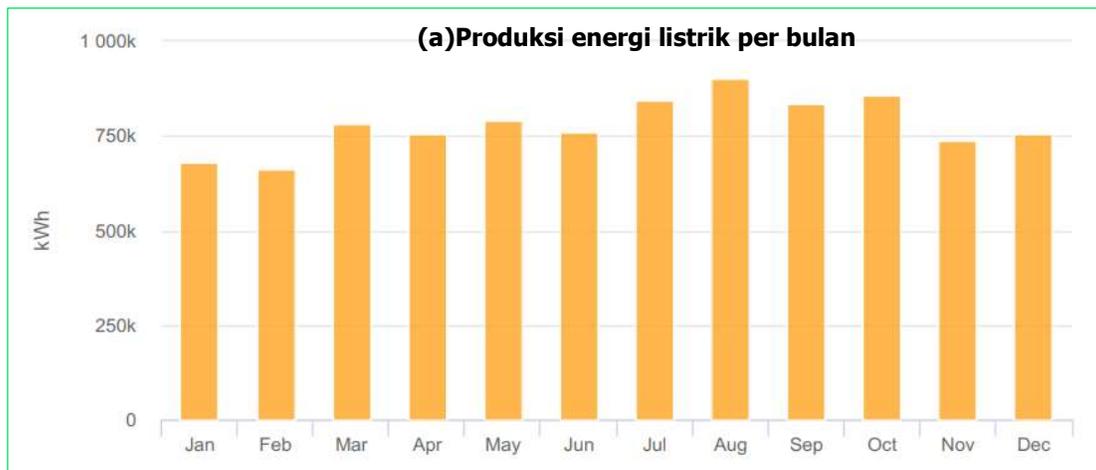
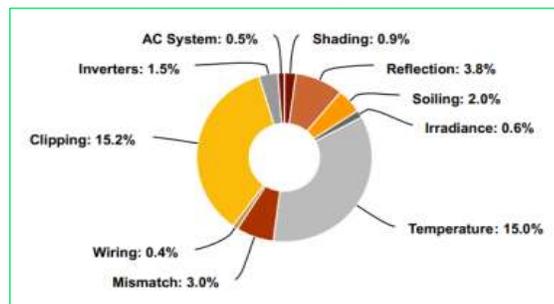
Kapasitas energi PLTS rata-rata per bulan 780,502 kWh dan energi per tahunnya sebesar 9,366,022.6 kWh (Tabel 7). Apabila dengan kapasitas energi yang sama diperoleh dari pembangkit fosil, maka dapat dihitung tingkat pengurangan CO₂ kontribusi dari pembangkit PLTS. Pada proses pemurnian air laut RO setiap 1 m³ air bersih menghasilkan 10 kg-CO₂e (Alhaj, dkk, 2021), maka 780.502 kWh setara dengan produksi air bersih sebesar 53,717 m³/h atau 53,717 x 10 kg-CO₂e x 8 x 30 = 128.921 ton CO₂e perbulan atau 1.547.048 ton CO₂e per tahun

Tabel 7. Kapasitas Produksi PLTS Perbulan

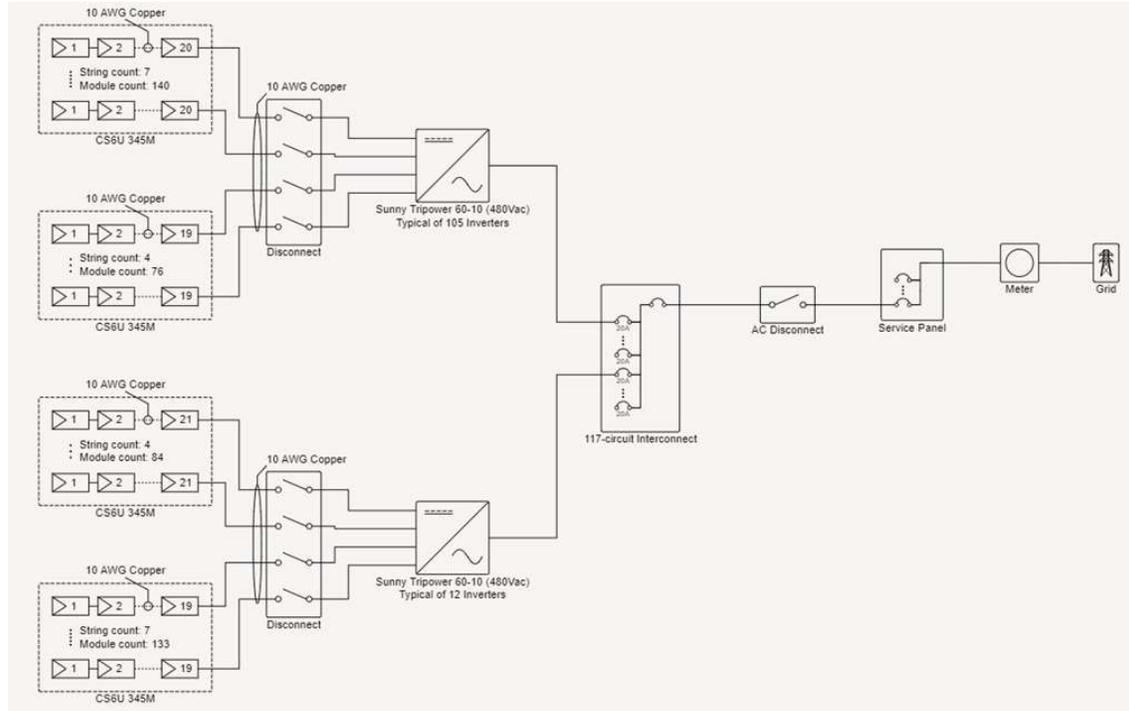
Bulan	GHI	POA	Shaded	Nameplate	Grid (kWh)
Jan	125,6	129,9	128,6	1.062.689,4	680.226,2
Feb	123,4	124,7	123,5	1.022.312,9	660.014,7
Mar	144,9	141,2	139,6	1.150.215,8	782.257,2
Apr	138,8	128,5	127,2	1.044.536,9	754.902,8
May	154,6	134	132,8	1.084.286,7	792.930,7
Jun	147,7	123,2	122,3	993.284,7	762.196,1
Jul	166,1	138,8	137,8	1.122.170,6	846.147,9
Agu	178,3	157,7	156,6	1.285.305,3	901.535,1
Sep	170,6	161,7	160,4	1.324.621,1	836.572,3
Okt	172,2	171,9	170,3	1.410.500	858.396,3
Nov	134	138,1	136,6	1.129.115,3	736.612,2
Des	136	142,1	140,5	1.161.928,8	754.231,1
TOTAL	1792,2	1691,8	1676,2	13.790.967,5	9.366.022,6

GHI = *Global Horizontal Irradiance* POA = *Plane of Array*

Kapasitas energi PLTS perbulan dipengaruhi oleh faktor rugi-rugi, khususnya temperatur berkontribusi besar mengurangi produksi energi listrik, hal ini dapat dilihat pada Gambar 10 energi listrik mengalami penurunan pada bulan Februari terendah diikuti bulan Januari dan November, disebabkan dampak cuaca dan frekuensi turun hujan lebih tinggi.

**(b) Komposisi rugi-rugi****Gambar 10. (a) Grafik Produksi Energi Listrik Per Bulan dan (b) Komposisi Rugi-Rugi**

Model Proses Pengolahan Air Laut Metode *Reverse Osmosis* memanfaatkan Sumber Energi Sinar Surya



Gambar 11. Single Line Diagram PLTS

Gambar 11 menunjukkan *Single Line Diagram* PLTS alur proses produksi energi listrik dimulai dari 25,284 modul menghasilkan arus DC selanjutnya dikonversi oleh 177 inverter untuk menghasilkan arus AC sebelum dihubungkan ke fasilitas proses pengolahan air laut dengan metode *Reverse Osmosis* dan dihubungkan *on Grid* (PLN)

4. KESIMPULAN

Penelitian ini merujuk pada pengembangan teknologi baru proses pemurnian air laut RO dan PLTS. Kemampuan *membrane Cellulose Triacetate (CTA) Hollow Fiber (HF)* memiliki keunggulan lebih tinggi karena memiliki kehandalan memproduksi air bersih dari sumber air laut, fleksibel dalam konsumsi energi, tingkat penolakan air garam (*salt*) sebesar >99,5%. *Solar cell* berbasis *perovskite Power Conversion Efficiency (PCE)* unggul dalam mengonversi daya hingga 30,5%-35%. Kebutuhan Energi Spesifik (KES) dapat ditekan hingga 50% dengan memanfaatkan turbin jenis Pelton. Pengembangan teknologi *membrane* dan *solar cell* ini menjadi penting bagi pelaku usaha sektor industri skala besar karena dapat meningkatkan efisiensi operasional. Dalam pelaksanaan proses pemurnian air bersih metode *reverse osmosis*, efisiensi yang tinggi akan diperoleh apabila kapasitas produksi air bersih yang tinggi. Keunggulan utama dari PLTS ini dapat memenuhi kebutuhan KES sebesar 43,589.7 kWh untuk memproduksi air bersih kapasitas 3000 m³ per jam, selanjutnya akan berkontribusi besar dalam mengurangi tingkat emisi CO₂ sebesar 128.921 ton CO₂e per bulan atau 1.547.048 ton CO₂e per tahun.

DAFTAR RUJUKAN

- Al-Kaabi, A. H., & Mackey, H. R. (2019). Environmental assessment of intake alternatives for seawater reverse osmosis in the Arabian Gulf. *Journal of Environmental Management*, *242*, 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.04.051>
- Alhaj, M., Tahir, F., & Al-ghamdi, S. G. (2022). *Life-cycle environmental assessment of solar-driven Multi-Effect Desalination (MED) plant*. 524.
- Apriani, M., Hadi, W., & Masduqi, A. (2018). Physicochemical properties of sea water and bittern in Indonesia: Quality improvement and potential resources utilization for marine environmental sustainability. *Journal of Ecological Engineering*, *19*(3), 1–10. <https://doi.org/10.12911/22998993/86150>
- Dermawan, A., Supratomo, R. T., Wratsangka, L., Setianingsih, A., Prajoko, B., Zulhikman, E., Widodo, S., Afriani, I., Sukur, A., Riadi, Y. D., & Cahyani, A. (2019). Kelautan Dalam Angka. *Buku*, 78.
- Ghaffour, N., Bundschuh, J., Mahmoudi, H., & Goosen, M. F. A. (2015). Renewable energy-driven desalination technologies: A comprehensive review on challenges and potential applications of integrated systems. In *Desalination*, *356*, 94–114. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.024>
- Hariyati, R., Muchamad, ;, Qosim, N., Aas, ;, Hasanah, W., Elektro, T., Tinggi, S., & Pln, T. (2019). Konsep Fotovoltaik Terintegrasi On Grid dengan Gedung STT-PLN. *Jurnal Ilmiah*, *11*(1).
- Kencana, B., Pasetyo, B., Berchmans, H., Agustina, I., Myrasandri, P., Bona, R., Randy Panjaitan, R., Winne. (2018). *Panduan Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Terpusat*. www.iced.or.id
- Mugisidi, D., & Heriyani, O. (2018). Sea Water Characterization at Ujung Kulon Coastal Depth as Raw Water Source for Desalination and Potential Energy. *E3S Web of Conferences*, *31*. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183102005>
- Muhamed Alhaj, Furqan Tahir, S. G. A.-G. (2021). Life-cycle environmental assessment of solar-driven Multi-Effect Desalination (MED) plant. *Jurnal Ilmiah*, *8*.
- Nakao, T., Miura, Y., Furuichi, K., & Yasukawa, M. (2021). Cellulose triacetate (Cta) hollow-fiber (hf) *membranes* for sustainable seawater desalination: A review. *Membranes*, *11*(3). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/membranes11030183>
- Park, K., Kim, J., Yang, D. R., & Hong, S. (2020). Towards a low-energy seawater reverse osmosis desalination plant: A review and theoretical analysis for future directions.

- Journal of Membrane Science*, 595(2019).
<https://doi.org/10.1016/j.memsci.2019.117607>
- Rusydi, A. F. (2018). Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: A review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 118(1).
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019>
- Urrea, S.A., Díaz Reyes, F., Peñate Suárez, B., & de la Fuente Bencomo, J. A. (2019). Technical review, evaluation and efficiency of energy recovery devices installed in the Canary Islands desalination plants. *Desalination*, 450(2018), 54–63.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.013>
- Wang, Z., Zhang, Y., Wang, T., Zhang, B., & Ma, H. (2021). Design and energy consumption analysis of small reverse osmosis seawater desalination equipment. *Energies*, 14(8).
<https://doi.org/10.3390/en14082275>
- Yeo, J. S., & Jeong, Y. (2020). Pathway toward market entry of perovskite solar cells: A detailed study on the research trends and collaboration networks through bibliometrics. *Jurnal Ilmiah*, 6, 2075–2085. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.07.029>
- Yousuf, R., & Qazi, G. (2021). Numerical modelling: Design and investigation of uniformly and non-uniformly doped absorber layer based PN homojunction perovskite solar cell variants. *Solar Energy*, 228(2021), 427–438.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.079>
- Zhao, X., Tan, H. Q., Birgersson, E., & Xue, H. (2022). Elucidating the underlying physics in a two-terminal all-perovskite tandem solar cell: A guideline towards 30% power conversion efficiency. *Solar Energy*, 231(2021), 716–731.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.11.029>