

**DESALINASI AIR LAUT DENGAN SISTEM AIR  
TERDESENTRALISASI MENGGUNAKAN *MULTIPLE TRAYS TILTED*  
*SOLAR STILL***

**Oleh:**

**Dr. Riana Ayu Kusumadewi, ST, MT**

**NIK: 3543/USAKTI**

**Maret 2026**

**PROGRAM STUDI TEKNIK LINGKUNGAN  
FAKULTAS ARSITEKTUR LANSKAP DAN TEKNOLOGI  
LINGKUNGAN  
UNIVERSITAS TRISAKTI**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**DESALINASI AIR LAUT DENGAN SISTEM AIR  
TERDESENTRALISASI MENGGUNAKAN *MULTIPLE TRAYS TILTED*  
*SOLAR STILL***

Jakarta, 31 Maret 2026

DRPMF FALTL



Dr. Tazkiaturrizki, ST, MT

NIK: 3279/USAkti

Penulis



Dr. Riana Ayu Kusumadewi, ST, MT

NIK: 3543/USAkti

Dekan

Fakultas Arsitektur Lanskap dan Teknologi Lingkungan



Dr. Ir. Silia Yuslim, MT

NIK: 1961/USAkti

## KATA PENGANTAR

Makalah ini merupakan suatu kajian dalam bidang pengolahan air laut menjadi air bersih yang bertujuan untuk memperoleh gambaran yang jelas dan terukur mengenai kinerja dari *multiple trays tilted solar still* yang digunakan pada skala *pilot* dengan meninjau kuantitas dan kualitas air umpan, air distilat yang dihasilkan, dan *brine* sisa proses desalinasi. Selain itu, pada makalah ini juga dibahas mengenai estimasi biaya yang harus dikeluarkan untuk membuat alat desalinasi seluas 0,8 m<sup>2</sup>.

Hasil kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran umum yang lebih mudah dalam pengambilan keputusan mengenai kondisi optimum yang dibutuhkan dalam operasional alat desalinasi air laut dengan proses distilasi menggunakan *trays* bertingkat dan absorber untuk menyerap dan mendistribusikan panas dengan sumber panas berasal dari matahari, dengan variasi jenis air umpan, jenis absorber, ketebalan kaca penutup dan sudut kemiringan kotak evaporator, guna pencapaian efisiensi penyisihan garam dalam air laut sehingga air distilat yang dihasilkan memenuhi persyaratan kualitas air bersih dan air minum sesuai dengan Peraturan Menteri Kesehatan RI yang berlaku. Selain itu untuk memberikan gambaran mengenai biaya pembuatan *multiple tilted solar still* jika akan diaplikasikan di lapangan.

Penulis dengan senang hati menerima kritik dan saran, maupun diskusi konstruktif sebagai perbaikan dan peningkatan mutu makalah ini. Demikian kajian ini kami susun, semoga dapat bermanfaat baik dalam bidang air minum, maupun sebagai masukan dalam pendidikan dan pengajaran.

Jakarta, 26 Februari 2026

Dr. Riana Ayu Kusumadewi, ST, MT

## ABSTRAK

Peningkatan penggunaan air secara eksponensial akibat industrialisasi dan urbanisasi menyebabkan eksploitasi sumber daya air permukaan dan bawah tanah. Desalinasi merupakan proses yang umum digunakan untuk memperoleh air tawar, baik dari sumber air laut. Tujuan penelitian ini adalah untuk memaksimalkan efisiensi alat desalinasi tenaga surya dengan variasi ketebalan kaca penutup dan sudut kemiringan kotak evaporator. Studi ini dilakukan dalam beberapa tahap pengujian, terutama pengoperasian peralatan desalinasi dengan variasi sudut kemiringan dan ketebalan penutup, kemudian dilanjutkan dengan pengujian kuantitas air suling dan air garam. Variasi sudut kemiringan kotak evaporator yang digunakan adalah  $25^\circ$ ,  $30^\circ$  dan  $45^\circ$  sedangkan variasi ketebalan penutup yang digunakan adalah 3 mm, 5 mm, 8 mm dan 10 mm. Efisiensi aktual/100 mL air umpan tertinggi dicapai pada sudut kemiringan  $25^\circ$  dan ketebalan penutup kaca 3 mm. Perpindahan panas total tertinggi terjadi pada variasi ketebalan kaca 3 mm dengan sudut kemiringan kotak evaporator  $30^\circ$ , yaitu sebesar  $526,77 \text{ W/m}^2$ . Sementara itu, perpindahan panas total terendah terjadi pada variasi ketebalan kaca 10 mm dengan sudut kemiringan kotak evaporator  $45^\circ$ , yaitu sebesar  $107,76 \text{ W/m}^2$ . Biaya pembuatan alat desalinasi dengan luas  $0,8 \text{ m}^2$  adalah Rp. 1.477.980 atau Rp. 9.629,6/liter air distilat.

## DAFTAR ISI

|   |     |
|---|-----|
| <b>KATA PENGANTAR</b> .....   | i   |
| <b>ABSTRAK</b> .....  | ii  |
| <b>DAFTAR ISI</b> .....   | iii |
| <b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....  | 1   |
| <b>1.1 Latar Belakang</b> .....   | 1   |
| <b>1.2 Maksud dan Tujuan</b> .....  | 3   |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....  | 4   |
| <b>2.1 Komponen Air dalam Sistem Desalinasi</b> .....   | 4   |
| <b>2.2 Desalinasi Air Laut</b> .....  | 5   |
| <b>2.3 Solar Desalination</b> .....   | 7   |
| <b>2.3.1 Solar Still</b> .....  | 8   |
| <b>2.3.2 Kehilangan Panas Internal pada Solar Still</b> .....   | 9   |
| <b>2.3.3 Kehilangan Panas Eksternal pada Solar Still</b> .....  | 11  |
| <b>2.4 Efisiensi Pengolahan Alat Desalinasi</b> .....   | 12  |
| <b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....  | 15  |
| <b>3.1 Tahapan Penelitian</b> .....   | 15  |
| <b>3.2 Experimental Setup</b> .....   | 16  |
| <b>3.3 Perhitungan Efisiensi Alat Desalinasi</b> .....  | 17  |
| <b>3.4 Perhitungan Kehilangan Panas Internal pada Solar Still</b> .....   | 18  |
| <b>3.5 Perhitungan Kehilangan Panas Eksternal pada Solar Still</b> .....  | 19  |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....  | 21  |
| <b>4.1 Efisiensi Aktual dan Teoritis dari Alat Desalinasi Menggunakan Absorber Kain Flanel Hitam dan Cokelat Gelap</b> .....                      | 21  |
| <b>4.2 Perbandingan Efisiensi Aktual dan Teoritis Alat Desalinasi dengan Variasi Kemiringan Kotak Evaporator dan Ketebalan Kaca Penutup</b> ..... | 22  |
| <b>4.3 Pengaruh Sudut Inklinasi Kotak Evaporator dan Ketebalan Kaca Penutup terhadap Efisiensi Aktual Alat Desalinasi</b> .....                   | 24  |
| <b>4.5 Analisis Termal dari Efisiensi Aktual Kuantitas Air Distilat</b> .....   | 24  |
| <b>4.5.1 Hubungan Perpindahan Panas Internal Solar Still dengan Efisiensi Aktual Kuantitas Air Distilat</b> .....                                 | 25  |
| <b>4.5.2 Hubungan Perpindahan Panas Eksternal Solar Still dengan Efisiensi Aktual Kuantitas Air Distilat</b> .....                                | 26  |
| <b>4.5.3 Hubungan Perpindahan Panas Keseluruhan pada Solar Still dengan Efisiensi Aktual Kuantitas Air Distilat</b> .....                         | 27  |

|   |    |
|---|----|
| <b>4.6 Kualitas Air Umpan, Air Distilat, dan <i>Brine</i></b> ..... | 29 |
| <b>4.7 Estimasi Biaya</b> .....                                     | 31 |
| <b>BAB V KESIMPULAN</b> .....                                       | 33 |
| <b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....   | 34 |

## **BAB I PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Saat ini, kelangkaan air minum baik di negara berkembang maupun negara maju dapat dianggap sebagai masalah penting. Masalah ini diperparah dengan perkembangan industri, kemajuan pertanian, dan pertumbuhan penduduk (Ghandourah et al., 2022). Peningkatan penggunaan air secara eksponensial akibat industrialisasi dan urbanisasi menyebabkan eksploitasi sumber daya air permukaan dan bawah tanah. Prediksi UNEP menunjukkan bahwa lebih dari 2,8 miliar individu di 48 negara akan menghadapi kelangkaan air pada tahun 2025 (D'Cotha, Sajeesh, Suresh, & Jithu, 2021). Desalinasi adalah proses yang umum digunakan untuk memperoleh air tawar, baik dari air laut maupun dari sumber air payau (Andrés-Mañas et al., 2020).

Karena wilayah yang mengalami tingkat kelangkaan air yang lebih tinggi adalah wilayah dengan ketersediaan radiasi matahari tertinggi (terletak di sabuk matahari), pemanfaatan energi matahari menjadi sangat menarik (Andrés-Mañas et al., 2020). Alat penyuling air tenaga surya adalah perangkat yang mengubah air asin (30–50 ppt) atau air payau (0,5–30 ppt) menjadi air tawar (0–0,5 ppt) dan air garam (lebih dari 50 ppt) melalui penguapan dan kondensasi menggunakan energi matahari (Elgendi et al., 2022). Namun, tantangan utama yang membatasi penerapan desalinasi air laut secara lebih luas adalah penggunaan energinya yang intensif, yang melemahkan keberlanjutan ekonomi dan lingkungan dari teknologi desalinasi (Son, Shahzad, Ghaffour, & Ng, 2020). Alat penyuling air tenaga surya dikategorikan menjadi dua kategori utama, yaitu aktif dan pasif (Bhambare, Majumder, & Sudhir, 2018). Pada alat penyuling air tenaga surya aktif, mode sekunder eksternal digunakan untuk meningkatkan kinerja sistem dengan memanfaatkan pemanasan awal, perangkat mekanis atau listrik, perangkat pemanas tambahan, atau pasokan air panas. Pada alat penyuling air tenaga surya pasif, alat penyuling air tenaga surya bekerja sebagai perangkat mandiri tanpa mode eksternal apa pun, tetapi reflektor atau kondensor dapat dipasang pada alat penyuling air tenaga surya tersebut (El-Said, Elshamy, & Kabeel, 2020).

Proses desalinasi meliputi osmosis terbalik, teknologi membran, kompresi uap, pertukaran ion, dan desalinasi beku, dll., yang digunakan untuk mengekstrak tetesan air murni dari air asin atau air yang terkontaminasi. Meskipun teknologi ini mahal, teknologi ini memiliki kapasitas volume untuk memenuhi kebutuhan air tawar bagi sebagian masyarakat. Namun, teknologi ini memiliki dampak buruk terhadap lingkungan secara langsung maupun tidak langsung (Abu-Hijleh,

2003). Dalam ulasan yang disimpulkan oleh Fath (1998) (Fath, 1998) disarankan menggunakan alat penyuling air tenaga surya sebagai teknologi yang menjanjikan diantara berbagai proses distilasi dalam menghasilkan air minum karena menggunakan teknologi energi yang sederhana dan bersih serta paling cocok untuk daerah pedesaan dan terpencil. Desalinasi dengan alat penyuling air tenaga surya merupakan teknologi yang menjanjikan dan cocok untuk sistem produksi skala kecil guna mendukung kegiatan kehidupan masyarakat di mana kebutuhan air tawar terbatas hingga 200 m<sup>3</sup>/hari dan biaya lahan mahal (D'Cotha et al., 2021). Mohan et al. (2019) (Mohan, Yadav, Panchal, & Brahmabhatt, 2019) melaporkan masa depan alat penyuling air tenaga surya yang dilengkapi dengan beberapa wadah, sirip, dan bahan penyerap yang sesuai dalam menghasilkan air minum menggunakan sinar matahari. Asadi et al. (2013) (Asadi, Suja, & Ruslan, 2013) dalam penelitian mereka, diamati kemampuan alat penyuling air tenaga surya bertahap untuk secara efektif menghilangkan komponen organik/anorganik dan juga untuk secara efisien mendisinfeksi bakteri yang terkandung dalam air limbah.

Beberapa penelitian telah dilaporkan mengenai sistem penyulingan surya miring dengan beberapa nampan. Mulyanef (2015) (Mulyanef, Saputra, Kaidir, & Duskiardi, 2015) telah melakukan desalinasi air yang meneliti pengaruh kecepatan udara dan efisiensi kolektor surya pelat datar dua lintasan dengan 2 penutup kaca terhadap kinerja unit desalinasi surya berbasis pompa panas menggunakan proses humidifikasi dan dehumidifikasi. Unit ini terdiri dari sistem pompa panas, humidifier, dehumidifier, dan pemanas udara surya pelat datar dua lintasan dengan dua penutup kaca. Dalam penelitian ini, kecepatan udara divariasikan sebesar 3 m/detik, 4 m/detik, 5 m/detik, dan 6 m/detik, sedangkan intensitas radiasi matahari adalah 828 W/m<sup>2</sup>. Volume distilat yang dihasilkan pada penelitian Mulyanef adalah 2012 mL/hari dengan iradiasi matahari 451 W/m<sup>2</sup> dan penelitian dilakukan selama 1 hari. Studi lain tentang alat penyuling surya tunggal dengan cermin cekung telah dilakukan oleh Instanto *et al.* (Zulkarnain, Raharjo, & Instanto). Hasilnya menunjukkan penurunan TDS dari 27.000 ppm menjadi 4 ppm; pH antara 5,095 – 5,252; dan volume produksi antara 1180 mL – 1718 mL.

Pada penelitian ini, desalinasi dilakukan menggunakan metode penyulingan surya satu tahap dengan desain distilasi bertingkat yang dilengkapi dengan penyerap flanel hitam dan coklat tua. Untuk memaksimalkan efisiensi alat desalinasi surya, dilakukan pengujian dengan variasi ketebalan kaca penutup untuk menentukan ketebalan kaca optimum yang dapat mentransmisikan radiasi matahari ke dalam kotak evaporator dan sudut kemiringan kotak evaporator untuk menentukan sudut maksimum kotak evaporator dalam memperoleh radiasi matahari guna mendapatkan kuantitas air suling maksimum.

## 1.2 Maksud dan Tujuan

Maksud dari penelitian ini adalah untuk menguji kinerja dari proses desalinasi menggunakan *single-stage solar still* desain distilasi bertingkat dengan variasi ketebalan kaca penutup dan sudut kemiringan kotak penguap.

Tujuan dari penelitian yang dilakukan adalah:

1. Menganalisis efisiensi kuantitas air distilat optimum dari alat desalinasi dengan menggunakan variasi sudut kemiringan kotak penguap sebesar 25°, 30° dan 45° dan ketebalan kaca 3 mm, 5 mm, 8 mm, dan 10 mm.
2. Menganalisis hubungan antara perpindahan panas internal, perpindahan panas eksternal dan perpindahan panas keseluruhan dengan efisiensi aktual alat desalinasi dalam menghasilkan air distilat.
3. Menganalisis kuantitas dan kualitas air distilat, air umpan, dan *brine*.
4. Mengestimasi biaya pembuatan alat desalinasi *multiple tilted solar still* dengan luas 0,8 m<sup>2</sup>.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Komponen Air dalam Sistem Desalinasi

Air umpan adalah air laut yang mengandung 3,5% garam, gas, bahan organik, dan partikel tak larut. Dalam 1000 gram air laut, 96,5% adalah air murni dan 3,5% adalah zat terlarut. Ini berarti, terdapat 35 gram senyawa terlarut dalam setiap 1000 gram air laut. Zat terlarut meliputi garam anorganik. Fraksi terbesar dari bahan terlarut terdiri dari garam anorganik dalam bentuk ion. Enam ion anorganik (klorin, natrium, sulfur, magnesium, kalsium, dan kalium) merupakan komponen utama (99,28%) berdasarkan berat dari materi anorganik. Empat ion (bikarbonat, bromida, asam borat, stronsium) menambahkan 0,71% berdasarkan berat hingga sepuluh ion bersama-sama sebagai zat terlarut dalam air laut. Air payau memiliki salinitas yang lebih rendah daripada air laut. Nilai DHL (daya hantar listrik) yang tinggi berbanding lurus dengan konsentrasi salinitas. Semakin tinggi nilai salinitas air, semakin tinggi konsentrasi DHL (Rosari, Hadi, & Masduqi, 2014).

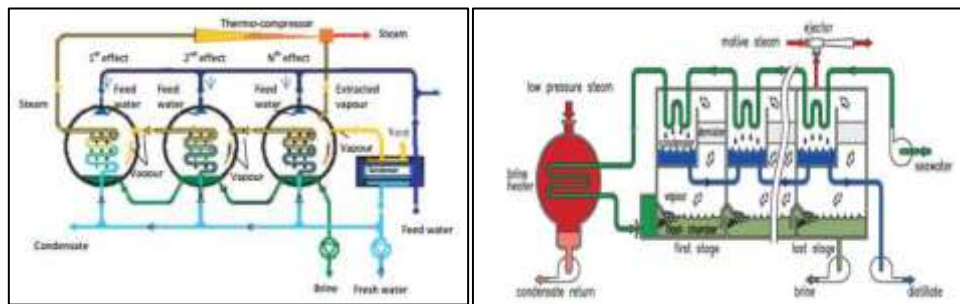
Proses distilasi menghasilkan air berkualitas tinggi dengan nilai TDS (*Total Dissolved Solid*) dalam kisaran 1,0 – 50 ppm. Secara umum, air distilat akan memiliki padatan terlarut rendah, kesadahan rendah, kemampuan penyangga rendah, dan konsentrasi gas terlarut yang relatif tinggi, mungkin juga mengandung bahan kimia yang agresif dan korosif. Jika tidak ada kebocoran maka kontaminasi mikrobiologis akan kecil. Untuk penggunaan domestik, pengolahan lebih lanjut diperlukan untuk memastikan bahwa air yang dihasilkan dari desalinasi dapat memenuhi standar kualitas air minum. Dalam hal ini, karakteristik air suling akan dibandingkan dengan Kepmenkes No. 492/MENKES/SK/IV/2010 (Kusumadewi, Notodarmodjo, & Helmy, 2018).

*Brine* adalah produk sampingan dari proses desalinasi berupa larutan garam yang sangat pekat (lebih dari 35.000 mg/L). Kandungan garam dalam konsentrat ini lebih tinggi daripada kandungan garam dalam air umpan, sehingga konsentrat ini tidak lagi dibutuhkan. Konsentrat *brine* juga mengandung senyawa pembentuk kerak dan memiliki titik didih yang tinggi. Konsentrat juga dapat mengandung senyawa kimia dari pra-perlakuan (Kusumadewi, Notodarmodjo, & Helmy).

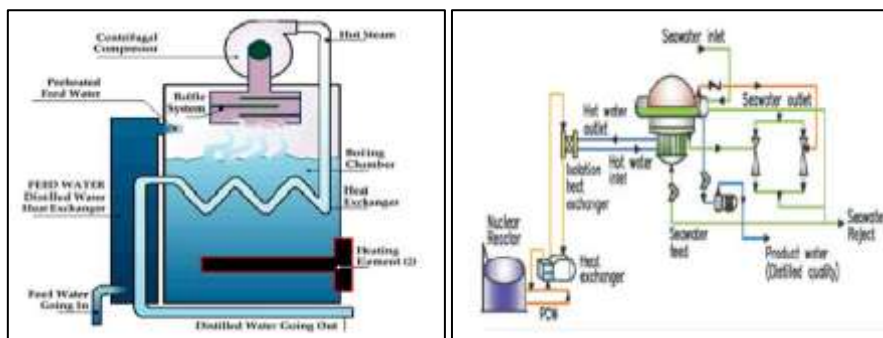
## 2.2 Desalinasi Air Laut

Ada tiga metode yang umumnya digunakan pada desalinasi air laut, yaitu dengan metode desalinasi termal, pertukaran ion (*ion exchange*), dan dengan menggunakan membran (*membrane processes*) (Amin & Ahmed Al Bazed, 2020).

Desalinasi termal dilakukan dengan memanaskan air baku untuk menghasilkan uap air dan kemudian uap air tersebut akan dikondensasi menjadi air dengan salinitas yang lebih rendah. Desalinasi termal ini umumnya digunakan pada air laut karena tingginya jumlah energi yang diperlukan dan dapat dibagi lagi menjadi *multistage flash distillation* (MSF), *multi-effect distillation* (MED), *vapour compression* (VC), *low temperature evaporation* (LTE), *Solar Desalination*, dan *Vacuum Freeze Desalination* (VFD) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 dan Gambar 2.2 (Oyoh, 2016).



**Gambar 2.1** *Multistage flash distillation* (MSF) dan *multi-effect distillation* (MED)

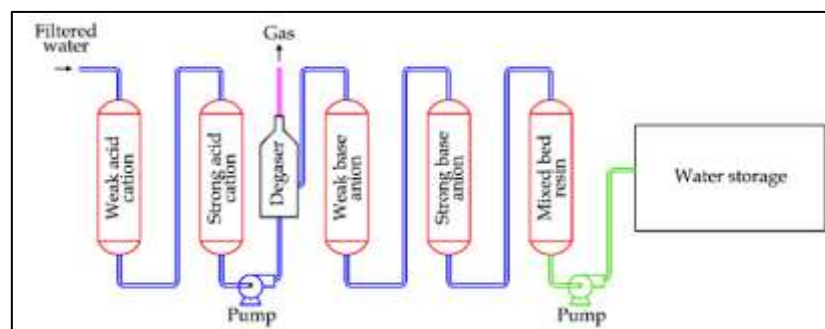


**Gambar 2.2** *Vapour compression* (VC) dan *low temprature evaporation* (LTE)

Pada metode MSF, air laut dievaporasi dan dikondensasi dengan adanya perbedaan tekanan pada setiap tahapnya. Sementara pada metode MED, air umpan dipanaskan hingga air menguap dalam tahapan yang berbeda sampai akhirnya terbentuk air tawar atau distilat. Kemudian untuk metode VC air dipanaskan dengan menggunakan panas yang berasal dari uap bertekanan (Manju & Sagar, 2017). Dalam pelaksanaannya, jumlah air yang masuk ke dalam alat desalinasi termal harus diperhatikan, karena jumlah air yang berlebih dapat menyebabkan nilai

kehilangan termal menjadi lebih tinggi dan berdampak pada kuantitas distilat yang dihasilkan (Pak, 2014).

Teknologi *ion exchange* merupakan salah satu metode desalinasi yang melibatkan pertukaran ion larutan dengan ion lain bermuatan sama yang melekat pada partikel padat tidak bergerak seperti resin organik sintesis. Proses *ion exchange* ini bermula dari adanya air umpan yang dialirkan melalui penukar kation yang kemudian akan mengubah garam influen pada air dengan menukar ion  $H^+$  dalam jumlah yang setara dengan kation yang terdapat pada air influen ( $Na^+$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{3+}$ ). Lalu, asam-asam tersebut akan dihilangkan dengan mengalirkannya lagi melalui alkali yang dihasilkan oleh resin penukar anion yang menukar ion  $OH$  dengan anion-anion pada larutan ( $Cl^-$ ,  $SO^-$ ,  $NO^-$ ) dalam jumlah yang setara. Kemudian, ion  $H$  dan  $OH$  akan saling menetralkan sehingga dapat dihasilkan air efluen yang salinitasnya lebih rendah daripada air influen (Cheremisinoff, 2001). Salah satu contoh desalinasi dengan menggunakan metode *ion exchange* yang dapat dilihat pada Gambar 2.3 berikut.

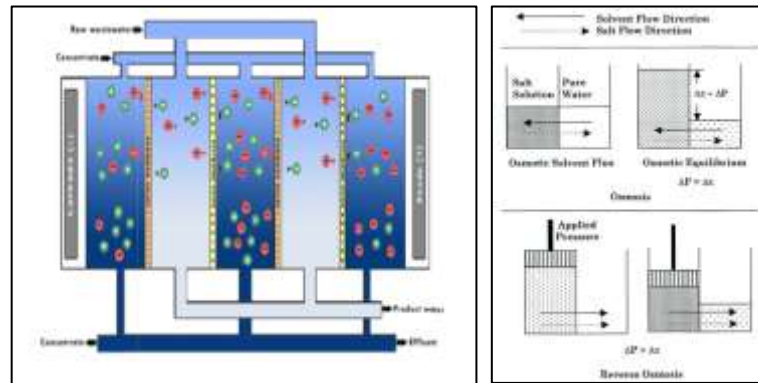


**Gambar 2.3** Desalinasi *Ion Exchange* (Curto *et al.*, 2021)

Pada desalinasi dengan menggunakan membran, membran digunakan sebagai pembatas agar molekul-molekul berukuran besar dapat terpisah dari molekul-molekul yang berukuran kecil (Curto, 2021). Menurut Kucera (2014), desalinasi dengan menggunakan membran dapat dibagi menjadi beberapa metode, yaitu *continuous electrodeionization* (CEDI), dialisis, *electrodialysis/electrodialysis reversal* (ED / EDR), *reverse osmosis* (RO), *forward osmosis* (FO), distilasi membran (MD), dan dengan nanofiltration (NF). Salah satu contoh dari desalinasi dengan menggunakan membran, yaitu *electrodialysis / electrodialysis reversal* (ED / EDR) dan *reverse osmosis* (RO) dapat dilihat pada Gambar 2.4.

Dari beberapa metode desalinasi air laut, desalinasi membran dengan metode RO merupakan salah satu metode yang paling banyak digunakan. Pada metode RO, dilakukan proses secara fisik dengan memanfaatkan proses osmosis. Pada air laut, tekanan osmotik yang lebih besar akan diberikan sehingga proses osmosis akan berlangsung terbalik, yaitu dari air laut ke air

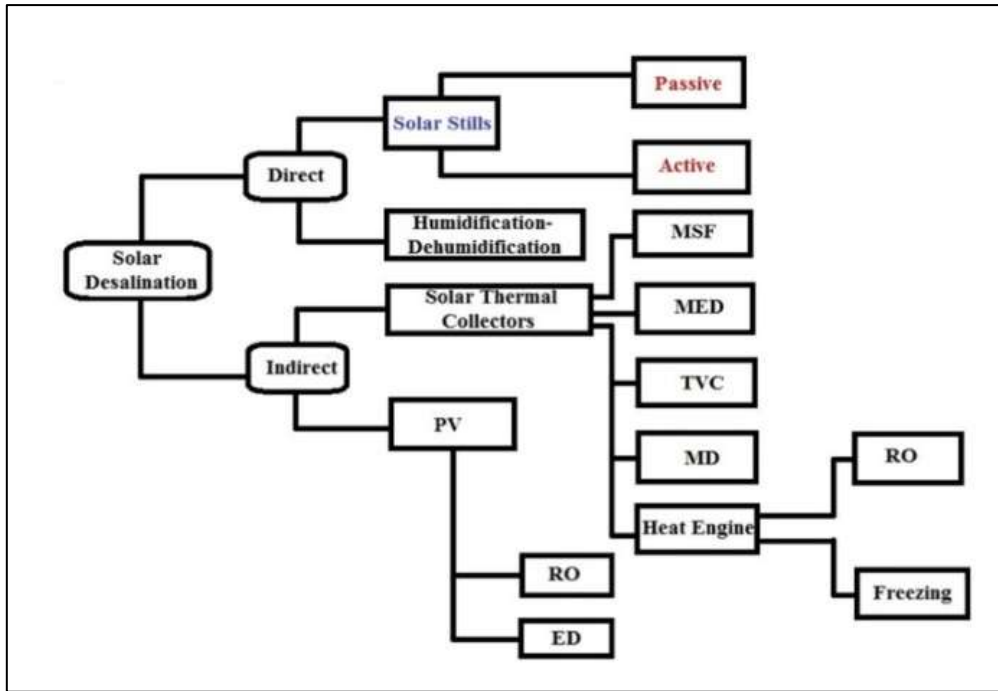
tawar dengan melewati membran semipermeabel sehingga garam dapat tersisihkan (Younos & Tulou, 2009).



**Gambar 2.4** *Electrodialysis / Electrodialysis Reversal (ED / EDR)*

### 2.3 Solar Desalination

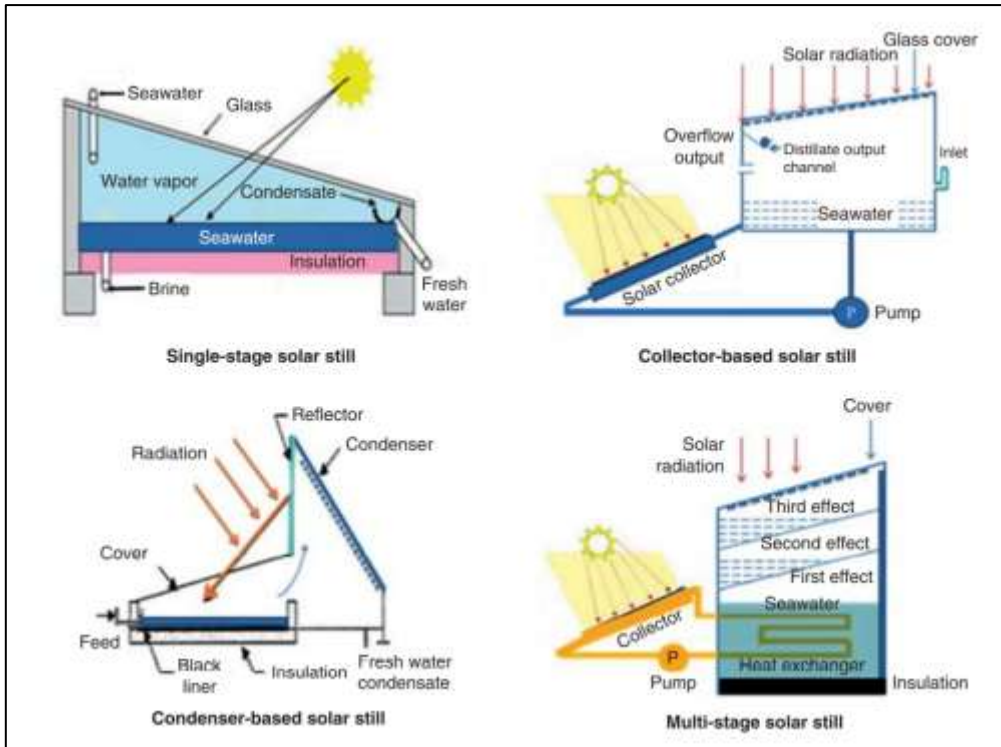
*Solar desalination* adalah desalinasi termal dengan menggunakan tenaga matahari dan biasanya digunakan untuk produksi air dalam skala kecil terutama pada tempat-tempat terpencil seperti kepulauan dan pesisir pantai. Hal ini disebabkan karena biayanya yang tidak terlalu mahal dan sumber energi matahari yang digunakan sebagai pemanas mudah untuk didapat. Namun, diperlukan perawatan dan pemeliharaan rutin pada alat yang digunakan agar tidak ditumbuhi oleh alga dan tidak ada celah yang dapat mengurangi efisiensi alat yang digunakan (Oyoh, 2016). *Solar desalination* diklasifikasikan menjadi tipe *direct solar desalination* dan *indirect solar desalination* yang kemudian terbagi lagi menjadi beberapa jenis seperti pada Gambar 2.5 (Tiwari & Sahota, 2017).



**Gambar 2.5** Klasifikasi *Solar Desalination* (Tiwari & Sahota, 2017)

### 2.3.1 *Solar Still*

Metode *solar still* termasuk dalam tipe *direct solar desalination* dan dibagi lagi menjadi 2 jenis yaitu pasif dan aktif. Pada tipe aktif, alat desalinasi yang digunakan menggunakan sumber panas eksternal lain selain dari matahari. Sementara pada tipe pasif, sumber panas yang digunakan hanya dari matahari saja (Tiwari & Sahota, 2017). Pada penelitian ini akan digunakan *solar still* dengan tipe pasif. *Solar still* sendiri merupakan metode desalinasi dimana panas dari matahari dikumpulkan di dalam kotak desalinasi dan dengan prinsip efek rumah kaca, temperatur di dalam kotak penguap akan naik dan air akan menguap menjadi kondensat, kemudian kondensat tersebut akan jatuh melalui atap kotak penguap. Efisiensi dari metode *solar still* ini bergantung pada radiasi matahari, kecerahan langit, temperatur udara, dan kecepatan angin. Sementara untuk jumlah distilat yang dihasilkan bergantung pada *brine depth*, kebocoran uap (*vapor leakage*), jenis material dari kaca yang digunakan, *slope* kaca penutup, dan lain sebagainya (Kucera, 2014). Untuk beberapa jenis-jenis rancangan desalinasi dengan menggunakan metode *solar still* dapat dilihat pada Gambar 2.6 berikut ini.



**Gambar 2.6** Jenis-jenis Rancangan Desalinasi *Solar still* (Kucera, 2014)

### 2.3.2 Kehilangan Panas Internal pada *Solar Still*

Kehilangan panas merupakan salah satu faktor penting yang mempengaruhi efisiensi dari *solar still* yang digunakan (Aqlan *et al.*, 2021). Kehilangan panas internal pada kotak penguap terjadi antara air di dalam kotak penguap dengan kaca penutup bagian dalam kotak penguap. Menurut Belessiotis (2016), perhitungan kehilangan panas internal pada *solar still* dapat dilakukan berdasarkan beberapa parameter yaitu perpindahan panas konveksi, radiasi, dan evaporasi.

#### A. Perpindahan panas konveksi

Perpindahan panas secara konveksi pada *solar still* terjadi antara permukaan air dengan permukaan kaca penutup bagian dalam dan dapat digunakan persamaan (Belessiotis *et al.*, 2016):

$$q_{cwg} = h_{cwg} (T_w - T_{gi}) \quad (2.1)$$

dimana  $h_{cwg}$  sebagai koefisien perpindahan panas secara konveksi.  $h_{cwg}$  dapat dihitung dengan menggunakan model yang dikembangkan oleh Dunkle (1961):

$$h_{cwg} = 0.884 \left[ (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi}) T_w}{268000 - P_w} \right]^{1/3} \quad (2.2)$$

$$P_w = \exp \left( 25.317 - \frac{5144}{T_w} \right) \quad (2.3)$$

$$P_{gi} = \exp\left(25.317 - \frac{5144}{T_{gi}}\right) \quad (2.4)$$

dimana:

$T_w$  = temperatur permukaan air di dalam *solar still* (K)

$T_{gi}$  = temperatur permukaan kaca bagian dalam (K)

$P_w$  = tekanan uap pada permukaan air (Pa)

$P_{gi}$  = tekanan uap pada permukaan kaca penutup bagian dalam (Pa)

## B. Perpindahan panas radiasi

Perpindahan panas radiasi terjadi antara permukaan air dengan permukaan penutup kaca bagian dalam, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Belessiotis *et al.*, 2016):

$$q_{rwg} = \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_{gi}^4) \quad (2.5)$$

$$q_{rwg} = h_{rwg}(T_w - T_{gi}) \quad (2.6)$$

dimana,  $h_{rwg}$  adalah koefisien perpindahan panas radiasi dan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (Belessiotis *et al.*, 2016):

$$h_{rwg} = \sigma \varepsilon (T_w^2 + T_{gi}^2)(T_w + T_{gi}) \quad (2.7)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{1}{\varepsilon_{gi}} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1\right)^{-1} \quad (2.8)$$

dimana:

$\sigma$  = konstanta Stefan Boltzmann ( $5.67032 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$ )

$\varepsilon_{gi}$  = emissivitas permukaan kaca penutup bagian dalam (0,94)

$\varepsilon_w$  = emisivitas permukaan air (0,95)

## C. Perpindahan panas evaporasi

Perpindahan evaporasi terjadi karena adanya penguapan pada *solar still* antara permukaan penutup kaca bagian dalam dengan permukaan air di dalam *basin* (Belessiotis *et al.*, 2016). Perpindahan panas evaporasi karena penguapan ini dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Onoroh *et al.*, 2021):

$$q_{ewg} = h_{ewg}(T_w - T_{gi}) \quad (2.9)$$

dimana  $h_{ewg}$  merupakan koefisien perpindahan panas evaporasi karena penguapan dan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh Dunkle (1961):

$$h_{ewg} = 16.276 \times 10^{-3} \frac{(P_w - P_{gi})}{(T_w - T_{gi})} q_{cwg} \quad (2.10)$$

#### D. Koefisien perpindahan panas keseluruhan internal

Koefisien perpindahan panas keseluruhan di dalam *solar still* merupakan jumlah koefisien perpindahan panas keseluruhan yang terjadi di dalam *solar still*, yaitu perpindahan panas secara konveksi, radiasi, dan evaporasi yang terjadi antara permukaan air di basin dan permukaan kaca dan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Belessiotis *et al.*, 2016):

$$U_{wg} = h_{cwg} + h_{rwg} + h_{ewg} \quad (2.11)$$

#### 2.3.3 Kehilangan Panas Eksternal pada *Solar Still*

Kehilangan panas eksternal pada kotak penguap terjadi antara permukaan kaca penutup bagian luar dengan udara ambien. Kehilangan panas eksternal ini melibatkan perpindahan panas secara konduksi, konveksi, dan radiasi. Pada bagian atas *solar still*, yaitu antara kaca penutup dan udara ambien, kehilangan panas dihitung berdasarkan perpindahan panas secara konveksi dan radiasi yang dapat diketahui dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Gupta *et al.*, 2013):

$$q_{cga} = h_{cga} (T_{go} - T_a) \quad (2.12)$$

$$q_{rga} = h_{rga} (T_{go} - T_a) \quad (2.13)$$

Koefisien perpindahan panas dari kedua persamaan tersebut dapat diketahui dengan menggunakan Persamaan 2.14 dan 2.15 berikut:

$$h_{cga} = 2,8 + (3,0 \times v) \quad (2.14)$$

$$h_{rga} = \varepsilon_g \sigma \left[ \frac{T_{go}^4 - T_{sky}^4}{(T_{go} - T_a)} \right] \quad (2.15)$$

Untuk temperatur udara pada Persamaan 2.15,  $T_{sky}$  dapat diketahui dengan Persamaan 2.16 berikut:

$$T_{sky} = T_a - 6 \quad (2.16)$$

dimana:

$q_{cga}$  = Kehilangan panas eksternal karena konveksi ( $W/m^2$ )

$q_{rga}$  = Kehilangan panas eksternal karena radiasi ( $W/m^2$ )

$h_{cga}$  = Koefisien kehilangan panas eksternal karena konveksi ( $W/m^2K$ )

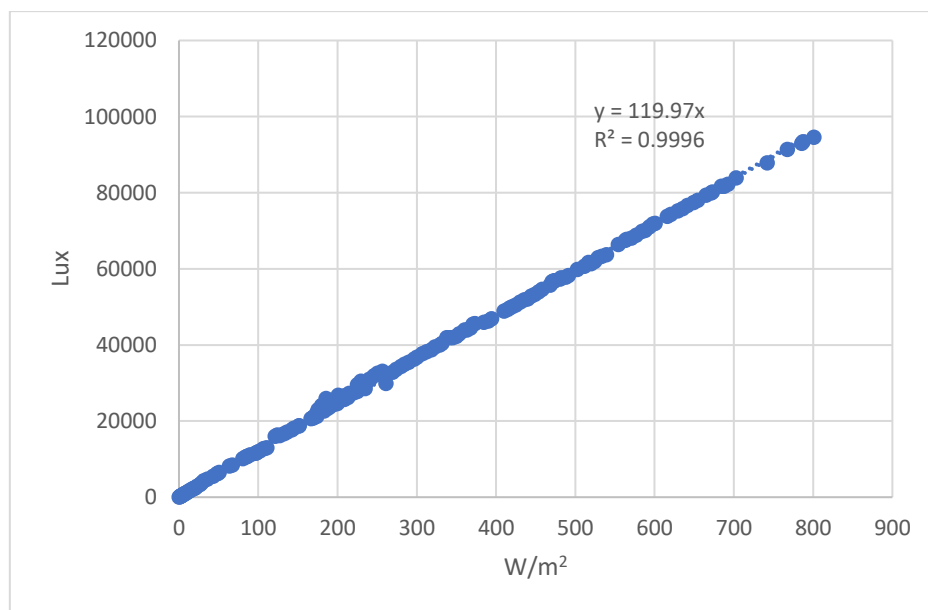
$h_{rga}$  = Koefisien kehilangan panas eksternal karena radiasi ( $W/m^2K$ )

$v$  = Kecepatan angin (m/s)

$T_a$  = Temperatur udara ambien (K)

$T_{go}$  = Temperatur kaca penutup bagian luar (K)

Daya yang dipancarkan dari suatu benda dengan benda lainnya memiliki nilai yang berbeda-beda. Karena itu, tidak ada rumus pasti untuk mengkonversi intensitas cahaya menjadi  $W/m^2$ . Dengan demikian, konversi intensitas cahaya akan dilakukan dengan menggunakan persamaan yang didapat dari grafik hasil penelitian lain. Dalam penelitian ini, akan digunakan persamaan dari grafik hubungan antara intensitas cahaya (Lux) terhadap radiasi matahari ( $W/m^2$ ) yang didapat dari hasil studi yang telah dilakukan oleh Michael (2020) dan dapat dilihat pada Gambar 2.7.



**Gambar 2.7** Grafik Hubungan Satuan Lux terhadap  $W/m^2$  (Michael, 2020)

Dari Grafik pada Gambar 2.7 didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$Y = 119,97X \quad (2.12)$$

dimana:

Y = Satuan Lux

X = Satuan  $W/m^2$

$$\text{Oleh karena itu, Intensitas } (W/m^2) = \frac{\text{Intensitas (Lux)}}{119,97} \quad (2.13)$$

## 2.4 Efisiensi Pengolahan Alat Desalinasi

Efisiensi pengolahan dari alat desalinasi dapat diketahui dengan membandingkan hasil sebelum dan sesudah dilakukannya pengolahan. Pada penelitian ini ada dua jenis efisiensi pengolahan

yang akan diperhitungkan yaitu efisiensi kuantitas distilat dan efisiensi parameter yang disisihkan.

### A. Efisiensi Teoritis

Menurut Iqbal (2019), efisiensi teoritis (termal) *solar still* dapat diketahui dengan membandingkan energi penguapan air dengan energi masuk dari radiasi matahari:

$$Efisiensi\ termal = \frac{Q_u}{Q_{in}} \times 100\% \quad (2.14)$$

$$Q_u = M_d \times C \times \Delta T + M_d \times h_{fg} \quad (2.15)$$

$$Q_{in} = \alpha \times I(t)_s \times A_c \times t \quad (2.16)$$

dimana:

$C$  = Kalor jenis air (J/kg°C)

$\Delta T$  = Perbedaan temperatur (°C)

$M_d$  = Massa air distilat (kg)

$h_{fg}$  = Panas laten penguapan (J/kg)

$\alpha$  = Absorpsivitas penyerap

$I(t)_s$  = Intensitas cahaya matahari (W/m<sup>2</sup>)

$A_c$  = Luas plat penyerap (m<sup>2</sup>)

$t$  = Lama waktu yang digunakan (s)

Pada kain hitam dapat digunakan nilai absorptivitas 1 (Engineering Toolbox, 2009). Untuk kalor jenis air, dapat digunakan nilai 4.196 J/kg°C (Carvill, 1983). Sementara untuk massa air pada Persamaan 2.6 bisa didapatkan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$M_{air} = V \times \rho \quad (2.17)$$

dimana:

$V$  = Volume (m<sup>3</sup>)

$\rho$  = Massa jenis (kg/m<sup>3</sup>)

### B. Efisiensi kuantitas distilat (Efisiensi aktual)

Menurut Hasanah (2016), efisiensi kuantitas distilat dapat diketahui dengan membandingkan volume distilat yang dihasilkan oleh *solar still* dengan volume air yang masuk ke dalam *solar still*.

$$Efisiensi\ kuantitas = \frac{Volume\ distilat\ dari\ SS}{Volume\ air\ yang\ masuk\ SS} \times 100\% \quad (2.18)$$

### C. Efisiensi penyisihan parameter

Efisiensi penyisihan parameter dari suatu unit pengolahan dapat diperoleh menggunakan persamaan sebagai berikut (Andarani, 2015):

$$Efisiensi\ penyisihan = \frac{C_{in} - C_{out}}{C_{in}} \times 100\% \quad (2.19)$$

dimana:

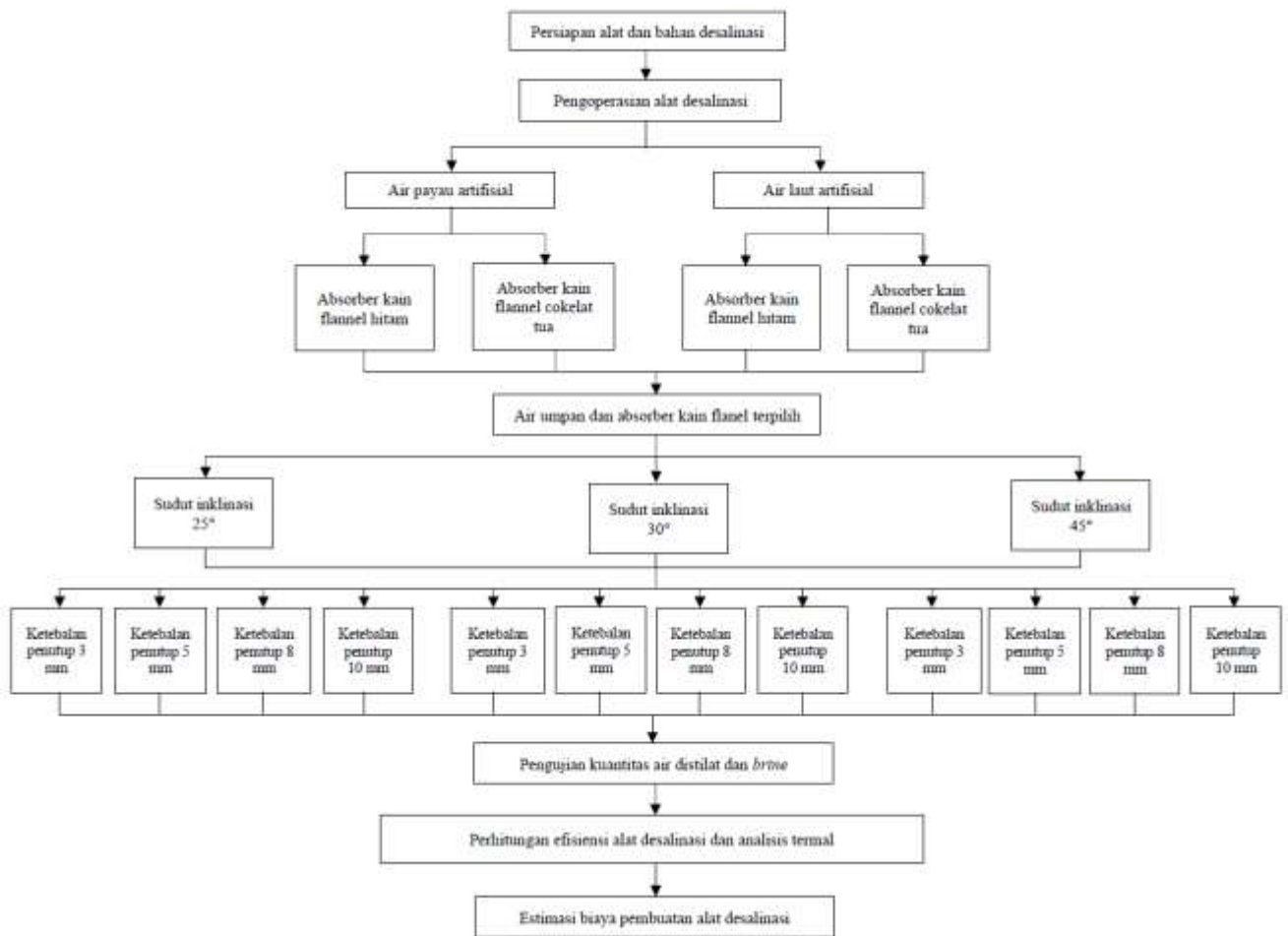
$C_{in}$  = konsentrasi parameter yang masuk

$C_{out}$  = konsentrasi parameter yang keluar

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Tahapan Penelitian

Penelitian tentang desalinasi air laut dengan sistem air terdesentralisasi menggunakan alat *multiple trays tilted solar still*, dilakukan dalam beberapa tahapan pengujian, terutama pengoperasian peralatan desalinasi yang terdiri dari variasi jenis air umpan dan absorber, pemilihan jenis air umpan dan absorber yang optimal, pengoperasian peralatan desalinasi dengan variasi sudut kemiringan dan ketebalan penutup, kemudian dilanjutkan dengan pengujian kuantitas air distilat dan air garam, dan terakhir adalah perhitungan efisiensi peralatan desalinasi dan analisis termal, serta estimasi biaya. Tahapan penelitian yang digunakan dalam studi ini ditunjukkan sebagai diagram alir pada Gambar 1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

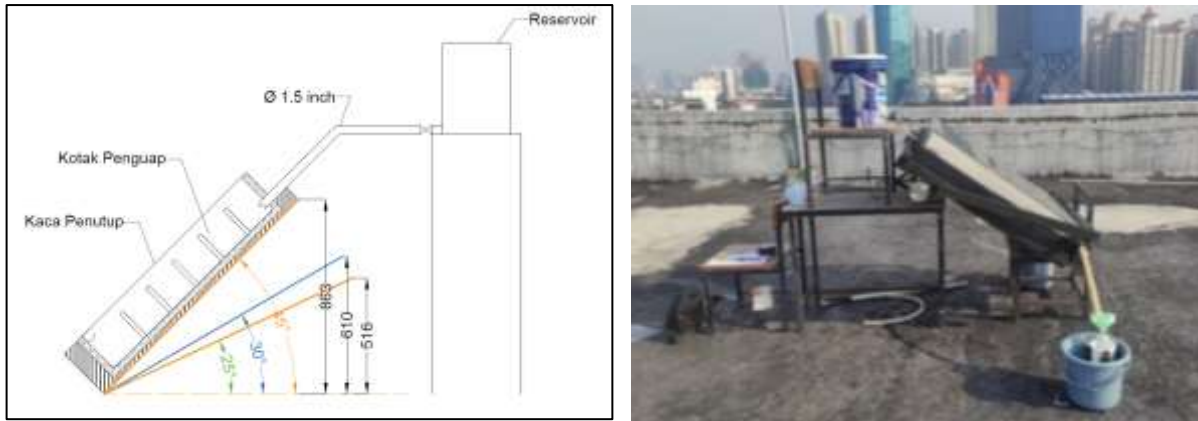
### 3.2 Experimental Setup

Pada penelitian ini, peralatan yang disiapkan adalah seperangkat peralatan desalinasi yang terdiri dari reservoir air dan *solar still*. Jenis *solar still* yang digunakan pada penelitian ini adalah *single stage* dengan penutup kaca. Bahan yang digunakan adalah garam laut dan air bersih dari Perusahaan Air Minum Daerah (PDAM) untuk membuat air umpan. Air umpan dibuat dengan mencampur air dari PDAM dengan garam NaCl dengan rasio untuk air payau artifisial adalah 15 gram garam NaCl per 1 liter air dan rasio untuk air laut artifisial adalah 40 gram garam NaCl per 1 liter air.

Pada awal penelitian, dalam pengoperasian peralatan desalinasi, berbagai jenis air umpan dan absorber telah diuji. Air umpan yang digunakan terdiri dari air payau artifisial dan air laut artifisial, sedangkan absorber yang digunakan adalah kain flanel hitam dan cokelat tua. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan variasi jenis air umpan dan absorber optimal yang akan digunakan untuk percobaan selanjutnya.

Setelah menguji jenis air umpan dan absorber optimal, dilanjutkan dengan pengujian peralatan desalinasi untuk variasi sudut kemiringan kotak evaporator dan ketebalan penutup kaca. Variasi sudut kemiringan kotak evaporator yang digunakan adalah 25°, 30° dan 45° sedangkan variasi ketebalan penutup yang digunakan adalah 3 mm, 5 mm, 8 mm dan 10 mm. Pengukuran kuantitas air distilat dan *brine* dilakukan setiap jam ketika peralatan desalinasi dioperasikan, yaitu pada pukul 09.00, 10.00, 11.00, 12.00, 13.00, 14.00, 15.00, dan 16.00. Pengukuran jumlah air umpan hanya dilakukan sekali sebelum pengoperasian peralatan desalinasi.

Pada penelitian ini, digunakan alat desalinasi *single stage solar still*. Air akan dialirkan ke dalam kotak evaporator secara terus-menerus selama 7 jam setiap kali alat desalinasi diuji. Alat desalinasi dirancang berbentuk persegi panjang dengan dimensi 1 m × 0,8 m. Alat desalinasi yang digunakan terbuat dari kayu dan bagian dalamnya dilapisi *styrofoam* yang berfungsi sebagai isolator panas untuk meminimalkan panas yang keluar dari kotak evaporator. Kemudian di dalam lapisan *styrofoam*, lapisan aluminium juga digunakan agar panas dapat terdistribusi secara merata. Di atas lapisan aluminium, flanel hitam dan cokelat tua digunakan sebagai absorber untuk menyerap air yang masuk ke kotak evaporator sehingga air tidak langsung mengalir ke saluran *brine* yang diharapkan dapat meningkatkan efisiensi peralatan desalinasi yang akan digunakan. Peralatan desalinasi juga dilengkapi dengan reservoir dengan pipa outlet 25 mm. Perangkat desalinasi yang digunakan pada penelitian ini ditampilkan pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Perangkat Desalinasi Tenaga Surya (a) Sketsa dan (b) Gambar Nyata

### 3.3 Perhitungan Efisiensi Alat Desalinasi

Efisiensi peralatan menunjukkan kinerja peralatan desalinasi, pada penelitian ini membandingkan efisiensi teoritis dan efisiensi aktual peralatan sebagai berikut (Dewantara, Suyitno, & Lesmana, 2018):

$$\eta_{aktual} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times 100\% \quad (3.1)$$

dengan  $\eta_{aktual}$  adalah efisiensi aktual (%),  $V_{out}$  adalah volume air distilat yang dihasilkan (mL),  $V_{in}$  adalah volume air umpan yang masuk (mL). Menurut (Iqbal, Sukmawaty, Putra, & Setiawati, 2019), parameter yang dihitung pada sistem desalinasi tenaga surya adalah:

$$\text{Keseimbangan massa,} \quad \Sigma_t(\rho \cdot A \cdot V)_{in} = \Sigma_t(\rho \cdot A \cdot V)_{out} + V_{garam} \quad (3.2)$$

$$\text{Energi radiasi yang diserap oleh pelat penyerap,} \quad Q_{in} = \alpha \cdot IT_{tot} \cdot A_c \quad (3.3)$$

$$\text{Energi bermanfaat dalam distilasi air laut,} \quad Q_u = m \cdot C_p \cdot \Delta T + m \cdot h_{fg} \quad (3.4)$$

$$\text{Efisiensi teoritis peralatan desalinasi air laut tenaga surya,} \quad \eta_{teoritis} = \frac{Q_u}{Q_{in}} \times 100\% \quad (3.5)$$

dimana  $\rho$  adalah densitas air laut ( $kg/m^3$ ), A adalah luas permukaan laut ( $m^2$ ), V adalah volume air laut area ( $m^3$ ), V adalah volume air laut (liter),  $IT_{total}$  adalah intensitas matahari total ( $W/m^2$ ),  $\alpha$  adalah penyerapan pelat penyerap (0,50),  $Q_{in}$  adalah energi radiasi yang mencapai pelat penyerap (Watt),  $Q_u$  adalah energi berguna untuk kolektor (Watt), m adalah massa zat yang diuapkan (liter),  $\Delta T$  adalah perbedaan temperatur ( $^{\circ}C$ ),  $h_{fg}$  adalah panas laten

penguapan ( $22.6 \times 10^5 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ),  $\eta_{teoritis}$  adalah efisiensi teoritis peralatan desalinasi air laut tenaga surya (%).

### 3.4 Perhitungan Kehilangan Panas Internal pada *Solar Still*

Perpindahan panas secara konveksi pada *solar still* terjadi antara permukaan air dan permukaan kaca penutup bagian dalam, dan persamaan berikut dapat digunakan (Belessiotis, Kalogirou, & Delyannis, 2016):

$$q_{cwg} = h_{cwg} (T_w - T_{gi}) \quad (3.6)$$

dimana  $h_{cwg}$  adalah koefisien perpindahan panas melalui konveksi.  $h_{cwg}$  dapat dihitung menggunakan model yang dikembangkan oleh (Dunkle, 1961):

$$h_{cwg} = 0.884 \left[ (T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi}) T_w}{268000 - P_w} \right]^{1/3} \quad (3.7)$$

$$P_w = \exp \left( 25.317 - \frac{5144}{T_w} \right) \quad (3.8)$$

$$P_{gi} = \exp \left( 25.317 - \frac{5144}{T_{gi}} \right) \quad (3.9)$$

dimana  $T_w$  temperatur permukaan air pada *solar still* (K),  $T_{gi}$  adalah temperatur permukaan kaca bagian dalam (K),  $P_w$  adalah tekanan uap pada permukaan air (Pa), and  $P_{gi}$  adalah tekanan uap pada permukaan kaca penutup bagian dalam (Pa).

Perpindahan panas radiasi terjadi antara permukaan air dan permukaan bagian dalam penutup kaca, yang dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Belessiotis et al., 2016):

$$q_{rwg} = \sigma \varepsilon (T_w^4 - T_{gi}^4) \quad (3.10)$$

$$q_{rwg} = h_{rwg} (T_w - T_{gi}) \quad (3.11)$$

dimana,  $h_{rwg}$  adalah koefisien perpindahan panas radiasi dan dapat dihitung menggunakan persamaan (Belessiotis et al., 2016):

$$h_{rwg} = \sigma \varepsilon (T_w^2 + T_{gi}^2) (T_w + T_{gi}) \quad (3.12)$$

$$\varepsilon = \left( \frac{1}{\varepsilon_{gi}} + \frac{1}{\varepsilon_w} - 1 \right)^{-1} \quad (3.13)$$

dimana  $\sigma$  adalah konstanta Stefan Boltzmann ( $5,67032 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}$ ),  $\varepsilon_{gi}$  emisivitas permukaan kaca penutup bagian dalam (0,94), and  $\varepsilon_w$  adalah emisivitas permukaan air (0,95).

Perpindahan panas penguapan terjadi karena penguapan pada *solar still* diantara permukaan bagian dalam penutup kaca dan permukaan air di dalam wadah. (Belessiotis et al., 2016).

Perpindahan panas evaporatif akibat penguapan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Onoroh, Folorunsho, Ogbonnaya, & Onochie, 2021):

$$q_{ewg} = h_{ewg}(T_w - T_{gi}) \quad (3.14)$$

dimana  $h_{ewg}$  adalah koefisien perpindahan panas penguapan dan dapat dihitung menggunakan persamaan yang dikembangkan oleh (Dunkle, 1961):

$$h_{ewg} = 16.276 \times 10^{-3} \frac{(P_w - P_{gi})}{(T_w - T_{gi})} q_{cwg} \quad (3.15)$$

Koefisien perpindahan panas total pada *solar still* adalah jumlah dari koefisien perpindahan panas total yang terjadi pada *solar still*, yaitu perpindahan panas melalui konveksi, radiasi, dan penguapan yang terjadi antara permukaan air di dalam evaporator dan permukaan kaca, dan dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Belessiotis et al., 2016):

$$U_{wg} = h_{cwg} + h_{rwg} + h_{ewg} \quad (3.16)$$

### 3.5 Perhitungan Kehilangan Panas Eksternal pada *Solar Still*

Kehilangan panas eksternal di dalam kotak evaporator terjadi antara permukaan kaca penutup luar dan udara sekitar. Kehilangan panas eksternal ini melibatkan perpindahan panas melalui konduksi, konveksi, dan radiasi. Di bagian atas *solar still*, yang berada diantara kaca penutup dan udara sekitar, kehilangan panas dihitung berdasarkan perpindahan panas melalui konveksi dan radiasi yang dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut (Gupta, Mandraha, Edla, & Pandya, 2013):

$$q_{cga} = h_{cga} (T_{go} - T_a) \quad (3.17)$$

$$q_{rga} = h_{rga} (T_{go} - T_a) \quad (3.18)$$

Koefisien perpindahan panas dari kedua persamaan tersebut dapat ditemukan dengan menggunakan Persamaan 3.19 dan 3.20 berikut:

$$h_{cga} = 2,8 + (3,0 \times v) \quad (3.19)$$

$$h_{rga} = \varepsilon_g \sigma \left[ \frac{T_{go}^4 - T_{sky}^4}{(T_{go} - T_a)} \right] \quad (3.20)$$

Untuk temperatur udara pada Persamaan 3.20,  $T_{sky}$  dapat ditemukan dengan Persamaan 3.21 sebagai berikut:

$$T_{sky} = T_a - 6 \quad (3.21)$$

dimana  $q_{cga}$  adalah kehilangan panas eksternal akibat konveksi ( $\text{W/m}^2$ ),  $q_{rga}$  adalah kehilangan panas eksternal akibat radiasi ( $\text{W/m}^2$ ),  $h_{cga}$  adalah koefisien kehilangan panas eksternal akibat konveksi ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ),  $h_{rga}$  adalah koefisien kehilangan panas eksternal akibat radiasi ( $\text{W/m}^2\text{K}$ ),  $v$  adalah kecepatan angin ( $\text{m/s}$ ),  $T_a$  adalah temperatur udara ambien (K), and  $T_{go}$  adalah temperatur kaca penutup luar (K).

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Efisiensi Aktual dan Teoritis dari Alat Desalinasi Menggunakan Absorber Kain Flanel Hitam dan Cokelat Gelap

Analisis efisiensi aktual dilakukan dengan mengumpulkan data air umpan yang masuk dan volume air distilat total selama pengujian. Untuk mengetahui volume air umpan yang masuk, dilakukan pengukuran debit air umpan yang masuk dari reservoir. Efisiensi teoritis merupakan efisiensi yang dihasilkan berdasarkan analisis energi yang masuk dengan energi yang terpakai untuk menghasilkan air distilasi selama waktu pengujian. Perbandingan antara efisiensi aktual dan efisiensi teoritis dapat dilihat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Rekapitulasi Efisiensi

| Warna flanel  | Tipe Air             | Efisiensi Teoritis | Efisiensi Aktual |
|---------------|----------------------|--------------------|------------------|
| Hitam         | Air payau artifisial | 12,95%             | 3,50%            |
|               | Air laut artifisial  | 11,01%             | 3,52%            |
| Cokelat gelap | Air payau artifisial | 10,69%             | 3,19%            |
|               | Air laut artifisial  | 9,83%              | 2,83%            |

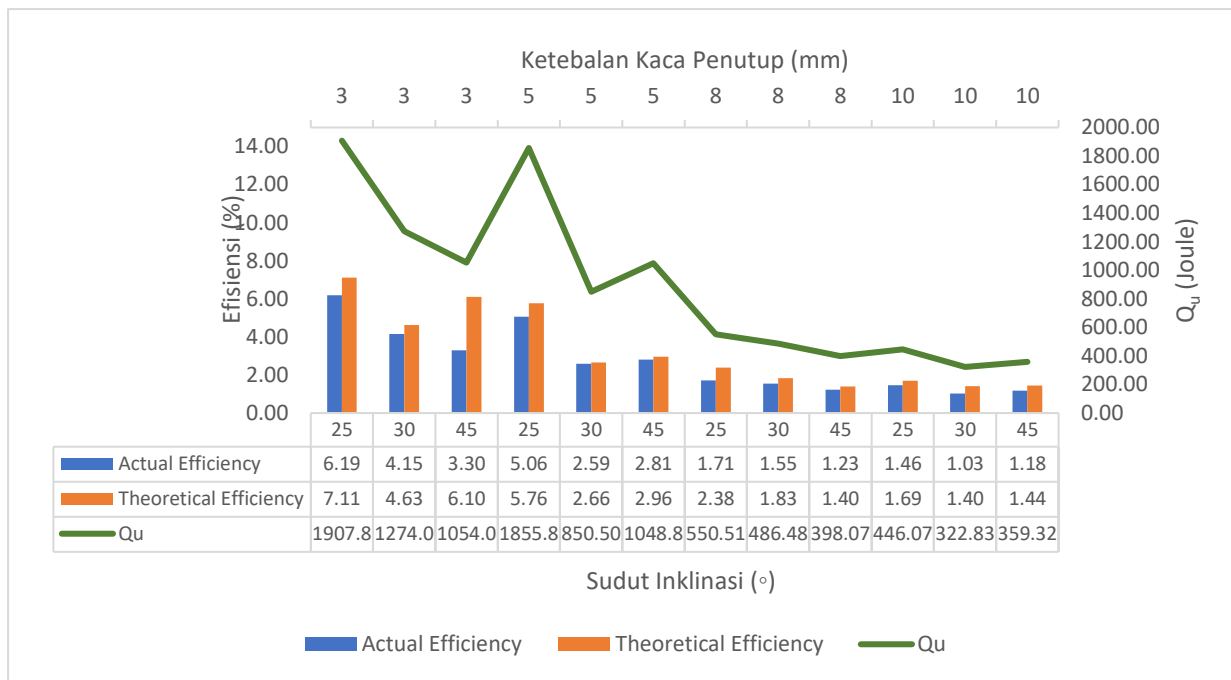
Tabel 4.1 menunjukkan adanya perbedaan antara efisiensi teoritis dengan efisiensi aktual. Efisiensi teoritis dihitung berdasarkan energi termal yang diterima oleh kotak penguap, sedangkan untuk efisiensi aktual dihitung berdasarkan air distilat yang dihasilkan terhadap air yang masuk ke dalam kotak penguap. Efisiensi teoritis lebih tinggi dibandingkan dengan efisiensi aktual, ini terjadi dikarenakan efisiensi teoritis hanya berfokus pada proses termal yang terjadi di dalam kotak penguap tanpa diperhitungkan faktor-faktor internal maupun eksternal yang berubah. Sementara efisiensi aktual merupakan efisiensi yang didapat dari lapangan berupa volume air distilat dan volume air umpan dimana volume air distilat yang didapat tersebut telah dipengaruhi oleh faktor-faktor internal maupun eksternal (I Gede Yogi Dewantara, dkk. 2018).

Dari Tabel 4.1 juga dapat dilihat bahwa efisiensi alat desalinasi baik aktual maupun teoritis mencapai maksimum dengan menggunakan absorber kain flanel berwarna hitam. Alasan utama efisiensi kain flanel warna hitam lebih tinggi adalah (Sellami et al., 2017): (1) Warna hitam punya absorptivitas dan emisivitas lebih tinggi di spektrum tampak-infra merah, sehingga lebih sedikit radiasi yang dipantulkan dan lebih banyak yang dikonversi menjadi panas pada permukaan kain flanel, (2) Dengan panas yang lebih besar, temperatur lapisan air tipis di atas flanel naik lebih cepat dan lebih tinggi, sehingga laju evaporasi meningkat dan menghasilkan efisiensi aktual lebih tinggi dibanding flanel coklat gelap, (3) Flanel hitam juga cenderung mengurangi kehilangan panas akibat refleksi di permukaan, sehingga rasio energi berguna (untuk penguapan) terhadap energi datang menjadi lebih besar dibandingkan permukaan yang warnanya lebih terang.

Dari Tabel 4.1 juga terlihat bahwa efisiensi aktual dan teoritis pada air laut artifisial lebih rendah dibandingkan pada air payau artifisial. Hal ini dapat disebabkan air laut artifisial memiliki konsentrasi garam tinggi sehingga tekanan osmotik dan titik didihnya naik dibandingkan air payau artifisial. Akibatnya, untuk menghasilkan jumlah uap yang sama dibutuhkan energi panas laten yang efektif lebih besar, sehingga pada input energi surya yang sama, fraksi energi yang benar-benar berubah jadi uap (efisiensi) menurun (Shirsath, Pala, Muralidhar, & Khandekar, 2018). Selain itu, ion-ion terlarut ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ , dan lain sebagainya) mengikat molekul air dan menurunkan fraksi molekul air bebas yang mudah menguap. Semakin tinggi salinitas, semakin kecil *driving force* efektif untuk evaporasi pada temperatur tertentu, sehingga laju evaporasi air laut lebih rendah daripada air payau (Moreno, Hinojosa, Maytorena, Navarro, & Vazquez-Ruiz, 2023).

#### **4.2 Perbandingan Efisiensi Aktual dan Teoritis Alat Desalinasi dengan Variasi Kemiringan Kotak Evaporator dan Ketebalan Kaca Penutup**

Pada penelitian ini, dilakukan dua jenis analisis efisiensi alat desalinasi, yaitu analisis efisiensi aktual dan efisiensi teoritis. Analisis efisiensi aktual peralatan desalinasi diperoleh dengan membandingkan hasil distilat yang dihasilkan oleh alat penyuling surya dengan air umpan yang masuk ke peralatan desalinasi. Sementara analisis efisiensi teoritis dilakukan berdasarkan energi masuk dan energi penguapan yang terjadi di dalam kotak evaporator (Dewantara et al., 2018). Efisiensi aktual dan efisiensi teoritis pada berbagai sudut kemiringan kotak evaporator dan ketebalan kaca penutup terhadap  $Q_u$  dengan menggunakan air laut artifisial ditunjukkan pada Gambar 4.1.



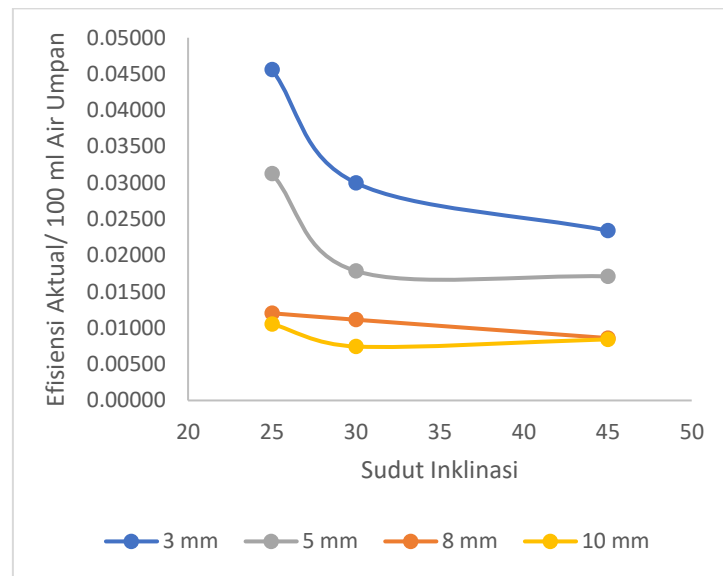
**Gambar 4.1** Pengaruh sudut kemiringan kotak evaporator dan ketebalan penutup terhadap efisiensi aktual dan teoritis, serta  $Q_u$

Gambar 4.1 menunjukkan penurunan efisiensi teoritis dan efisiensi aktual yang sejalan dengan penurunan nilai energi penguapan ( $Q_u$ ). Hal ini menunjukkan pengaruh temperatur air dalam kotak penguap terhadap volume air distilat yang dihasilkan. Kemudian dapat juga dilihat perbedaan antara nilai efisiensi aktual dan nilai efisiensi teoritis. Nilai efisiensi teoritis selalu lebih tinggi daripada nilai efisiensi aktual. Hal ini terjadi karena perhitungan efisiensi teoritis hanya berfokus pada intensitas sinar matahari dan proses termal yang terjadi di dalam kotak evaporator tanpa mempertimbangkan faktor eksternal lainnya. Efisiensi alat distilasi memiliki hubungan linier dengan jumlah energi yang masuk ke evaporator. Nilai efisiensi yang dihitung adalah nilai efisiensi per hari dari kemampuan distilator untuk menghasilkan air tawar.

Beberapa faktor mempengaruhi nilai efisiensi, termasuk iklim dan kondisi cuaca (intensitas matahari, durasi penyinaran, suhu lingkungan, hambatan angin, laju perpindahan panas, dan sebagainya) yang memengaruhi panas atau temperatur, baik dalam sistem distilasi maupun di lingkungan (Iqbal et al., 2019). Dari Gambar 4.1, dapat dilihat bahwa persentase pencapaian nilai efisiensi aktual terhadap nilai efisiensi teoritis tertinggi diperoleh pada variasi ketebalan kaca 5 mm dengan sudut kemiringan kotak evaporator  $30^\circ$ , yaitu sebesar 95,72%. Sementara persentase pencapaian nilai efisiensi aktual terhadap nilai efisiensi teoritis terendah terjadi pada variasi ketebalan kaca 3 mm dengan sudut kemiringan  $45^\circ$ , yaitu sebesar 53,90%.

### 4.3 Pengaruh Sudut Inklinasi Kotak Evaporator dan Ketebalan Kaca Penutup terhadap Efisiensi Aktual Alat Desalinasi

Variasi sudut kemiringan kotak evaporator yang digunakan adalah 25°, 30°, dan 45°, dan ketebalan kaca penutup yang digunakan adalah 3 mm, 5 mm, 8 mm, dan 10 mm. Pengaruh sudut kemiringan kotak evaporator dan ketebalan kaca penutup terhadap efisiensi aktual dapat dilihat pada Gambar 4.2.



**Gambar 4.2** Pengaruh sudut kemiringan kotak evaporator dan ketebalan kaca penutup terhadap efisiensi aktual

Dari Gambar 4.2, dapat dilihat bahwa efisiensi aktual/100 mL air umpan tertinggi dicapai pada sudut kemiringan 25° dan ketebalan penutup kaca 3 mm. Semakin besar sudut kemiringan kotak evaporator, semakin banyak radiasi matahari yang dipantulkan ke lingkungan. Sementara itu, pada sudut kemiringan yang lebih rendah, jumlah radiasi matahari yang dipantulkan ke lingkungan akan berkurang, terutama pada siang hari ketika matahari tegak lurus terhadap perangkat desalinasi yang digunakan (Aljubouri, 2017).

### 4.5 Analisis Termal dari Efisiensi Aktual Kuantitas Air Distilat

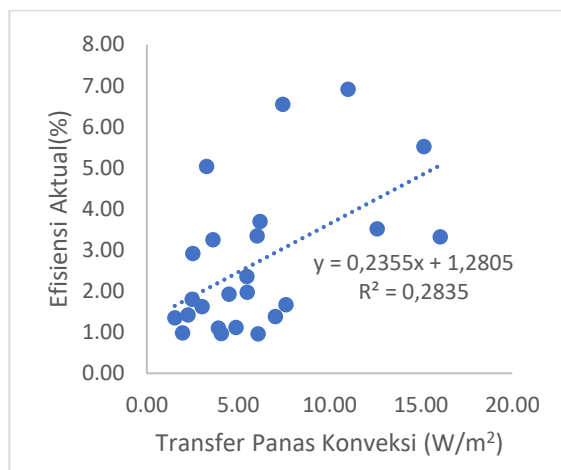
Perpindahan panas yang terjadi pada *solar still* terjadi di bagian dalam (internal) dan luar (eksternal) kotak evaporator. Perhitungan perpindahan panas yang terjadi di kotak evaporator melibatkan temperatur air di dalam kotak evaporator, temperatur kaca bagian dalam, temperatur kaca bagian luar, dan faktor lingkungan yang mempengaruhi temperatur seperti kecepatan angin dan temperatur udara ambien. Jika telah diperoleh nilai kehilangan panas

internal dan nilai kehilangan panas eksternal, maka kita dapat mengetahui perpindahan panas keseluruhan yang terjadi di kotak evaporator.

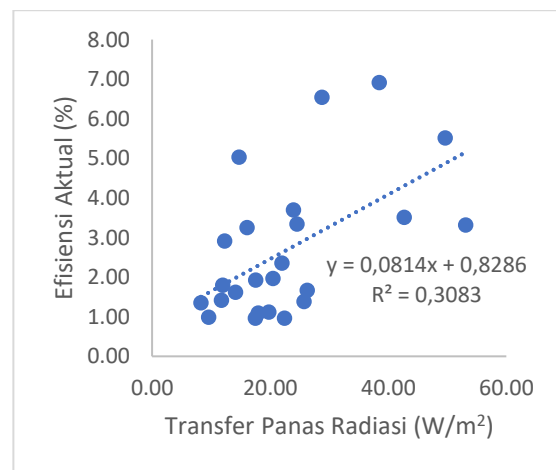
#### 4.5.1 Hubungan Perpindahan Panas Internal *Solar Still* dengan Efisiensi Aktual Kuantitas Air Distilat

Perpindahan panas internal pada *solar still* adalah perpindahan panas yang terjadi di dalam kotak evaporator dan terjadi antara kaca penutup bagian dalam dan air di dalam kotak evaporator. Perpindahan panas internal ini terdiri dari tiga jenis, yaitu perpindahan panas konvektif yang dapat dihitung dengan Persamaan 3.6, perpindahan panas radiatif yang dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.10, dan perpindahan panas evaporatif yang dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.14. Perpindahan panas internal keseluruhan pada alat penyuling surya dihitung menggunakan Persamaan 3.16. Grafik hubungan antara perpindahan panas konvektif, radiatif, evaporatif, dan perpindahan panas internal keseluruhan terhadap efisiensi aktual air suling dapat dilihat pada Gambar 4.3.

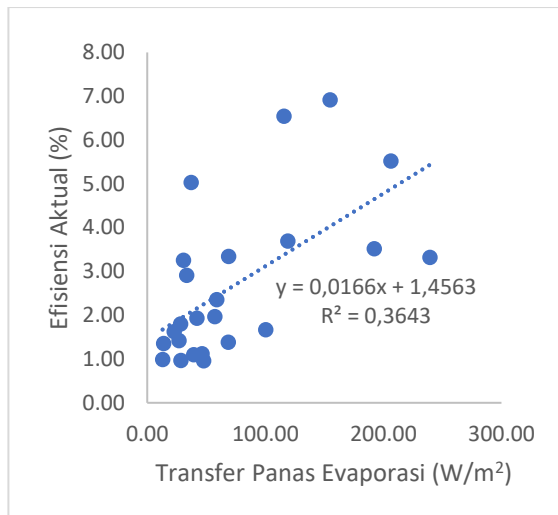
Berdasarkan Gambar 4.3, perpindahan panas internal yang terjadi pada *solar still* berbanding lurus dengan efisiensi aktual jumlah air distilat yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai perpindahan panas internal, semakin besar jumlah air distilat yang dihasilkan karena semakin besar nilai perpindahan panas internal, semakin besar pula laju penguapan yang terjadi di dalam wadah kotak evaporator (Beng Yeo, Meng Ong, & Tze Kin Te, 2014).



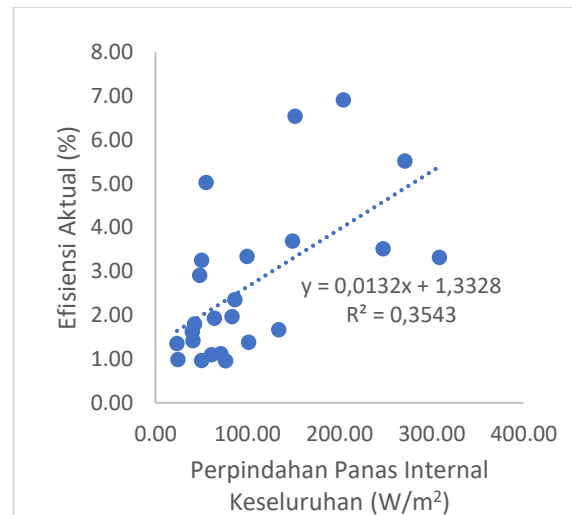
(a)



(b)



(c)



(d)

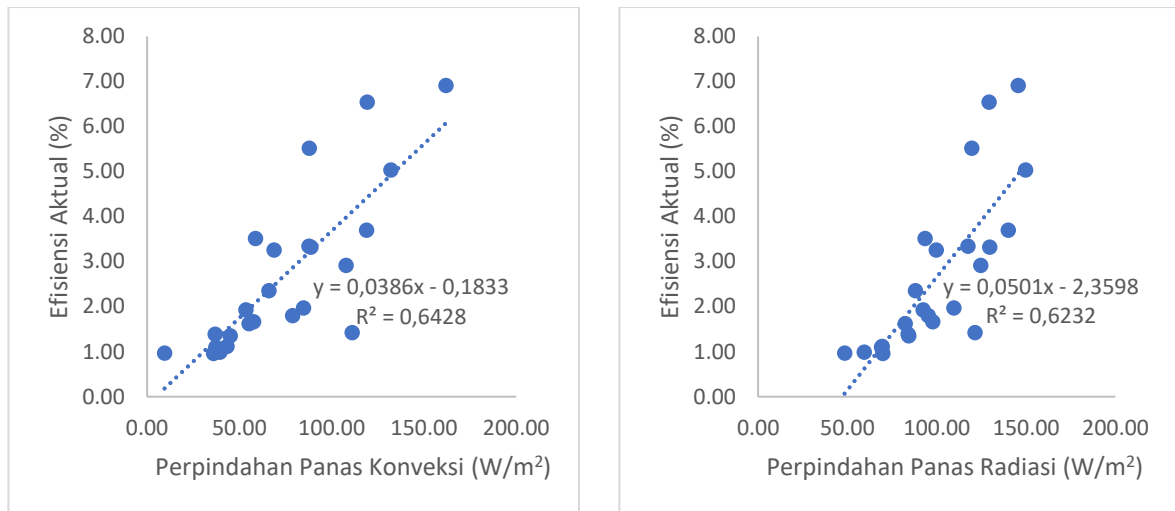
**Gambar 4.3** Hubungan Perpindahan Panas Internal *Solar Still* dengan Efisiensi Aktual

Kuantitas Air Distilat untuk (a) Perpindahan Panas Konveksi, (b) Perpindahan Panas Radiasi, (c) Perpindahan Panas Evaporasi, dan (d) Perpindahan Panas Internal Keseluruhan

#### 4.5.2 Hubungan Perpindahan Panas Eksternal *Solar Still* dengan Efisiensi Aktual Kuantitas Air Distilat

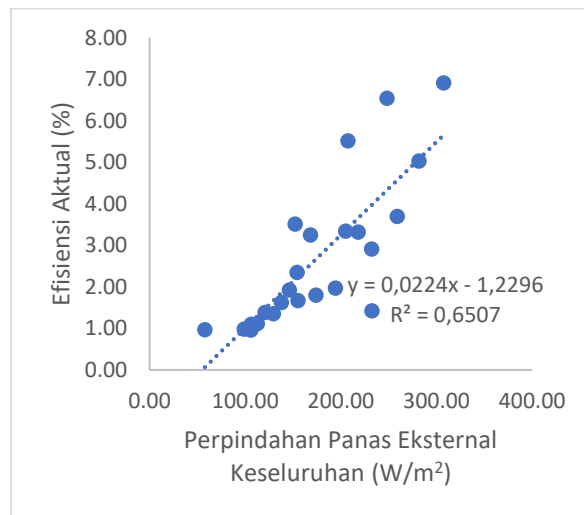
Selain perpindahan panas di dalam kotak evaporator, perpindahan panas juga terjadi di luar kotak evaporator, yaitu antara permukaan kaca luar dan udara ambien. Perpindahan panas eksternal yang terjadi pada *solar still* dihitung dengan menganalisis perpindahan panas konvektif dan perpindahan panas radiasi antara permukaan kaca luar dan udara ambien, dimana perpindahan konveksi dihitung menggunakan Persamaan 3.17 dan perpindahan panas radiasi dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.18. Kemudian perpindahan panas eksternal keseluruhan pada *solar still* dapat dihitung dengan menjumlahkan perpindahan konveksi dan perpindahan panas radiasi yang telah diperoleh sebelumnya. Hubungan antara perpindahan panas konvektif, radiatif, dan perpindahan panas eksternal keseluruhan terhadap efisiensi aktual kuantitas air distilat pada penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 4.4.

Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 4.4, dapat dilihat bahwa perpindahan panas eksternal yang terjadi pada *solar still* juga berbanding lurus dengan efisiensi aktual dari kuantitas air distilat yang dihasilkan. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar nilai perpindahan panas eksternal, semakin besar pula jumlah air distilat yang dihasilkan. Efisiensi keseluruhan terutama bergantung pada akumulasi keluaran air distilat, luas pelat penyerap, dan jumlah total radiasi matahari selama jam percobaan (Nehar et al., 2022).



(a)

(b)

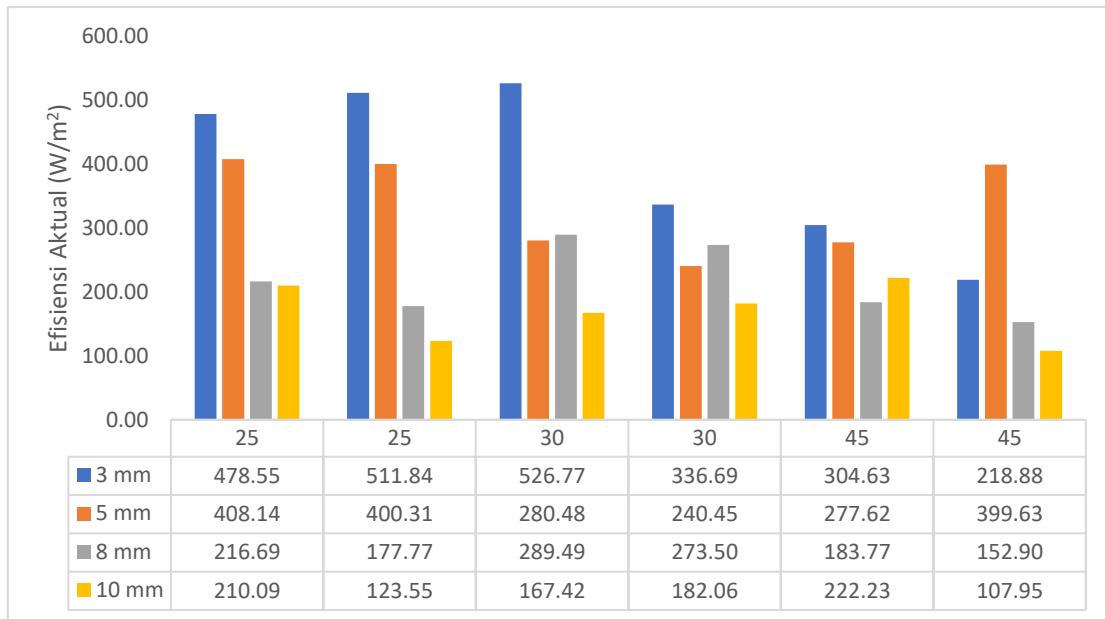


(c)

**Gambar 4.4** Hubungan Perpindahan Panas Eksternal *Solar Still* dengan Efisiensi Aktual Kuantitas Air Distilat

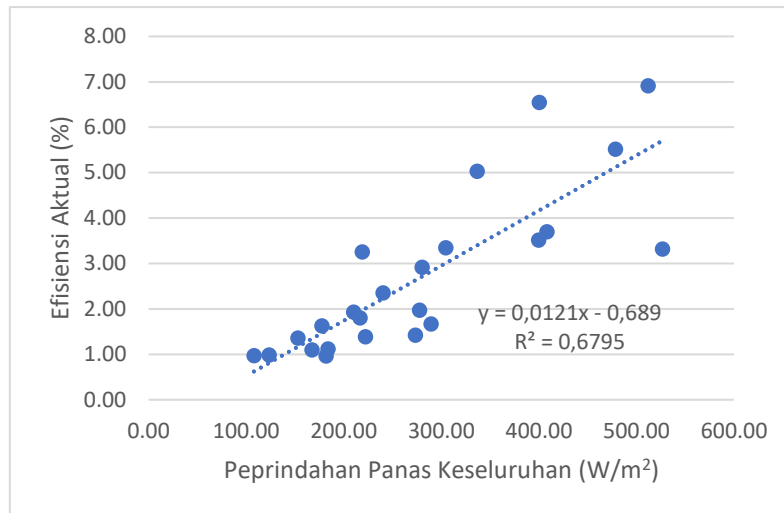
#### 4.5.3 Hubungan Perpindahan Panas Keseluruhan pada *Solar Still* dengan Efisiensi Aktual Kuantitas Air Distilat

Perpindahan panas total adalah jumlah perpindahan panas yang terjadi di dalam kotak evaporator (konveksi, radiasi, dan penguapan), serta di luar kotak evaporator (konveksi dan radiasi). Data perpindahan panas total pada *solar still* untuk berbagai variasi sudut kemiringan kotak evaporator dan ketebalan penutup kaca ditunjukkan pada Gambar 4.5.



**Gambar 4.5** Perpindahan Panas Keseluruhan dari *Solar Still* pada Berbagai Sudut Kemiringan Kotak Evaporator dan Ketebalan Penutup Kaca

Berdasarkan Gambar 4.5, dapat dilihat bahwa perpindahan panas keseluruhan tertinggi terjadi pada variasi ketebalan kaca 3 mm dengan sudut kemiringan kotak evaporator 30°, yaitu sebesar 526,77 W/m<sup>2</sup>. Sementara itu, perpindahan panas keseluruhan terendah terjadi pada variasi ketebalan kaca 10 mm dengan sudut kemiringan kotak evaporator 45°, yaitu sebesar 107,76 W/m<sup>2</sup>. Perpindahan panas keseluruhan yang lebih rendah pada ketebalan kaca yang lebih tebal disebabkan oleh ketebalan kaca yang lebih tebal. Ketika radiasi matahari menembus kaca untuk diteruskan ke penyerap, radiasi matahari dihambat oleh kaca yang lebih tebal karena energi panas akan lebih tersebar ketika melewati lapisan kaca sehingga lebih banyak panas yang hilang ke lingkungan (Saputro, Tarigan, & Jafri, 2016). Sementara itu, pada sudut kemiringan kotak evaporator yang lebih besar, energi panas yang dipantulkan dan hilang ke lingkungan lebih besar sehingga nilai perpindahan panas keseluruhan menjadi lebih rendah (Syahrul, 2021). Hubungan antara perpindahan panas keseluruhan dari *solar still* dengan efisiensi aktual dari kuantitas air distilat ditunjukkan pada Gambar 4.6.



**Gambar 4.6** Hubungan Peperindahan Panas Keseluruhan *Solar Still* dengan Efisiensi Aktual Kuantitas Air Distilat

Berdasarkan Gambar 4.6, nilai peperindahan panas keseluruhan yang terjadi pada alat penyuling surya berbanding lurus dengan efisiensi aktual dari jumlah distilat yang dihasilkan. Pada grafik, dapat dilihat juga bahwa peperindahan panas keseluruhan alat penyuling surya memiliki hubungan yang cukup kuat dengan efisiensi aktual dari jumlah distilat yang dihasilkan. Peperindahan panas termodinamika berdasarkan hukum pertama (energi) dan kedua (eksergi) dianalisis menggunakan asumsi-asumsi berikut (Dhivagar et al., 2022):

- Sudut penutup kaca dapat diabaikan.
- Tidak ada kebocoran uap.
- *Brine* dalam wadah diasumsikan konstan.
- Jumlah kehilangan *brine* akibat penguapan dapat diabaikan.
- Gradien temperatur sepanjang kedalaman air dapat diabaikan.
- Kapasitas panas, daya serap penutup kaca, dan bahan isolasi dapat diabaikan.
- Luas wadah, permukaan air, dan penutup kaca sama.

#### 4.6 Kualitas Air Umpan, Air Distilat, dan *Brine*

Hasil analisis kualitas parameter yang diuji dapat dilihat pada Tabel 4.2 untuk air umpan, air distilat, dan *brine* berikut ini.

**Tabel 4.2** Kualitas Air Umpan, Air Distilat, dan *Brine*

| Parameter | Air Umpan   | <i>Brine</i> | Air Distilat | Baku Mutu* |
|-----------|-------------|--------------|--------------|------------|
| pH        | 8,16 - 8,73 | 8,4 - 8,86   | 7,4 - 8,66   | 6,5 - 8,85 |

| Parameter              | Air Umpan             | Brine                 | Air Distilat | Baku Mutu* |
|------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------|------------|
| Kekeruhan (NTU)        | 8,86 - 35,6           | 0 - 7,69              | 0 - 3,55     | 5          |
| Ion Cl (mg/L)          | 20.593,61 - 27.591,44 | 23.392,75 - 35.389,07 | 4 - 53,98    | -          |
| Kesadahan Total (mg/L) | 1.452 - 2.120         | 1.464 - 2.608         | 0            | 500        |
| Kesadahan Ca (mg/L)    | 40,4 - 486,4          | 81,6 - 707,2          | 0            | -          |
| Kesadahan Mg (mg/L)    | 116,16 - 379,2        | 111,36 - 464,64       | 0            | 250        |
| Fe (mg/L)              | 0 - 4,17              | 0 - 2,18              | 0 - 0,68     | 0,3        |
| DHL ( $\mu$ S)         | 56.000 - 58.100       | 58.500 - 100.500      | 14-214       | 500        |
| TDS (mg/L)             | 28 - 29,2             | 20,6 - 52,5           | 7 - 83       | -          |
| Salinitas (%)          | 34,8 - 35,7           | 35,6 - 69,2           | 0            | -          |
| E. coli                | 0                     | 0                     | 0            | 0          |

\*Baku mutu: Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 tahun 2010

Pada Tabel 4.2, dapat dilihat hasil analisis kualitas air umpan, air distilat, dan *brine*. Karena air umpan yang digunakan pada penelitian ini dibuat setiap hari, maka kualitas air umpannya berbeda-beda. Namun untuk nilai kualitasnya tidak berbeda terlalu jauh. Air umpan yang digunakan pada penelitian ini merupakan air umpan buatan yang dibuat dengan menggunakan garam laut dengan salinitas 35%. Nilai DHL pada air umpan besar karena nilai salinitas yang tinggi. Kemudian, nilai TDS yang tinggi juga disebabkan karena garam yang dilarutkan ke dalam air umpan.

Salinitas pada *brine* yang dihasilkan, berkisar antara 35,6 – 69,2‰. Untuk salinitas 35,6‰ biasanya terjadi pada saat satu sampai dua jam saat desalinasi baru dilakukan. Hal tersebut terjadi karena saat setelah pemakaian alat desalinasi, kotak penguap dibilas dengan menggunakan air PDAM sebanyak 1 liter yang kemudian menyebabkan rendahnya nilai salinitas pada *brine* keesokan harinya. Tingginya nilai salinitas pada *brine* mengakibatkan tingginya nilai daya hantar listrik dan nilai TDS. Nilai TDS yang tinggi pada *brine* disebabkan karena kandungan garam yang tinggi di dalam air.

Air distilat yang dihasilkan pada penelitian ini memiliki salinitas 0 yang menunjukkan bahwa alat desalinasi mampu beroperasi dengan baik. Namun pada air distilat tidak ditemukan adanya nilai kesadahan total, kesadahan Mg, dan kesadahan Ca. Pada Tabel 4.2, digunakan baku mutu air minum berdasarkan Peraturan Menteri Kesehatan No. 492 tahun 2010. Jika dibandingkan dengan baku mutu tersebut, air distilat yang dihasilkan memenuhi baku mutu untuk parameter pH, kekeruhan, kesadahan total, kesadahan Mg, daya hantar listrik, dan e-coli. Namun air distilat yang dihasilkan dari proses desalinasi tidak memenuhi baku mutu untuk parameter besi sehingga dibutuhkan pengolahan lebih lanjut agar dapat memenuhi baku mutu pada parameter besi dan salah satunya adalah dengan metode oksidasi.

#### 4.7 Estimasi Biaya

Alat desalinasi yang dioperasikan dibuat dengan penyangga yang terbuat dari kayu. Kemudian alat tersebut juga terbuat dari kayu yang dilapisi bahan aluminium. Untuk spesifikasi bahan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 4.3. Estimasi biaya yang digunakan untuk membuat alat desalinasi dapat dilihat pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.3** Spesifikasi Alat dan Bahan

| No. | Bagian Alat Desalinasi       | Bahan            |
|-----|------------------------------|------------------|
| 1.  | Kotak evaporator bagian luar | Kayu             |
| 2.  | Insulasi kotak evaporator    | <i>Styrofoam</i> |
| 3.  | Bahan pelat rak              | Kayu             |
| 4.  | <i>Trays</i>                 | Pelat aluminium  |
| 5.  | Penutup kotak evaporator     | Kaca bening      |
| 6.  | Reservoir                    | Plastik          |

**Tabel 4.4** Estimasi Biaya Bahan Habis Pakai

| No. | Bahan                            | Satuan | Jumlah | Harga Satuan (Rp)* | Biaya Bahan Habis Pakai |
|-----|----------------------------------|--------|--------|--------------------|-------------------------|
| 1.  | Triplex 12 mm                    | lembar | 1      | 125.000            | 125.000                 |
| 2.  | Drawstring rafters 100 cm × 4 cm | buah   | 4      | 55.000             | 220.000                 |
| 3.  | Lath plank wood 2 cm × 100 cm    | buah   | 6      | 25.000             | 150.000                 |
| 4.  | Plywood nails                    | kg     | 0.1    | 31.110             | 3111                    |

| No.          | Bahan                         | Satuan         | Jumlah | Harga Satuan (Rp)* | Biaya Bahan Habis Pakai |
|--------------|-------------------------------|----------------|--------|--------------------|-------------------------|
| 5.           | Laser cutting pvc pipe 100 cm | buah           | 1      | 39.709             | 39.709                  |
| 6.           | Tap $\frac{3}{4}$             | buah           | 3      | 22.500             | 67.500                  |
| 7.           | Clear glass 3 mm              | m <sup>2</sup> | 0.85   | 131.000            | 111.350                 |
| 8.           | Aluminum plate                | m <sup>2</sup> | 1      | 298.000            | 298.000                 |
| 9.           | Bucket                        | buah           | 2      | 75.000             | 150.000                 |
| 10.          | Black flannel                 | meter          | 4      | 13.000             | 52.000                  |
| 11.          | Reservoir                     | buah           | 1      | 25.000             | 25.000                  |
| 12.          | Desalination hose             | m              | 3      | 7000               | 21.000                  |
| 13.          | Hot glue gun                  | buah           | 1      | 52.390             | 52.390                  |
| 14.          | Hot glue                      | buah           | 1      | 57.630             | 57.630                  |
| 15.          | Styrofoam glue                | buah           | 1      | 44.590             | 44.590                  |
| 16.          | Styrofoam                     | m              | 3      | 20.000             | 60.000                  |
| <b>Total</b> |                               |                |        |                    | <b>1.477.980</b>        |

Dari Tabel 4.4, terlihat bahwa biaya pembuatan alat desalinasi dengan luas 0,8 m<sup>2</sup> adalah Rp. 1.477.980. Pada Tabel 4.4, digunakan kaca seluas 0,85 m<sup>2</sup> agar *solar still* dapat tertutup dan meminimalkan terjadinya kebocoran uap akibat celah udara. Jika desalinasi dilakukan selama 7 jam seperti pada penelitian dengan volume air distilat rata-rata 420,5 mL/hari seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.4 dengan asumsi penggunaan alat selama 1 tahun (365 hari), maka total air suling yang dihasilkan adalah 153,48 liter/tahun. Jika kita menghitung biaya per liter, kita akan mendapatkan biaya sekitar Rp. 9.629,6/liter air distilat.

Biaya air minum dari instalasi desalinasi terdiri dari biaya modal (CAPEX) dan biaya operasional (OPEX) (Duong, Tran, Truong, & Nelemans, 2021). Eksperimen terkait desalinasi air laut yang dilakukan oleh Obaidi *et al.* (2019) (Al-Obaidi, Filippini, Manenti, & Mujtaba, 2019), dengan menggunakan kombinasi *Multi Effect Distillation* (MED) dan *Reverse Osmosis* (RO), ditemukan bahwa biaya yang dibutuhkan adalah 0,745-0,78 \$/m<sup>3</sup> untuk menghasilkan air tawar. Chen *et al.* (2021) (Chen, Burhan, Li, & Ng, 2021) melaporkan bahwa dengan menggunakan sistem desalinasi termoklin laut dengan metode *direct spray*, ditemukan bahwa biaya desalinasi yang dibutuhkan adalah 1-1,8 \$/m<sup>3</sup> untuk menghasilkan air tawar.

## BAB V KESIMPULAN

Kesimpulan dari penelitian ini diantaranya:

1. Variasi sudut kemiringan kotak penguap dan ketebalan kaca penutup berpengaruh nyata terhadap efisiensi kuantitas air distilat *multiple tilted solar still*. Kombinasi sudut  $25^\circ$  dengan ketebalan kaca 3 mm memberikan efisiensi aktual kuantitas air distilat tertinggi untuk 100 mL air umpan serta efisiensi teoritis terbesar, sehingga dapat dinyatakan sebagai kondisi operasi optimum pada konfigurasi alat yang diuji.
2. Analisis termal menunjukkan bahwa perpindahan panas internal, perpindahan panas eksternal, dan perpindahan panas keseluruhan masing-masing berbanding lurus dengan efisiensi aktual alat desalinasi dalam menghasilkan air distilat. Semakin besar nilai perpindahan panas (konveksi, radiasi, dan evaporasi di dalam kotak evaporator maupun konveksi–radiasi dari kaca ke udara ambien), semakin tinggi efisiensi aktual dan volume air distilat yang dihasilkan.
3. Pengukuran kuantitas dan kualitas air menunjukkan bahwa air distilat yang dihasilkan memiliki salinitas 0, TDS dan DHL sangat rendah, tanpa kesadahan Ca dan Mg terukur, serta memenuhi baku mutu air minum (Permenkes No. 492/2010) untuk parameter pH, kekeruhan, kesadahan total, Mg, DHL, dan E. coli, tetapi belum memenuhi baku mutu untuk parameter Fe sehingga memerlukan pengolahan lanjutan. Air umpan (air laut/payau artifisial) mempunyai salinitas dan TDS tinggi, sedangkan brine yang dihasilkan memiliki salinitas 35,6–69,2 dan TDS serta DHL jauh lebih besar dibandingkan air umpan, menunjukkan terjadinya konsentrasi garam yang signifikan sebagai residu proses desalinasi.
4. Estimasi biaya menunjukkan bahwa biaya pembuatan alat desalinasi *multiple tilted solar still* seluas  $0,8 \text{ m}^2$  adalah sekitar Rp 1.477.980, dengan spesifikasi material utama berupa kotak kayu berisolasi styrofoam, tray aluminium, penutup kaca bening, flanel hitam sebagai absorber, dan komponen pendukung lainnya. Dengan produktivitas rata-rata 420,5 mL/hari selama 7 jam operasi dan asumsi penggunaan selama satu tahun, biaya produksi air distilat diperkirakan sekitar Rp 9.629,6 per liter, yang menunjukkan bahwa sistem ini berpotensi diaplikasikan sebagai teknologi desalinasi skala kecil terdesentralisasi apabila dioptimasi dan diproduksi secara lebih ekonomis.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Hijleh, B. A. K. (2003). Effect of water emissivity on solar still efficiency. *International Journal of Sustainable Energy*, 23(1-2), 13-19.
- Al-Obaidi, M., Filippini, G., Manenti, F., & Mujtaba, I. M. (2019). Cost evaluation and optimisation of hybrid multi effect distillation and reverse osmosis system for seawater desalination. *Desalination*, 456, 136-149.
- Aljubouri, A. A. (2017). Design and manufacturing of single sloped solar still: Study the effect of inclination angle and water depth on still performance. *Al-Nahrain Journal of Science*, 20(2), 60-70.
- Andrés-Mañas, J., Roca, L., Ruiz-Aguirre, A., Ación, F., Gil, J. D., & Zaragoza, G. (2020). Application of solar energy to seawater desalination in a pilot system based on vacuum multi-effect membrane distillation. *Applied Energy*, 258, 114068.
- Asadi, R. Z., Suja, F., & Ruslan, M. H. (2013). The application of a solar still in domestic and industrial wastewater treatment. *Solar energy*, 93, 63-71.
- Belessiotis, V., Kalogirou, S., & Delyannis, E. (2016). Solar distillation-solar stills. *Therm. Sol. Desalin*, 85, 103-190.
- Beng Yeo, K., Meng Ong, C., & Tze Kin Te, K. (2014). Heat Transfer Energy Balance Model of Single Slope Solar Still. *Journal of Applied Sciences*, 14(23), 3344-3348.
- Bhambare, P. S., Majumder, M., & Sudhir, C. (2018). Solar thermal desalination: a sustainable alternative for Sultanate of Oman. *International Journal of Renewable Energy Resources*, 8, 733-751.
- Chen, Q., Burhan, M., Li, Y., & Ng, K. C. (2021). An ocean thermocline desalination system using the direct spray method. *Desalination*, 520, 115373.
- D'Cotha, J., Sajeesh, P., Suresh, P., & Jithu, J. (2021). Inherent configuration characteristics altering the distillate enhancement of passive stepped solar still: A review. *Journal of King Saud University-Engineering Sciences*.
- Dewantara, I. G. Y., Suyitno, B. M., & Lesmana, I. G. E. (2018). Desalinasi air laut berbasis energi surya sebagai alternatif penyediaan air bersih. *Jurnal Teknik Mesin (JTM)*, 7(1), 1-4.
- Dhivagar, R., El-Sapa, S., Alrubaie, A. J., Al-Khaykan, A., Chamkha, A. J., Panchal, H., & El-Sebaey, M. S. (2022). A case study on thermal performance analysis of a solar still basin employing ceramic magnets. *Case Studies in Thermal Engineering*, 39, 102402.
- Dunkle, R. (1961). *Solar water distillation: the roof type still and a multiple effect diffusion still*. Paper presented at the Proc. International Heat Transfer Conference, University of Colorado, USA, 1961.
- Duong, H. C., Tran, L. T. T., Truong, H. T., & Nelemans, B. (2021). Seawater membrane distillation desalination for potable water provision on remote islands– A case study in Vietnam. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100110.
- El-Said, E. M., Elshamy, S. M., & Kabeel, A. (2020). Performance enhancement of a tubular solar still by utilizing wire mesh packing under harmonic motion. *Desalination*, 474, 114165.
- Elgendi, M., Selim, M. Y., Aldhaheri, A., Alshehhi, W., Almarshoodi, H., & Alhefeiti, A. (2022). Design procedures for a passive pyramid solar still with an automatic feed water system. *Alexandria Engineering Journal*, 61(8), 6419-6431.
- Fath, H. E. (1998). Solar distillation: a promising alternative for water provision with free energy, simple technology and a clean environment. *Desalination*, 116(1), 45-56.
- Ghandourah, E. I., Sangeetha, A., Shanmugan, S., Zayed, M. E., Moustafa, E. B., Tounsi, A., & Elsheikh, A. H. (2022). Performance assessment of a novel solar distiller with a

- double slope basin covered by coated wick with lanthanum cobalt oxide nanoparticles. *Case Studies in Thermal Engineering*, 32, 101859.
- Gupta, B., Mandraha, T. K., Edla, P., & Pandya, M. (2013). Thermal modeling and efficiency of solar water distillation: A review. *American Journal of Engineering Research*, 2(12), 203-213.
- Iqbal, S., Sukmawaty, S., Putra, G. M. D., & Setiawati, D. A. (2019). ANALISIS KINERJA ALAT DESALINASI AIR LAUT PENGHASIL AIR TAWAR DAN GARAM DENGAN MENGGUNAKAN TENAGA SURYA. *Jurnal Agrotek Ummat*, 6(1), 29-34.
- Kusumadewi, R. A., Notodarmodjo, S., & Helmy, Q. DESALINASI AIR ASIN DENGAN PROSES DISTILASI MENGGUNAKAN ENERGI MATAHARI DALAM KONDISI VAKUM SALINE WATER DESALINATION WITH DISTILLATION PROCESS USING SOLAR ENERGY IN VACUUM CONDITION.
- Kusumadewi, R. A., Notodarmodjo, S., & Helmy, Q. (2018). Heat Transfer Analysis and Water Quality in Saline Water Desalination Using Solar Energy in Vacuum Condition. *Indonesian Journal of Urban and Environmental Technology*, 2(1), 66-87.
- Mohan, I., Yadav, S., Panchal, H., & Brahmabhatt, S. (2019). A review on solar still: a simple desalination technology to obtain potable water. *International Journal of Ambient Energy*, 40(3), 335-342.
- Moreno, S., Hinojosa, J., Maytorena, V. M., Navarro, J., & Vazquez-Ruiz, A. (2023). Thermal performance and water production in a solar still with an energy storage material under different concentrations of salt. *Journal of Solar Energy Engineering*, 145(3), 031011.
- Mulyanef, M., Saputra, R. A., Kaidir, K., & Duskiardi, D. (2015). KAJI EKSPERIMENTAL ALAT PENGOLAHAN AIR LAUT MENGGUNAKAN ENERGI SURYA UNTUK MEMPRODUKSI GARAM DAN AIR TAWAR.
- Nehar, L., Rahman, T., Tuly, S., Rahman, M. S., Sarker, M., & Beg, M. (2022). Thermal performance analysis of a solar still with different absorber plates and external copper condenser. *Groundwater for Sustainable Development*, 17, 100763.
- Onoroh, F., Folorunsho, S., Ogbonnaya, M., & Onochie, U. (2021). Mathematical modelling of heat and mass transfer in a roof type solar distillation system. *Nigerian Journal of Technology*, 40(2), 261-268.
- Rosari, T., Hadi, W., & Masduqi, A. (2014). Desalinasi Air Payau Menggunakan Energi Solar Dengan Parabolic Trough. *Jurnal Purifikasi*, 14(1), 55-64.
- Saputro, A. E., Tarigan, B. V., & Jafri, M. (2016). Pengaruh Sudut Kaca Penutup dan Jenis Kaca terhadap Efisiensi Kolektor Surya pada Proses Destilasi Air Laut. *LONTAR Jurnal Teknik Mesin Undana (LJTMU)*, 3(1), 65-74.
- Sellami, M., Belkis, T., Aliouar, M., Meddour, S., Bouguettaia, H., & Loudiyi, K. (2017). Improvement of solar still performance by covering absorber with blackened layers of sponge. *Groundwater for Sustainable Development*, 5, 111-117.
- Shirsath, G. B., Pala, R. G. S., Muralidhar, K., & Khandekar, S. (2018). Effect of salinity and water depth on the performance of doubly inclined solar still. *Desalination and Water Treatment*, 124, 72-87.
- Son, H. S., Shahzad, M. W., Ghaffour, N., & Ng, K. C. (2020). Pilot studies on synergetic impacts of energy utilization in hybrid desalination system: Multi-effect distillation and adsorption cycle (MED-AD). *Desalination*, 477, 114266.
- Syahrul, M. (2021). *Pengaruh Ketebalan Kaca Penutup Terhadap Efisiensi Kolektor Surya Pada Alat Desalinasi Air Laut*.
- Zulkarnain, I., Raharjo, I., & Istanto, K. RANCANG ALAT PEMURNI AIR LAUT TENAGA SURYA DENGAN KOLEKTOR PANAS CERMIN CEKUNG. *Jukung (Jurnal Teknik Lingkungan)*, 4(2).

