



UNIVERSITAS DIPONEGORO

***SOLAR STILL* TERINTEGRASI DENGAN KONDENSOR KERUCUT**

DISERTASI

**DAN MUGISIDI
21050117510003**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK MESIN**

**SEMARANG
DESEMBER 2022**



UNIVERSITAS DIPONEGORO

***SOLAR STILL* TERINTEGRASI DENGAN KONDENSOR KERUCUT**

DISERTASI

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Doktor Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Diponegoro**


**DAN MUGISIDI
21050117510003**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI DOKTOR TEKNIK MESIN**

**SEMARANG
DESEMBER 2022**

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

**Disertasi ini adalah hasil karya saya sendiri,
dan semua sumber baik yang dikutip maupun yang dirujuk
telah saya nyatakan dengan benar.**

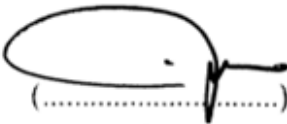


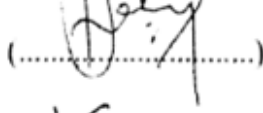
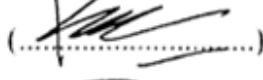

NAMA : Dan Mugisidi
NIM : 21050117510003
Tanda Tangan : 
Tanggal : 26 Desember 2022

HALAMAN PENGESAHAN

Disertasi ini diajukan oleh :
NAMA : Dan Mugisidi
NIM : 21050117510003
Program Studi : Doktor Teknik Mesin
Judul Disertasi : *Solar Still* Terintegrasi Dengan Kondensor Kerucut

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Doktor Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro.

TIM PENGUJI

Ketua Sidang	: Dr. Eng. Achmad Widodo. ST, MT	
Promotor	: Prof. Dr. Dipl-Ing.. Ir. Berkah Fajar	
Co.Promotor I	: Syaiful ST., MT., PhD	
Co.Promotor II	: M.S.K. Tony Suryo Utomo ST., MT., PhD	
Penguji Internal	: Dr. techn. Khoiri Rozi. ST, MT	
Penguji Eksternal	: Prof. Sonny Handoyo Winoto, BSc, MSc, PhD	

Semarang, 26 Desember 2022
Ketua Program Studi,



Dr. Eng. Achmad Widodo, ST, MT
NIP. 19730702 199903 1001

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI DISERTASI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademika Universitas Diponegoro, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Dan Mugisidi
NIM : 21050117510003
Program Studi : Doktor Teknik Mesin
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis Karya : Disertasi

demikian pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Diponegoro **Hak Bebas Royalti Noneksklusif** (*None-exclusive Royalty Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul :


***SOLAR STILL* TERINTEGRASI DENGAN KONDENSOR KERUCUT**

berserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti/Noneksklusif ini Universitas Diponegoro berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Semarang
Pada Tanggal : 30 Desember 2022

Yang menyatakan



(Dan Mugisid)

UCAPAN TERIMA KASIH

Segala puji syukur ke hadirat Allah SWT, Dzat yang Maha tinggi, Maha Pengasih, dan Maha Penyayang atas segala limpahan rahmat dan hidayat-Nya dan atas perkenanNya sehingga penulisan disertasi ini dapat diselesaikan. Pada kesempatan ini, penulis menyampaikan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Dipl-Ing., Ir. Berkah Fajar sebagai promotor yang membimbing mengarahkan dan meluangkan begitu banyak waktu sejak awal penelitian hingga disertasi ini dapat selesai.
2. Syaiful ST., MT., PhD sebagai promotor 1 yang terus membimbing dan mendorong penyelesaian disertasi ini.
3. M.S.K. Tony Suryo Utomo ST., MT., PhD sebagai promotor 2 yang telah membimbing saya sehingga disertasi saya menjadi jauh lebih bermakna.
4. Dr. Eng. Achmad Widodo, ST, MT sebagai Ketua Program Studi yang selalu memberikan semangat dan dorongan dalam penyelesaian disertasi ini
5. Prof. Sonny Handojo Winoto, BSc., MSc., PhD sebagai penguji yang selalu memberikan masukan dan pertimbangan sejak awal penelitian hingga penulisan disertasi ini diselesaikan.
6. Dr. techn. Khoiri Rozi, ST, MT sebagai penguji yang mendorong dan membimbing sehingga disertasi ini menjadi jauh lebih baik.
7. Istriku Ria, anak-anakku Nafi dan Naura, yang dengan caranya masing masing selalu memberi semangat dan dorong sehingga disertasi ini dapat diselesaikan.
8. Terima kasih yang sebesar besarnya juga saya ucapkan dan permohonan maaf kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian disertasi ini secara langsung maupun tidak langsung.

Semoga Allah menerima amal kebaikan semuanya dan memberikan balasan pahala dan kebaikan yang berlipat ganda. Aamiin

Jakarta, 26 Desember 2022

Dan Mugisidi

ABSTRAK

SOLAR STILL TERINTEGRASI DENGAN KONDENSOR KERUCUT

Oleh

Dan Mugisidi
21050117510003

Air tawar merupakan kebutuhan dasar manusia yang tidak dapat ditawar lagi sedangkan jumlah air tawar di permukaan bumi kurang dari 3% dan sisanya adalah air laut. Terlebih lagi banyak penduduk daerah pesisir dan pulau-pulau kecil di Indonesia yang masih harus membeli air bersih ke daerah lain sehingga harga air bersih menjadi sangat mahal. Oleh karena itu berbagai penelitian berkembang untuk mengubah air laut menjadi air tawar. Salah satu cara yang digunakan adalah desalinasi dengan memanfaatkan energi matahari atau solar desalinasi menggunakan alat yang disebut *solar still*. *Solar still* sangat sesuai untuk daerah pesisir pantai dengan cahaya matahari yang berlimpah seperti di Indonesia yang merupakan negara kepulauan. Meskipun produktifitas *solar still* masih rendah tetapi prosesnya sederhana sehingga mudah untuk dioperasikan. Proses yang terjadi di dalam solar desalinasi pada dasarnya adalah menguapkan air di dalam *solar still* dan mengembunkannya kembali. Proses pengembunan kembali uap air di dalam *solar still* memiliki peranan yang sangat menentukan karena apabila proses pengembunan tidak terjadi dengan baik di tempat yang seharusnya maka air bersih yang dihasilkan menjadi rendah. Oleh karena itu banyak penelitian yang menambahkan kondensor pada *solar still* untuk meningkatkan produktifitasnya termasuk juga dalam penelitian ini. Penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan produktifitas *solar still* dengan menggunakan kondensor berbentuk kerucut, mengukur efektifitas kondensor dan melakukan analisis kelayakan keekonomian *solar still*. Penelitian ini dilaksanakan pada 8 – 10 Oktober 2019 tanpa mempertimbangkan kondisi matahari. Penelitian dilakukan menggunakan 3 jenis *solar still* yaitu *solar still* konvensional (CSS), *developed solar still* 1 (DSS-1) dan *developed solar still* 2 (DSS-2) yang diuji bersamaan. Ketiga *Solar still* menggunakan material yang sama yaitu Aluminium dengan tebal 3 mm. CFD Ansys Fluent 18.2 digunakan untuk memperkuat hasil analisa. Hasil penelitian menunjukkan efisiensi CSS, DSS-1 dan DSS-2 secara berurutan adalah 23%, 36,5% dan 46,4%. Hasil air tawar yang diperoleh oleh DSS-1 dan DSS-2 secara berurutan lebih besar 1,17 dan 1,81 kali apabila dibandingkan dengan CSS. Peningkatan produktifitas DSS-1 dan DSS-2 sangat dipengaruhi oleh bentuk kondensor yang terintegrasi pada kedua *solar still* tersebut. Efektifitas kondensor yang digunakan pada kedua *solar still* berdasarkan hasil eksperimen mencapai 91,25% sedangkan dengan menggunakan simulasi mencapai 99,85%. Lebih jauh lagi biaya air yang dihasilkan DSS-2 dapat mencapai 0,1 USD/l. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondensor kerucut efektif untuk digunakan pada solar still sehingga dapat dimanfaatkan lebih lanjut pada penelitian sejenis ataupun digunakan pada kondisi sebenarnya.

ABSTRACT

SOLAR STILL INTEGRATED WITH CONE CONDENSERS

Written by

Dan Mugisidi
21050117510003

Fresh water is a basic non-negotiable human need, while the amount of fresh water on the surface of the earth is less than 3% and the rest is seawater. What's more, many residents of coastal areas and small islands in Indonesia still have to buy clean water from other areas, so the price of clean water is very expensive. Therefore, various studies are developing to change sea water into fresh water. One method used is desalination by utilizing solar energy or solar desalination using a device called a solar still. Solar still is very suitable for coastal areas with abundant sunlight such as in Indonesia which is an archipelago. Even though the productivity of solar still is still low, the process is simple so it is easy to operate. The process that occurs in solar desalination is basically evaporating the water in the solar still and condensing it again. The process of condensing back water vapor in a solar still has a very decisive role because if the condensation process does not occur properly where it should be, the resulting clean water will be low. Therefore, many studies have added condensers to solar stills to increase their productivity, which are also included in this study. This study aims to increase the productivity of solar still by using a conical condenser, measure the effectiveness of the condenser and analyze the economic feasibility of solar still. This research was conducted on 8 – 10 October 2019 without considering solar conditions. The research was conducted using 3 types of solar stills, namely conventional solar still (CSS), developed solar still 1 (DSS-1) and developed solar still 2 (DSS-2) which were tested simultaneously. The three Solar stills use the same material, namely Aluminum with a thickness of 3 mm. CFD Ansys Fluent 18.2 is used to strengthen the analysis results. The results showed that the efficiency of CSS, DSS-1 and DSS-2 were 23%, 36.5% and 46.4%, respectively. Freshwater yields obtained by DSS-1 and DSS-2 were respectively 1.17 and 1.81 times greater when compared to CSS. The increase in the productivity of the DSS-1 and DSS-2 is greatly influenced by the shape of the integrated condenser in the two solar stills. The effectiveness of the condenser used in the two solar stills based on the experimental results reached 91.25% while using the simulation it reached 99.85%. Furthermore, the cost of water produced by DSS-2 can reach 0.1 USD/l. The results showed that the conical condenser was effective for use in solar stills so that it could be used further in similar studies or used in actual conditions.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
ABSTRAK.....	v
ABSTRACT	vi
DAFTAR ISI	vii
DAFTAR GAMBAR.....	ix
DAFTAR TABEL	xi
NOMENKLATUR	xii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah Penelitian.....	2
1.3 Perumusan Masalah	3
1.4 Maksud dan Tujuan.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
1.6 Pembatasan Masalah.....	4
1.7 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Solar still</i> dengan kondensor.....	5
2.2 Perpindahan Panas	11
2.2.1 Konveksi.....	12
2.2.2 Radiasi	13
2.2.3 Evaporasi	14
2.2.4 Kehilangan Panas	15
2.2.5 Keseimbangan Energi	17
2.3 Kondensor	18
2.4 Pasir Besi	19
BAB 3 METODE PENELITIAN.....	20
3.1 Sistem Pengujian	20

3.2	Bahan dan Alat.....	23
3.3	Kondensor.....	24
3.4	Simulasi CFD.....	25
3.5	Validitas Data.....	29
3.6	Analisa Ketidakpastian	30
BAB 4	ANALISIS HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	31
4.1	Perbandingan CSS, DSS-1 dan DSS-2	31
4.1.1	Temperatur dan Hasil	31
4.1.2	Koefisien Perpindahan Panas C dan n.....	38
4.1.3	Effisiensi <i>Solar still</i>	44
4.1.4	Efektifitas kondensor.....	46
4.2	Hasil Simulasi CFD	52
4.3	Pertimbangan Finansial.....	54
BAB 5	KESIMPULAN, IMPLIKASI DAN SARAN	59
	DAFTAR PUSTAKA.....	61
	LAMPIRAN	70
A.	Contoh Perhitungan	70
B.	Luas Kondensor	72
C.	Tempat dan Waktu Penelitian	73
D.	Data Penelitian.....	74

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2-1 <i>Solar still</i> konvensional	5
Gambar 2-2 Skema <i>Solar still</i> dengan film pendingin.....	6
Gambar 2-3 <i>Solar still</i> bertingkat	7
Gambar 2-4 <i>Solar still</i> dengan internal kondensor	8
Gambar 2-5 <i>Solar still</i> dengan ruang kondensasi ganda.....	8
Gambar 2-6 <i>Solar still</i> dengan multi efek.....	9
Gambar 2-7 <i>Solar still</i> dengan kondensor terintegrasi	10
Gambar 2-8 <i>Solar still</i> dengan kondensor terintegrasi	10
Gambar 2-9 <i>Solar still</i> menggunakan kondensor eksternal dengan aliran alami.....	11
Gambar 2-10. Skema perpindahan panas pada <i>solar still</i> konvensional	12
Gambar 3-1 Posisi sensor pengujian CSS, DSS-1 and DSS-2.....	20
Gambar 3-2 Skema pengujian DSS-2.....	21
Gambar 3-3 Uji coba di dalam ruangan.....	22
Gambar 3-4 Bentuk dan dimensi kondensor DSS-1 dan DSS-2.....	24
Gambar 3-5 Foto kondensor DSS-1 dan DSS-2	25
Gambar 3-6 Geometri domain fluida secara umum.....	26
Gambar 3-7 Lokasi input radiasi dari geometri	27
Gambar 3-8 Lokasi outlet dari geometri.....	27
Gambar 3-9 Lokasi condenser dari geometri.....	27
Gambar 3-10 <i>Grid independent test</i>	28
Gambar 3-11 Meshing hexahedron.....	28
Gambar 4-1 Radiasi matahari tanggal 8 - 10 Oktober 2019	31
Gambar 4-2 Temperatur pada CSS, DSS-1 dan DSS-2 tanggal 8 Oktober 2019.....	33
Gambar 4-3 Temperatur pada CSS, DSS-1 dan DSS-2 tanggal 9 Oktober 2019.....	33
Gambar 4-4 Temperatur pada CSS, DSS-1 dan DSS-2 tanggal 10 Oktober 2019.....	34
Gambar 4-5 Akumulasi air tawar CSS, DSS-1, DSS-2 dan radiasi; 8 Oktober 2019.....	37
Gambar 4-6 Akumulasi air tawar CSS, DSS-1, DSS-2 dan radiasi; 9 Oktober 2019.....	37
Gambar 4-7 Akumulasi air tawar CSS, DSS-1, DSS-2 dan radiasi; 10 Oktober 2019.....	38
Gambar 4-8 Korelasi massa air hasil eksperimen dan perhitungan, 9 Oktober 2019.....	40
Gambar 4-9 Koefisien determinasi massa air; Hari 1	41
Gambar 4-10 Koefisien determinasi massa air; Hari 2	42
Gambar 4-11 Koefisien determinasi massa air; Hari 3	42

Gambar 4-12 Pengembunan di area kondensasi	47
Gambar 4-13 Temperatur sisi dalam penutup atas (T_{gi}), titik embun (T_p) dan kecepatan angin.....	50
Gambar 4-14 Kontur temperatur di DSS-2.....	52
Gambar 4-15 Kontur arah kecepatan uap DSS-2.....	53
Gambar 4-16 Luas <i>solar still</i> terhadap: Biaya investasi (USD) dan harga air (USD/l).....	57
Gambar LAMPIRAN-1 Luas sisi dinding kondensor	72
Gambar LAMPIRAN-2 Luas atas dinding kondensor.....	72
Gambar LAMPIRAN-3 Luas dinding kondensor.....	72

DAFTAR TABEL

Tabel 3-1 Data absorptifitas dan reflektifitas kaca, air dan plat	23
Tabel 3-2. Bahan yang dipergunakan untuk <i>solar still</i>	23
Tabel 3-3. Alat yang digunakan dalam penelitian	24
Tabel 3-4. Setting komputasi	28
Tabel 4-1 Temperatur Tgi dan Tp CSS, DSS-1 dan DSS-2 tanggal 8 – 10 Oktober 2019.....	34
Tabel 4-2 Selisih temperatur	36
Tabel 4-3 nilai konstanta C dan n	41
Tabel 4-4 Koefisien korelasi (r) dan <i>root mean square deviation</i> (e).....	42
Tabel 4-5 Efisiensi <i>solar still</i>	44
Tabel 4-6 Efisiensi DSS-2 dibandingkan hasil penelitian <i>solar still</i> dengan kondensor	45
Tabel 4-7 Kesetimbangan air untuk CSS, DSS-1 dan DSS-2.....	48
Tabel 4-8 Temperatur masuk (Tc-i) dan keluar (Tc-o) kondensor pada DSS-1 dan DSS-2 ...	49
Tabel 4-9 Efektivitas kondensor untuk CSS, DSS-1 dan DSS-2.....	49
Tabel 4-10 Temperatur kondensor dan embun uap untuk CSS, DSS-1 dan DSS-2	51
Tabel 4-11 Uap yang keluar melalui saluran kondensat	54
Tabel 4-12 Analisa ekonomi untuk <i>solar still</i>	55
Tabel 4-13 Biaya/liter CSS, DSS-1 dan DSS-2	55
Tabel 4-14 Perbandingan Biaya/liter <i>solar still</i>	56
Tabel 4-15 Biaya/liter <i>solar still</i> dengan material kayu.....	57
Tabel LAMPIRAN-1 Waktu pelaksanaan penelitian disertasi	73
Tabel LAMPIRAN-2 CSS - 8 Oktober 2021	74
Tabel LAMPIRAN-3 DSS-1 - 8 Oktober 2021	74
Tabel LAMPIRAN-4 DSS-2 - 8 Oktober 2021	75
Tabel LAMPIRAN-5 CSS - 9 Oktober 2021	75
Tabel LAMPIRAN-6 DSS-1 - 9 Oktober 2021	76
Tabel LAMPIRAN-7 DSS-2 - 9 Oktober 2021	76
Tabel LAMPIRAN-8 CSS - 10 Oktober 2021.....	77
Tabel LAMPIRAN-9 DSS-1 - 10 Oktober 2021	77
Tabel LAMPIRAN-10 DSS-2 - 10 Oktober 2021	78
Tabel LAMPIRAN-11 nilai untuk menghitung Gr dan Pr	78

NOMENKLATUR

A	=	Luas	[m ²]
AC	=	Biaya tahunan	[Rp]
AFC	=	Biaya tahunan pertama	[Rp/tahun]
AMC	=	Biaya perawatan	[Rp/tahun]
ASV	=	Nilai sisa tahunan	[Rp/tahun]
C	=	Konstanta konveksi	[-]
C _{pa}	=	Kapasitas panas air pendingin kondensor	[KJ/kg.K]
CRF	=	<i>Capital Recovery Factor</i>	[-]
df	=	Panjang karakteristik	[-]
e	=	Root mean square percent deviation	[-]
e _i	=	Root mean square percent deviation ke i	[-]
g	=	Gravitasi	[m/s ²]
Gr	=	Angka Grashoff	[-]
H	=	Tinggi	[m]
h _c	=	Koefisien konveksi dari air ke sisi dalam kaca penutup	[W/m ² K]
h _{cg}	=	Koefisien konveksi dari sisi luar kaca penutup ke lingkungan	[W/m ² K]
h _e	=	Koefisien evaporasi dari air ke sisi dalam kaca penutup	[W/m ² K]
h _{fg}	=	Panas laten penguapan	[J/kg]
h _r	=	Koefisien radiasi dari air ke sisi dalam kaca penutup	[W/m ² K]
h _{rg}	=	Koefisien radiasi dari sisi luar kaca penutup ke lingkungan	[W/m ² K]
h _t	=	Koefisien total	[W/m ² K]
h _{tg}	=	Koefisien perpindahan panas total dari sisi luar kaca penutup ke lingkungan	[W/m ² K]
h _w	=	Koefisien perpindahan panas konveksi dari basin ke air	[W/m ² K]
I	=	Radiasi matahari	[W/m ² K]
i	=	Suku bunga	[%]
kf	=	Konduktifitas termal fluida	[W/m K]
K _g	=	Konduktifitas panas kaca penutup	[W/m K]
L _g	=	Tebal kaca penutup	[m]
m _{al}	=	Air masuk ke dalam solar still	[gr]
m _c	=	Laju massa air pendingin	[kg/s]

\dot{m}_v	= Laju massa uap	[kg/s]
m_w	= Massa air bersih	[gr]
N	= Jumlah data	[-]
n	= Konstanta konveksi	[-]
n_i	= Periode	[Tahun]
Nu	= Angka Nusselt	[-]
P	= Investasi Awal	[Rp]
P_{gi}	= Tekanan uap parsial pada sisi dalam permukaan kaca penutup	[N/m ²]
Pr	= Angka Prandtl	[-]
P_w	= Tekanan uap parsial pada permukaan air	[N/m ²]
q_b	= Perpindahan panas antara basin dengan air	[W/m ²]
q_c	= Perpindahan panas konveksi antara air dengan sisi dalam kaca penutup	[W/m ²]
q_{cd}	= Perpindahan panas konduksi dari sisi dalam kaca penutup ke sisi luarnya	[W/m ²]
q_{cg}	= Perpindahan panas konveksi dari kaca penutup sisi luar ke lingkungan	[W/m ²]
q_{co}	= Panas yang diterima air pendingin di kondensor	[W/m ²]
q_{cw}	= Perpindahan panas konveksi dari air ke kaca penutup sisi dalam	[W/m ²]
q_e	= Perpindahan panas evaporasi antara air dengan sisi dalam kaca penutup	[W/m ²]
q_{ew}	= Perpindahan panas evaporasi dari air ke kaca penutup sisi dalam	[W/m ²]
q_{ha}	= Panas yang dilepaskan uap dalam proses pengembunan	[W/m ²]
q_r	= Perpindahan panas radiasi antara air dengan sisi dalam kaca penutup	[W/m ²]
q_{rg}	= Perpindahan panas radiasi dari kaca penutup sisi luar ke lingkungan	[W/m ²]
q_{rw}	= Perpindahan panas radiasi dari air ke kaca penutup sisi dalam	[W/m ²]
q_t	= Total perpindahan panas di dalam <i>solar still</i>	[W/m ² K]
q_w	= Perpindahan panas konveksi dari basin ke air	[W/m ²]
r	= koefisien korelasi	[-]
Ra	= Rayleigh number	[-]
R_g	= Refleksifitas kaca	[-]
RH	= Kelembaban relatif	[%]
Rw	= Konstanta gas untuk uap air	[J/kg K]
R_w	= Refleksifitas air	[-]
S	= Nilai sisa	[Rp]
SFF	= <i>Sinking Fund Factor</i>	[-]
T_a	= Temperatur lingkungan	[°C]
T_b	= Temperatur basin	[°C]

T_{co}	=	Temperatur kondensor	[°C]
T_e	=	Temperatur uap	[°C]
T_{gi}	=	Temperatur sisi dalam kaca penutup	[°C]
T_{go}	=	Temperatur sisi luar kaca penutup	[°C]
T_p	=	Temperatur pengembunan	[°C]
T_{pi}	=	Temperatur air masuk kondensor	[°C]
T_{po}	=	Temperatur air keluar kondensor	[°C]
T_s	=	Temperatur udara	[°C]
T_{uc}	=	Temperatur uap di dalam kondensor	[°C]
T_v	=	Temperatur uap	[°C]
T_w	=	Temperatur air	[°C]
U_i	=	Ketidakpastian internal	[-]
U_t	=	Koefisien perpindahan panas total dari air ke lingkungan	[W/m ² K]
U_{tg}	=	Koefisien perpindahan panas dari sisi dalam kaca penutup ke lingkungan	[W/m ² K]
v_s	=	Kecepatan angin	[m/s]
v_u	=	Kecepatan uap	[m/s]
x_i	=	Data prediksi ke i	[-]
y_i	=	Data eksperimen ke i	[-]

Subskrip

a	=	Lingkungan	[-]
b	=	penampung air <i>solar still</i>	[-]
c	=	Konveksi	[-]
cd	=	konduksi	[-]
cg	=	Konveksi kaca penutup atas	[-]
co	=	Kondensor	[-]
e	=	Evaporasi	[-]
g	=	Kaca	[-]
gi	=	Sisi dalam kaca penutup	[-]
go	=	Sisi luar kaca penutup	[-]
i	=	Urutan data	[-]
p	=	Pengembunan	[-]
pi	=	Pendingin masuk	[-]
po	=	Pendingin keluar	[-]

r	=	Radiasi	[-]
rg	=	Radiasi kaca penutup	[-]
t	=	Total	[-]
uc	=	Uap dalam kondensor	[-]
v	=	Uap	[-]
w	=	Air	[-]

Greek

α'_b	=	Absorptivitas plat	[-]
α'_w	=	Absorptivitas air	[-]
α_g	=	Absorptivitas kaca	[-]
ε_{eff}	=	Emisifitas efektif antara air dan kaca penutup	[-]
ε_g	=	Emisifitas kaca penutup	[-]
η	=	Efisiensi <i>solar still</i>	[-]
σ	=	Konstanta Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$	[W/m ² K ⁴]

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Air merupakan elemen yang sangat penting bagi makhluk hidup. Manusia, binatang dan tumbuhan tidak akan bertahan hidup apabila tidak ada air. Karena itu seiring dengan penambahan jumlah manusia, konsumsi air juga meningkat. Penambahan populasi sebesar 15% akan menyebabkan pengurangan air bersih sebesar 40% (Schewe et al., 2014) disamping juga mengurangi kualitasnya (Maizunati & Arifin, 2017), sehingga krisis air menjadi ancaman nyata secara global. Pada tahun 2019 dilaporkan bahwa 17 negara menghadapi kekurangan air diberbagai sektor dan telah menggunakan rata-rata 80 persen persediaan air setiap tahunnya (Febryan & Nusalikah, 2019) bahkan UNICEF dalam laporannya menyebutkan bahwa setengah dari populasi dunia diperkirakan akan menghadapi kelangkaan air pada awal 2025 (UNICEF, 2020). Selain menjadi ancaman global yang telah terjadi di berbagai negara, krisis air telah menjadi bahaya nyata di Indonesia. Hasil pemantauan yang dilakukan oleh Badan Geologi (2022) melalui Balai Konservasi Air Tanah menemukan bahwa sekitar 80% air tanah di Jakarta berada pada Cekungan Air Tanah (CAT) dan tidak memenuhi standar air minum. Sementara itu defisit air bersih di Pulau Jawa dalam rentang 30 tahun mengalami kenaikan sebesar 6.04%, sedangkan untuk Pulau Bali mengalami defisit air bersih sebesar 12.88% (Chairunnisa et al., 2021). Kelangkaan air diprediksikan akan naik pada tahun 2022 (CNN, 2022) yang salah satunya diakibatkan oleh perubahan iklim (Mekdori, 2022). lebih jauh lagi permasalahan kelangkaan air parah juga dialami oleh masyarakat desa pesisir. Desa pesisir di seluruh Indonesia jumlahnya mencapai 12.827 desa dan baru 66,54% yang sudah mendapatkan akses air bersih (LIPI, 2018). Di beberapa tempat, warga desa pesisir menggunakan air keruh dan asin untuk keperluan sehari-hari, seperti mencuci dan mandi sedangkan untuk masak dan minum, warga harus membeli air dari mobil tangki milik pemerintah desa (Bakri, 2019). Paparan di atas menunjukkan bahwa kebutuhan air tawar yang bersih sangat mendesak padahal jumlah air tawar di bumi sangat terbatas dan hanya tersedia 2.8%, sedangkan sisanya adalah air laut (Belessiotis et al., 2016). Oleh karena itu air laut merupakan sumber air yang sangat potensial apabila dapat dikonversi menjadi air tawar.

Konversi air laut menjadi air tawar dilakukan dengan menghilangkan kandungan Fluoride, hardness (CaCO_3), Klorida, Natrium, Sulfate, dan Kalium Permanganat (KMnO_4) (Mugisidi & Heriyani, 2018) melalui proses desalinasi agar dapat dikonsumsi oleh manusia. Desalinasi adalah proses pengurangan garam dan mineral lainnya (Alaudeen et al., 2014)

yang dapat menggunakan beberapa teknik seperti reverse osmosis, elektrodialisis, flashing multi-tahap, desalinasi film tipis, penguapan multi efek, humidifikasi- dehumidifikasi, dan solar desalinasi (Essa et al., 2020). Salah satu cara desalinasi yang banyak digunakan adalah distilasi termal menggunakan *solar still* karena pengoperasiannya sangat sederhana dan ekonomis meskipun produktifitasnya masih tergolong rendah (ben Halima et al., 2016). *Solar still* merubah radiasi matahari menjadi panas dan secara simultan menguapkan air di dalamnya (Belessiotis et al., 2016) kemudian dikondensasi sehingga fasa uap kembali menjadi fasa cair. Penguapan berjalan dengan lambat sehingga kontaminan yang terkandung di dalam air akan tertinggal dan air menjadi murni. Karena proses penguapan berjalan dengan lambat maka produktifitas *solar still* konvensional menjadi rendah, yaitu 4,5 l/m²/hari (Kabeel et al., 2016). Meskipun produktifitasnya rendah, *solar still* menjadi pilihan yang sangat realistis untuk mengkonversi air laut menjadi air tawar di Indonesia.

Indonesia memiliki garis pantai yang sangat panjang dan energi matahari yang berlimpah tetapi tingkat pemanfaatan teknologi masyarakat desa pesisir sangat beragam sehingga *solar still* dengan pengoperasiannya yang sederhana menjadi pilihan yang masuk akal. Lebih jauh lagi penelitian untuk meningkatkan produktifitas *solar still* sangat dibutuhkan. Oleh karena itu penelitian ini ditujukan untuk meningkatkan produktifitas *solar still* melalui penambahan kondensor yang memiliki bentuk mengerucut.

1.2 Identifikasi Masalah Penelitian

Pada dasarnya hanya ada dua peristiwa di dalam *solar still* yaitu penguapan dan kondensasi. Penguapan di dalam *solar still* terjadi karena ada perbedaan tekanan yang disebabkan oleh perbedaan temperatur air dengan temperatur kaca penutup (Mahian et al., 2017) sedangkan kondensasi terjadi ketika uap air bersentuhan dengan permukaan yang memiliki temperatur lebih rendah dari titik embunnya dan terjadi secara random di permukaan kondensor atau *dropwise condensation* (Holman, 2010a). Karena itu banyak penelitian dilakukan dan menunjukkan bahwa penambahan kondensor baik internal maupun eksternal terbukti meningkatkan efisiensi *solar still* (Ahmed & Ibrahim, 2017; Al-Hamadani & Shukla, 2013; Belhadj et al., 2015; El-Bahi & Inan, 1999; El-Samadony et al., 2015; Essa et al., 2020; Kabeel et al., 2014; Sivaram et al., 2020; Tiwari et al., 1997). Efisiensi *solar still* terbukti dapat ditingkatkan dengan memperluas permukaan kondensasi (Xiong et al., 2013) dimana penambahan luas area kondensasi sebesar 7,5 kali meningkatkan produksi air tawar lebih dari 50% dibandingkan tanpa penambahan (Bhardwaj et al., 2015). Oleh karena itu untuk

meningkatkan produktifitas *solar still*, kondensor juga akan digunakan untuk *solar still* dalam penelitian ini.

1.3 Perumusan Masalah

Penguapan air di dalam *solar still* terjadi di dalam ruang penguapan dan karena adanya perbedaan tekanan uap air akan mengalir menuju kondensor yang bertekanan rendah (Fath & Elsherbiny, 1993) yang selanjutnya menuju saluran keluar air bersih secara alami (Rahmani et al., 2015). Lebih lanjut lagi efektifitas kondensor dipengaruhi oleh jumlah uap air yang menyentuh dinding kondensor (Refalo et al., 2016) sehingga upaya untuk memaksa uap air bersentuhan dengan dinding kondensor menjadi penting. Selain itu kondensor harus memiliki luas penampang untuk masuk yang cukup sehingga uap air dapat dengan mudah mengalir masuk ke dalamnya. Pada umumnya media pendingin yang digunakan kondensor di *solar still* adalah aliran udara luar sehingga efektifitas kondensor dipengaruhi oleh kecepatan angin dan ada panas yang dibuang. Untuk mengurangi pengaruh kecepatan angin maka *solar still* dalam penelitian ini menggunakan media pendingin air umpan agar proses pengembunan tidak terpengaruh kecepatan angin dan dapat mengambil panas yang dilepaskan ketika berubah fasa dari uap air menjadi air. Hal ini akan meningkatkan temperatur air umpan. Oleh karena itu masalah penelitian ini dapat dirumuskan sebagai berikut:

1. Bagaimana meningkatkan produktifitas *solar still* dengan menggunakan kondensor?
2. Bagaimana efektifitas kondensor yang digunakan pada solar still?
3. Bagaimana kelayakan keekonomian solar still yang terintegrasi kondensor?

1.4 Maksud dan Tujuan

Maksud penelitian ini adalah meningkatkan produktifitas *solar still* sehingga air tawar yang dihasilkan dari proses desalinasi meningkat.

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Meningkatkan produktifitas *solar still* dengan menggunakan kondensor berbentuk kerucut.
2. Mengukur efektifitas kondensor
3. Analisis kelayakan keekonomian *solar still*.

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini menawarkan bentuk kondensor *Solar still* yang berbeda dengan bentuk yang pernah ada sebelumnya dan ditujukan untuk meningkatkan produktifitasnya. Oleh karena itu penelitian ini akan bermanfaat bagi perkembangan penelitian desalinasi dengan menggunakan

Solar still. Selain itu, dengan meningkatnya produktifitas *Solar still*, masyarakat di daerah kepulauan yang kesulitan untuk mendapatkan air tawar dapat menggunakannya.

1.6 Pembatasan Masalah

Penelitian ini dibatasi pada peningkatan produktifitas *solar still* melalui penambahan kondensor berbentuk kerucut yang diuji coba secara eksperimental.

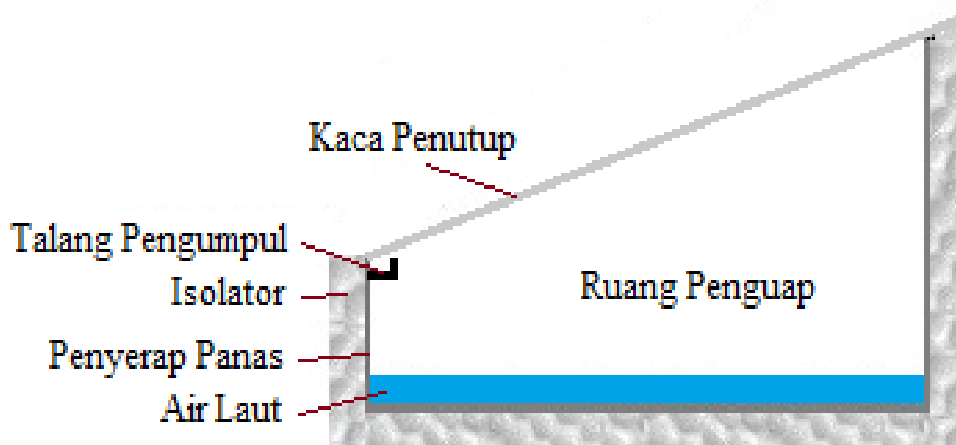
1.7 Sistematika Penulisan

Penelitian ini dibagi menjadi 5 Bab dan Lampiran. Bab 1 menyampaikan latar belakang, identifikasi masalah, perumusan masalah, tujuan dan batasan masalah. Bab 2 berisi mengenai informasi dan penelitian terkait yang disitasi. Desain, tahapan dan metode penelitian akan di sampaikan di Bab 3. Bab 4 berisi hasil penelitian dan pembahasan. Bab 5 berisi kesimpulan dan untuk menjawab tujuan penelitian dan dilanjutkan dengan daftar pustaka dan lampiran.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Solar still* dengan kondensor

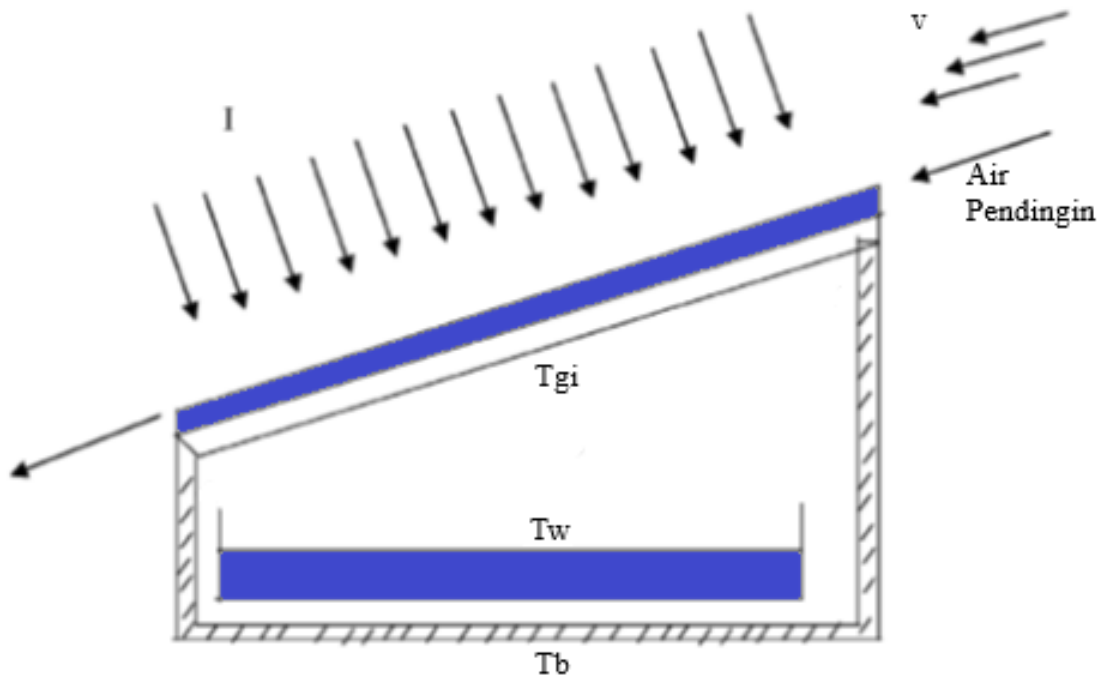
Solar still adalah alat sederhana yang digunakan untuk menguapkan air laut dan mengkondensasikan lagi dengan alat yang sama. *Solar still* konvensional (Gambar 2-1) hanya memiliki 1 ruang yang berisi air laut dan dipanaskan oleh panas yang berasal dari matahari. Panas matahari melewati kaca dan air menuju penyerap panas di dasar *Solar still* yang kemudian panasnya dialirkan ke air laut sehingga temperatur air meningkat. Peningkatan temperatur air menyebabkan kenaikan tekanan di air laut sehingga terjadi penguapan yang bergerak ke atas karena perbedaan berat jenis dengan udara dan pada akhirnya terkondensasi pada kaca penutup. Air kondensat di kaca penutup mengalir turun karena kemiringan kaca dan kemudian masuk ke dalam talang pengumpul dan ke penampung.



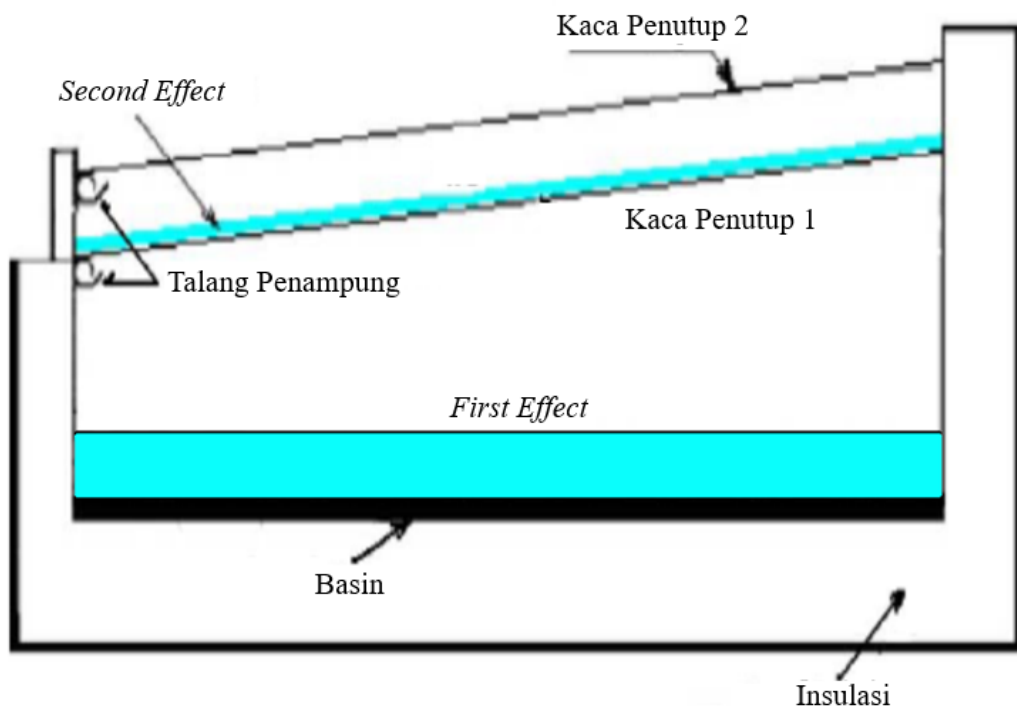
Gambar 2-1 *Solar still* konvensional

Meskipun produktifitas *solar still* masih rendah tetapi karena *solar still* memiliki potensi untuk dimanfaatkan di daerah terpencil dengan fasilitas terbatas maka banyak peneliti yang berupaya meningkatkan produktifitas *solar still*, salah satunya dengan menentukan kemiringan kaca *solar still*. Kemiringan kaca *solar still* yang disarankan adalah 30° (Tiwari & Tiwari, 2005). Selain kemiringan kacanya, *solar still* di uji dengan menggunakan kaca penutup ganda yang diantaranya dialirkan air seperti pada Gambar 2-2. Aliran air berfungsi sebagai film pendingin untuk memperbanyak pengembunan pada kaca bagian dalam. Air dan kaca memiliki absorptivitas panas sebesar 0,3 sehingga panas matahari tidak banyak berkurang. Film pendingin pada kaca penutup memperbesar perbedaan temperatur antara

permukaan air di dalam *solar still* dengan kaca penutup dan pada akhirnya meningkatkan penguapan (Abu-Hijleh & Mousa, 1997).



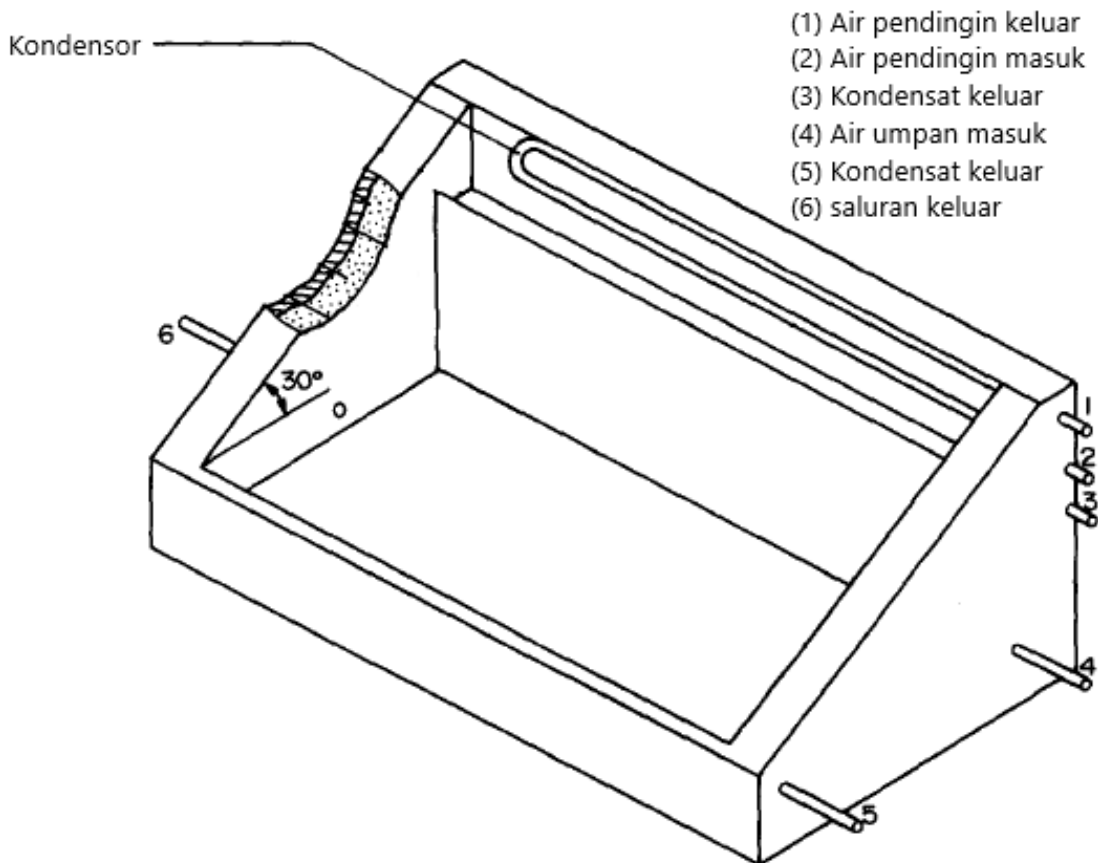
Gambar 2-2 Skema *Solar still* dengan film pendingin (Abu-Hijleh & Mousa, 1997)



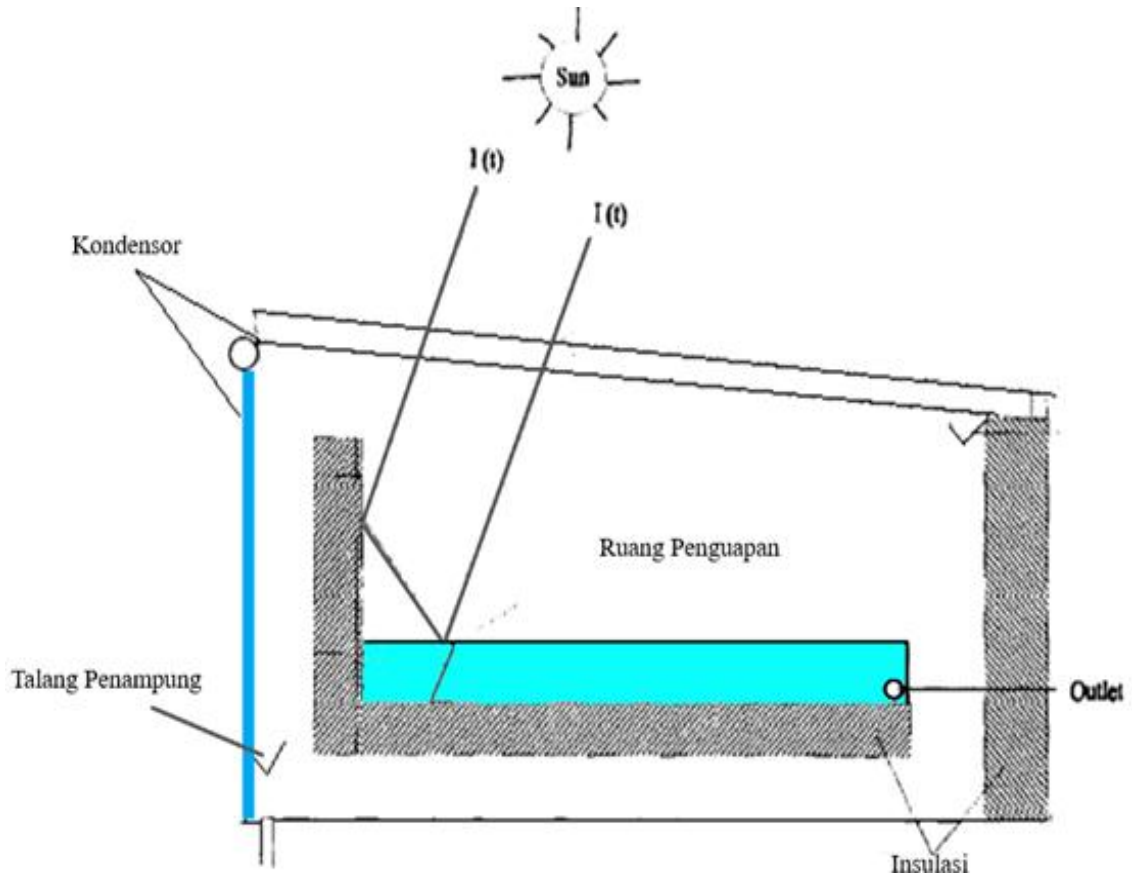
Gambar 2-3 *Solar still* bertingkat
(Zurigat & Abu-Arabi, 2004)

Selain itu *solar still* 2 tingkat (Gambar 2-3) diteliti produktifitasnya (Zurigat & Abu-Arabi, 2004) dengan bagian bawah disebut sebagai *first effect* dan atasnya sebagai *second effect*. Hasil yang diperoleh menunjukkan penurunan temperatur kaca penutup *first effect*, tempat air pada *second effect* dan berfungsi juga sebagai kondensor, memperbesar selisih temperatur antara air di *first effect* dengan kaca penutupnya yang pada akhirnya menaikkan produktifitasnya hingga mencapai 20% di atas *solar still* konvensional.

Pemasangan kondensor di dalam *solar still* meningkatkan produktifitasnya dari 5,5 kg/m² menjadi 5,9 kg/m² atau 1,07 kali (Ahmed, 1988). Kondensor berbentuk pipa dipasang di dalam *solar still* dan dialirkan air di dalamnya sebagai pendingin sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2-4. Uap air yang naik ke atas akan menyentuh kaca penutup *solar still* dan bila terjadi kondensasi, kondensat akan mengalir ke saluran penampung bawah melalui kaca sedangkan uap air yang tidak terkondensasi akan mengalir ke atas dan masuk ke dalam ruang kondensor pipa. Di dalam ruang kondensor pipa, uap yang bergerak akan bersentuhan dengan kondensor sehingga terjadi kondensasi dan air mengalir ke penampung.



Gambar 2-4 *Solar still* dengan internal kondensor
(Ahmed, 1988)

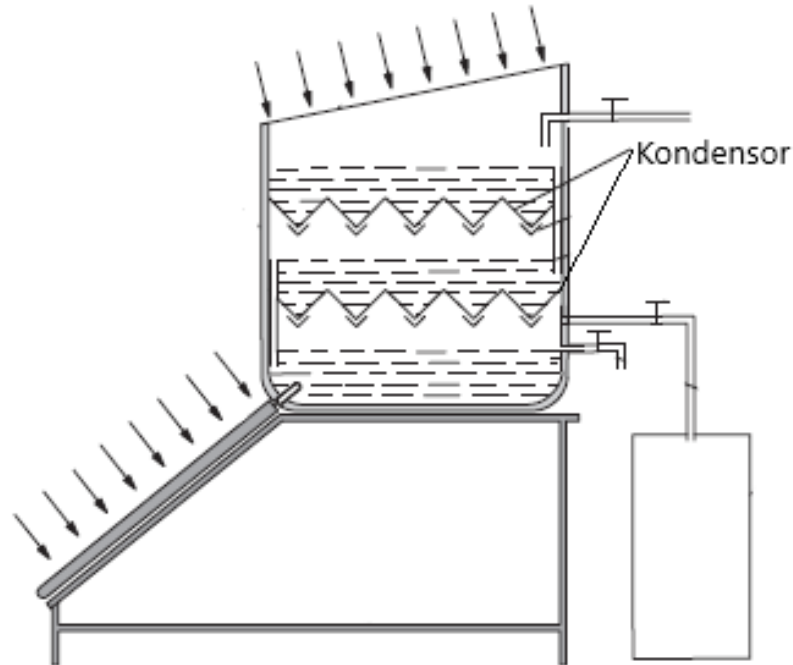


Gambar 2-5 *Solar still* dengan ruang kondensasi ganda
(Tiwari et al., 1997)

Tiwari (1997) menggunakan dua ruang di dalam satu *solar still* (Gambar 2-5). Bagian penampung air dilengkapi dengan reflektor untuk menambah jumlah panas matahari yang masuk ke dalam *solar still*. Uap yang terbentuk akan mengalir ke atas menuju kaca penutup *solar still*. Akan tetapi karena kaca penutup menggunakan kaca ganda, hanya sebagian kecil uap yang mengembun dan mengalir ke saluran penampung di bagian bawah kaca. Sementara sebagian besar uap air mengalir ke kondensor yang didinginkan dengan angin sehingga uap air mengembun dan mengalir ke talang penampung.

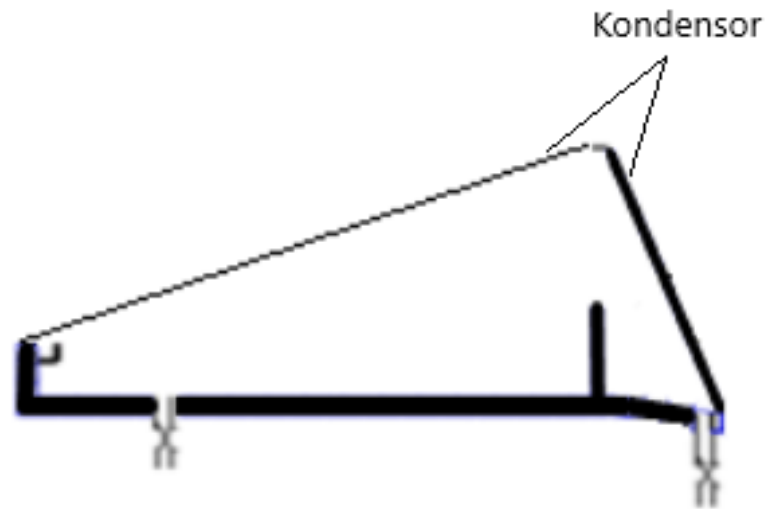
Pada penelitian lain, kondensor digunakan juga sebagai tray bertingkat menjadi basin penampung air laut (Xiong et al., 2013). Air laut dipanaskan langsung oleh matahari di preheater dan tray yang paling atas (Gambar 2-6). Uap air dari tray paling bawah yang dipanaskan melalui preheater akan menguap dan mengembun sisi bagian bawah tray di atasnya yang juga sekaligus memanaskan tray di atasnya. Uap air pada tray paling atas akan

mengembun di kaca penutup dan kemudian mengalir menuju penampung melalui talang. Cara ini menaikkan produktifitas *solar still* 1,86 kalinya.

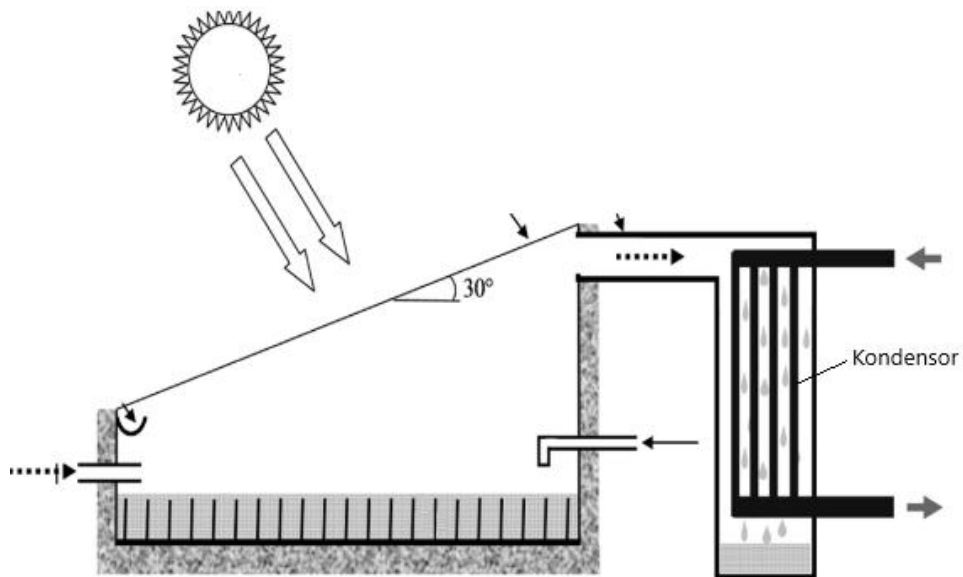


Gambar 2-6 *Solar still* dengan multi efek
(Xiong et al., 2013)

Solar still yang diintegrasikan dengan kondensor meningkatkan produktifitasnya sebesar 110%. Sebagaimana ditampilkan pada Gambar 2-7 (Ibrahim & Ahmed, 2018), uap air yang menguap di ruang penguapan akan naik ke atas dan menyentuh kaca penutup atas sehingga terjadi kondensasi sedangkan uap yang tidak mengalami kondensasi di kaca penutup atas akan mengalir mengikuti kemiringan kaca dan akhirnya menyentuh dinding belakang *solar still* yang berbahan galvanis sehingga terjadi pengembunan. Pendingin yang digunakan kondensor pada *solar still* ini adalah aliran udara.

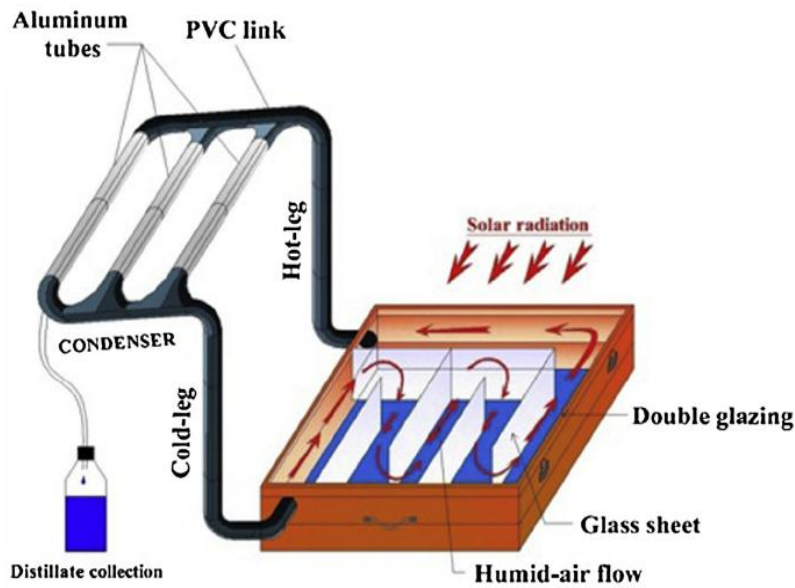


Gambar 2-7 *Solar still* dengan kondensor terintegrasi
(Ibrahim & Ahmed, 2018)



Gambar 2-8 *Solar still* dengan kondensor terintegrasi
(Rabhi et al., 2017)

Upaya untuk meningkatkan produktifitas *solar still* dilakukan dengan menambahkan fin dan kondensor (Rabhi et al., 2017). Kondensor terpisah dari *solar still* dan salurannya ditempatkan di sisi atas *solar still* seperti ditampilkan pada Gambar 2-8. Uap yang naik akan menyentuh kaca penutup atas yang juga difungsikan sebagai kondensor dengan pendingin aliran udara sedangkan uap yang tidak terkondensasi di kaca akan mengalir naik mengikuti kemiringan kaca dan masuk ke dalam ruang kondensor. Kondensor dengan pendingin aliran udara akan mengkondensasikan uap air yang menyentuh dinding kondensor.



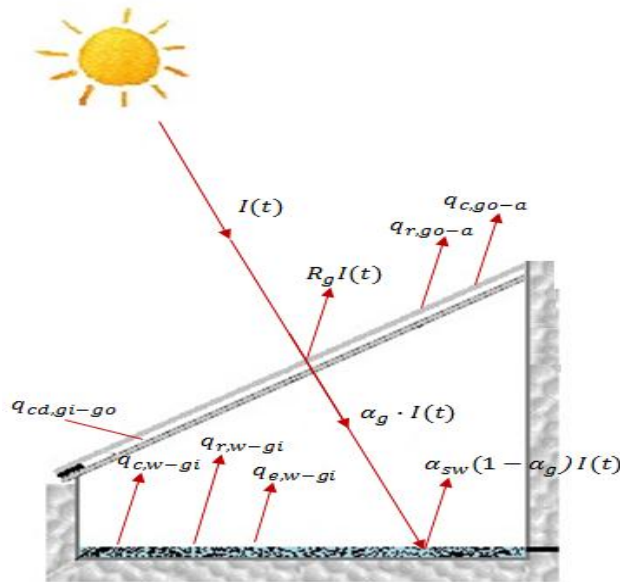
Gambar 2-9 *Solar still* menggunakan kondensor eksternal dengan aliran alami (Rahmani et al., 2015)

Rahmani (2015) membuat *solar still* dengan kemiringan penutup yang rendah dan menghubungkannya dengan kondensor eksternal (Gambar 2-9). Pada bagian dalam ruang penguapan diberi sekat mulai dari permukaan air ke kaca penutup untuk mengarahkan uap air menuju jalur masuk kondensor eksternal. Untuk mengurangi pengaruh angin, kaca penutup dibuat ganda sehingga mencegah terjadinya pengembunan pada kaca bagian dalam. Aliran uap air mengalir secara alami menuju kondensor eksternal melalui pipa karena adanya perbedaan berat jenis. Uap air yang memasuki kondensor eksternal didinginkan dengan media pendingin angin, akan mengembun dan masuk ke dalam botol penampung. Uap air yang belum mengembun telah berkurang temperaturnya dan mengalir turun kembali ke ruang penguapan. Efisiensi maksimum alat ini adalah 45,15%.

2.2 Perpindahan Panas

Penguapan yang terjadi pada *solar still* diberi energi oleh panas matahari. Panas matahari yang menembus kaca penutup dan air akan diserap panasnya oleh material penyerap dan dialirkan ke air dengan cara konveksi sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2-10. Temperatur dan tekanan air akan meningkat dan terjadi penguapan di dalam ruang penguapan. Perbedaan berat jenis antara uap air dengan udara menyebabkan uap air naik ke atas dan mengenai kaca penutup. Temperatur antara kaca penutup yang lebih rendah dari pada titik embun uap air mengakibatkan uap air yang mengenai kaca penutup mengembun dan menempel pada bagian dalam kaca penutup. Air hasil pengembunan uap air akan meluncur turun melalui kaca dan masuk ke dalam

penampung. Proses ini terjadi terus menerus selama panas matahari yang menjadi sumber energinya tersedia.



Gambar 2-10. Skema perpindahan panas pada *solar still* konvensional (Elango et al., 2015).

Perpindahan panas di dalam *solar still* dalam bentuk konveksi, radiasi dan evaporasi yang terjadi antara permukaan air dengan bagian dalam kaca penutup (Elango et al., 2015).

2.2.1 Konveksi

Perpindahan panas dengan cara konveksi terjadi karena adanya gerakan molekular dan gerakan fluida secara keseluruhan (Long & Sayma, 2018). Perpindahan panas konveksi di dalam *solar still* diawali dengan perpindahan panas dari material penyerap panas atau basin ke air yang dinyatakan dalam persamaan (Elango et al., 2015)

$$q_w = h_w(T_b - T_w) \quad (2.1)$$

Dimana

q_w = Perpindahan panas konveksi dari basin ke air (W/m²)

h_w = Koefisien perpindahan panas konveksi dari basin ke air (W/m² K)

T_b = Temperatur basin (°C)

T_w = Temperatur air (°C)

Konveksi di dalam *solar still* juga terjadi antara permukaan air asin dengan sisi dalam kaca penutup melalui campuran udara dan uap air karena adanya perbedaan temperatur (Elango et al., 2015).

$$q_c = h_c(T_w - T_{gi}) \quad (2.2)$$

Dimana:

q_c = Perpindahan panas konveksi antara air dengan sisi dalam kaca penutup (W/m^2)

h_c = Koefisien konveksi dari air ke sisi dalam kaca penutup ($W/m^2 K$)

T_{gi} = Temperatur sisi dalam kaca penutup ($^{\circ}C$)

Koefisien konveksi antara air dengan sisi dalam kaca penutup dihitung dengan menggunakan persamaan yang diusulkan oleh Dunkle (Jay Kumar & Tiwari, 1996)

$$h_c = 0,884[(T_w - T_{gi}) + \frac{(P_w - P_{gi})(T_w + 273,15)}{268,9 \cdot 10^3 - P_w}]^{\frac{1}{3}} \quad (2.3)$$

$$P_w = \exp[25,317 - (\frac{5144}{T_w + 273})] \quad (2.4)$$

$$P_{gi} = \exp[25,317 - (\frac{5144}{T_{gi} + 273})] \quad (2.5)$$

Dimana:

P_w = Tekanan uap parsial pada permukaan air (N/m^2)

P_{gi} = Tekanan uap parsial pada sisi dalam permukaan kaca penutup (N/m^2)

2.2.2 Radiasi

Radiasi terjadi antara permukaan yang berhadapan dan memiliki temperatur yang berbeda. Radiasi di dalam *solar still*, sebagaimana pada konveksi, terjadi antara air dengan sisi dalam kaca penutup. Perpindahan panas secara radiasi di dalam *solar still* diperkirakan dengan persamaan berikut ini (Elango et al., 2015)

$$q_r = h_r(T_w - T_{gi}) \quad (2.6)$$

$$h_r = \varepsilon_{eff} \cdot \sigma[(T_w + 273,15)^2 + (T_{gi} + 273,15)^2](T_w + T_{gi} + 546) \quad (2.7)$$

Dimana

q_r = Perpindahan panas radiasi antara air dengan sisi dalam kaca penutup (W/m^2)

h_r = Koefisien radiasi dari air ke sisi dalam kaca penutup ($\text{W/m}^2 \text{K}$)

ϵ_{eff} = Emisifitas efektif antara air dan kaca penutup

ϵ_w = Emisifitas air

ϵ_g = Emisifitas kaca penutup

σ = Konstanta Stefan-Boltzmann, $5,67 \times 10^{-8}$ ($\text{W/m}^2 \text{K}^4$)

2.2.3 Evaporasi

Evaporasi adalah peristiwa berubahnya fasa cair menjadi fasa gas sebelum titik didihnya dan terjadi pada permukaan cairan. Pada saat tekanan pada ruang di atas permukaan air lebih kecil dari pada tekanan permukaan air cairan pada temperatur tertentu maka evaporasi akan terjadi dan dihitung dengan persamaan berikut (Elango et al., 2015):

$$q_e = h_e(T_w - T_{gi}) \quad (2.8)$$

$$h_e = 16,273 \times 10^{-3} \times h_c \left[\frac{P_w - P_{gi}}{T_w - T_{gi}} \right] \quad (2.9)$$

Dimana

q_e = Perpindahan panas evaporasi antara air dengan sisi dalam kaca penutup (W/m^2)

h_e = Koefisien evaporasi dari air ke sisi dalam kaca penutup ($\text{W/m}^2 \text{K}$)

Total perpindahan panas di dalam *solar still* (q_t) adalah penjumlahan perpindahan panas konveksi, radiasi dan evaporasi. Koefisien perpindahan panas total dari air ke kaca penutup adalah

$$h_t = h_c + h_r + h_e \quad (2.10)$$

Sedangkan massa air per jam yang dihasilkan *solar still* menggunakan pendekatan

$$m_w = \frac{h_e(T_w - T_{gi})}{h_{fg}} \cdot 3600 \quad (2.11)$$

Dimana h_{fg} adalah panas laten penguapan

$$h_{fg} = 3.1615 \cdot 10^6 \times [1 - (7.616 \cdot 10^{-4} \times T_e)] \text{ untuk } T_v > 70^\circ\text{C} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned}
h_{fg} &= 2.4935 \cdot 10^6 \\
&\times [1 - (9.4779 \cdot 10^{-4} \times T_e) + (1.3132 \cdot 10^{-7} \times T_e^2) \\
&- (4.7974 \cdot 10^{-9} \times T_e^3)] \\
&\text{untuk } T_v < 70^\circ\text{C}
\end{aligned} \tag{2.13}$$

atau dapat menggunakan persamaan (Muftah et al., 2018):

$$hfg = 3044205,5 - 1670,1109 \cdot T_w - 1,14258 \cdot T_w^2 \tag{2.14}$$

2.2.4 Kehilangan Panas

Kehilangan panas pada *solar still* terjadi melalui bagian atas dan bagian bawahnya. Kehilangan panas pada bagian atas terjadi melalui kaca penutupnya. Panas yang diterima oleh material *solar still* dialirkan ke air dan selanjutnya dialirkan ke sisi dalam kaca penutup secara konveksi dan radiasi. Panas di sisi dalam kaca penutup dialirkan ke sisi luarnya melalui perpindahan panas konduksi

$$q_{cd} = \frac{K_g}{L_g} (T_{gi} - T_{go}) \tag{2.15}$$

Kehilangan panas pada sisi luar kaca penutup terjadi secara konveksi dan radiasi terhadap lingkungan.

$$q_{cg} = h_{cg}(T_{go} - T_a) \tag{2.16}$$

Koefisien konveksi dinyatakan dalam kecepatan angin sebagai berikut

$$h_{cg} = 2,8 + 3 \cdot v \tag{2.17}$$

Dimana

q_{cd} = Perpindahan panas konduksi dari sisi dalam kaca penutup ke sisi luarnya (W/m²)

K_g = Konduktifitas panas kaca penutup (W/m K)

L_g = Tebal kaca penutup (m)

T_{go} = Temperatur sisi luar kaca penutup (°C)

T_a = Temperatur ambient (°C)

q_{cg} = Perpindahan panas konveksi dari kaca penutup sisi luar ke lingkungan (W/m²)

h_{cg} = Koefisien konveksi dari sisi luar kaca penutup ke lingkungan ($W/m^2 K$)

v = Kecepatan angin (m/s)

Kehilangan panas sisi luar kaca penutup ke lingkungan melalui perpindahan panas secara radiasi adalah

$$q_{rg} = h_{rg}(T_{go} - T_a) \quad (2.18)$$

$$h_{rg} = \varepsilon_g \cdot \sigma \left[\frac{(T_{go}+273)^4 - (T_s+273)^4}{(T_{go}-T_a)} \right] \quad (2.19)$$

$$T_s = T_a - 6 \quad (2.20)$$

Dimana

h_{rg} = Koefisien konveksi dari sisi luar kaca penutup ke lingkungan ($W/m^2 K$)

T_s = Temperatur udara ($^{\circ}C$)

Kehilangan panas total adalah penjumlahan perpindahan panas konveksi dan radiasi dari sisi luar kaca penutup ke lingkungan. Koefisien kehilangan panas total dapat dinyatakan dengan persamaan berikut

$$h_{tg} = h_{cg} + h_{rg} \quad (2.21)$$

atau

$$h_{tg} = 5,7 + 3,8 \cdot v \quad (2.22)$$

Tidak ada perbedaan hasil yang signifikan pada persamaan (2.21) dan (2.22) (Sampathkumar et al., 2010).

Koefisien kehilangan panas keseluruhan mulai dari air di dalam *solar still* ke lingkungan melalui kaca penutup adalah

$$U_t = \frac{h_t \cdot U_{tg}}{\left(\frac{Kg}{Lg} \right) + U_t} \quad (2.23)$$

dan

$$U_t = \frac{\left(\frac{K_g}{L_g}\right) \cdot h_{tg}}{\left(\frac{K_g}{L_g}\right) + h_{tg}} \quad (2.24)$$

Dimana

h_{tg} = Koefisien perpindahan panas total dari sisi luar kaca penutup ke lingkungan ($W/m^2 K$)

U_{tg} = Koefisien perpindahan panas dari sisi dalam kaca penutup ke lingkungan ($W/m^2 K$)

U_t = Koefisien perpindahan panas total dari air ke lingkungan ($W/m^2 K$)

2.2.5 Kestimbangan Energi

Kestimbangan energi diaplikasikan pada tiga bagian yaitu basin atau plat penyerap, air laut dan kaca penutup. Beberapa asumsi dipertimbangkan untuk membuat persamaan kestimbangan energi:

1. Seluruh bagian *solar still* ditetapkan sebagai *steady state*.
2. *Solar still* diasumsikan tidak mengalami kebocoran
3. Tinggi air di dalam *solar still* diasumsikan tidak mengalami perubahan.

Kestimbangan energi pada plat penyerap terjadi antara panas yang bersumber dari matahari dengan energi yang diterima air dan plat. Kestimbangan energi pada plat penyerap adalah

$$\alpha'_b \cdot I(t)_s = q_w + q_b \quad (2.25)$$

Kestimbangan energi pada air laut di dalam *solar still* adalah

$$m_w C_w \frac{dT_w}{dt} = \alpha'_w I(t)_s + q_w - q_{cw} - q_{ew} - q_{rw} \quad (2.26)$$

$$\alpha'_w = (1 - \alpha_g)(1 - R_g)(1 - R_w)\alpha_w \quad (2.27)$$

Kestimbangan energi pada kaca penutup adalah

$$q_{cd} = \alpha_g I(t)_s + q_c + q_e + q_r \quad (2.28)$$

Dimana

α'_b = Absorptivitas plat

α'_w = Absorptivitas air

R_{gk} = Refleksifitas kaca

R_{ga} = Refleksifitas air

q_w = Perpindahan panas antara plat penyerap dengan air (W/m^2)

q_b = Perpindahan panas antara radiasi matahari dengan plat (W/m^2)

2.3 Kondensor

Kondensor merupakan salah satu alat penukar panas (heat exchanger) yang berfungsi untuk mengubah uap menjadi cairan melalui proses kondensasi atau pengembunan. Di dalam *solar still* proses pengembunan akan terjadi di area kondensor. Panas yang dilepaskan oleh uap air untuk mengembun sama dengan panas yang diterima oleh pendingin karena perpindahan kalor rata-rata fluida panas sama dengan perpindahan kalor rata-rata fluida dingin (Holman, 2010a).

$$q_{co} = q_{ha} \quad (2.29)$$

$$q_{co} = \dot{m}_c \cdot c_{pa} \cdot (T_{pi} - T_{po}) \quad (2.30)$$

$$q_{ha} = \dot{m}_v \cdot h_{fg} \quad (2.31)$$

Dimana

q_c = Panas yang diterima air pendingin di kondensor atau panas aktual yang ditransfer (W/m^2)

q_h = Panas yang dilepaskan uap dalam proses pengembunan atau panas maksimum yang dapat ditransfer (W/m^2)

c_{pa} = Panas jenis air ($KJ/kg \cdot ^\circ C$)

\dot{m}_c = Laju massa air pendingin (kg/s)

\dot{m}_v = Laju massa uap (kg/s)

T_{pi} = Temperatur masuk air pendingin ($^\circ C$)

T_{po} = Temperatur keluar air pendingin ($^\circ C$)

Efektifitas kondensor didefinisikan sebagai (Holman, 2010a):

$$Efektivitas (\epsilon) = \frac{\text{Panas aktual yang ditransfer } (q_c)}{\text{Panas maksimum yang dapat ditransfer } (q_h)}$$

Panas aktual yang ditransfer adalah panas yang diterima air pendingin di kondensor sedangkan panas maksimum yang dapat di transfer di dalam kondensor *solar still* ini adalah panas yang dilepaskan uap dalam proses penguapan.

2.4 Pasir Besi

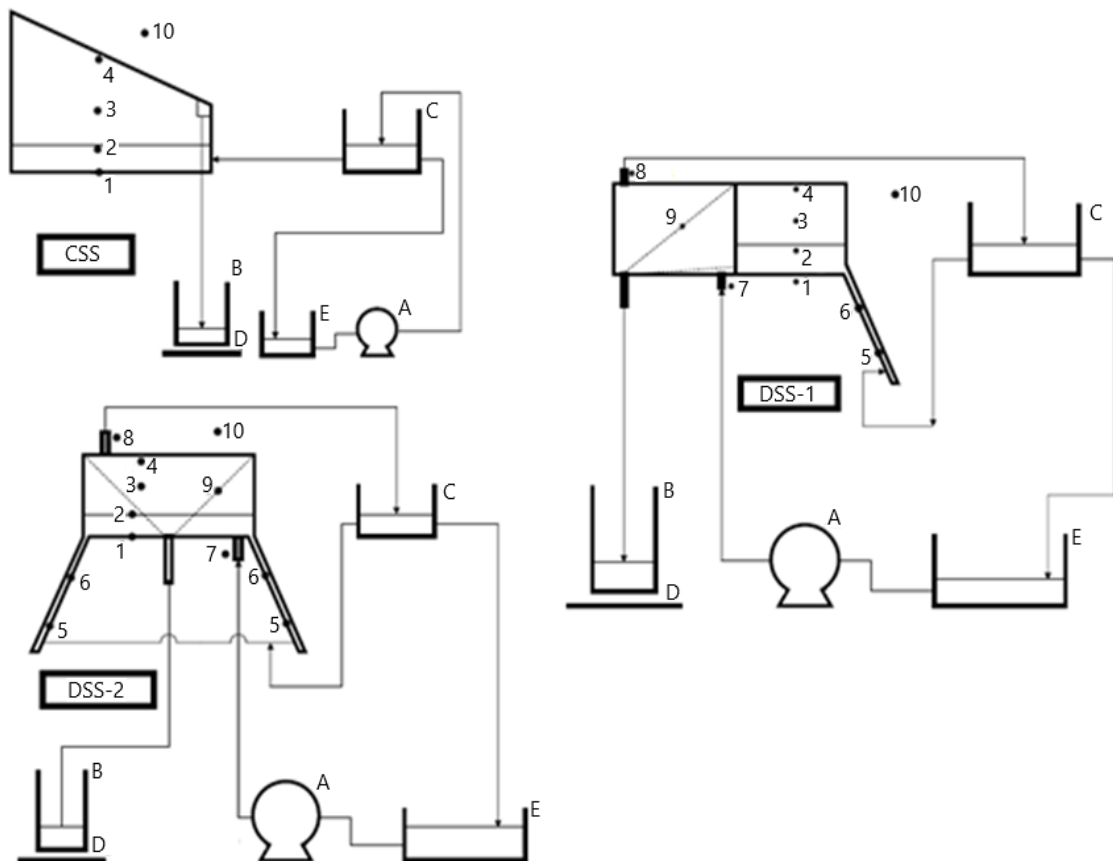
Pasir besi merupakan pasir yang mengandung besi dalam jumlah yang cukup banyak. Pasir besi memiliki jumlah besi di dalam pasir sekitar 76,35% (Indreswari Suroso, 2017) dan sangat cepat menjadi panas. Meskipun belum banyak digunakan untuk meningkatkan produktifitas *solar still*, pasir besi memiliki potensi sebagai penyerap panas yang baik di *solar still*. Terutama sebagai material Penggunaan pasir besi pada penyerap yang terbuat dari semen cor dapat meningkatkan produktifitas *solar still* (Pratama; et al., 2013) hingga 57,1 % (Mugisidi et al., 2020) dibandingkan dengan *solar still* konvensional yang tidak ditambahkan pasir besi.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Penelitian ini merupakan penelitian eksperimental yang dipersiapkan dalam beberapa tahap yang dimulai dengan studi literatur.

3.1 Sistem Pengujian

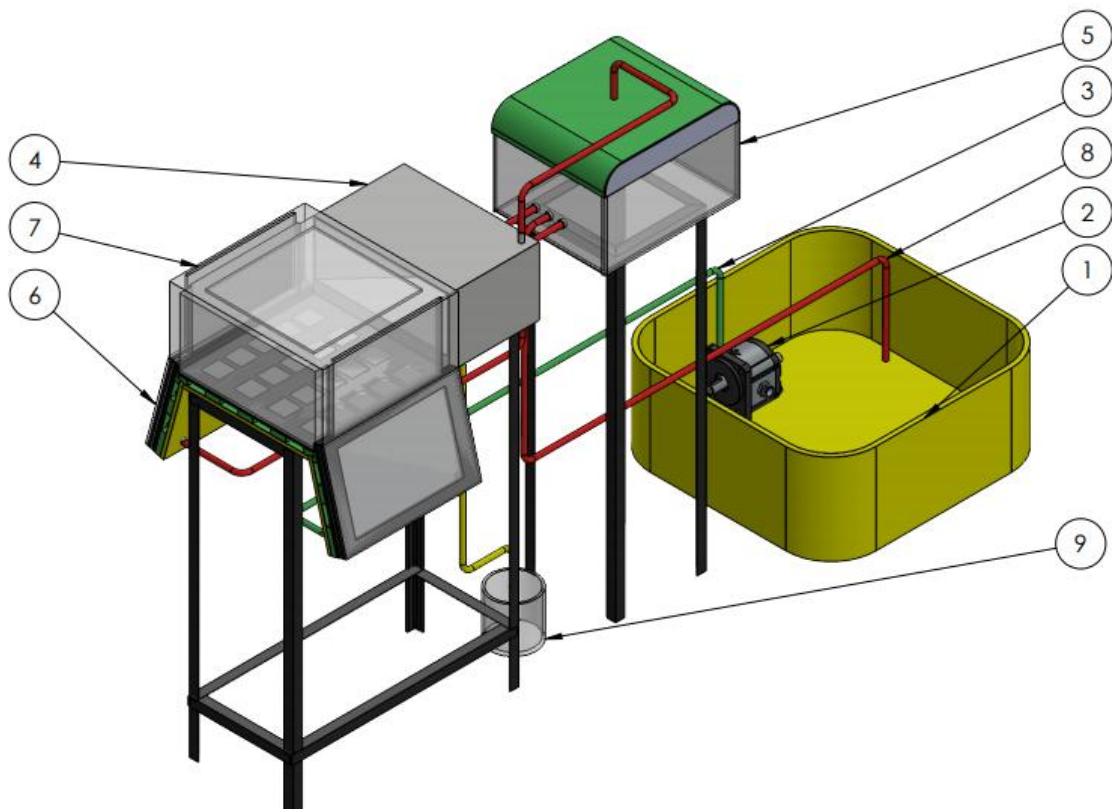
Pengambilan data menggunakan 3 jenis *solar still* dan dilaksanakan secara bersamaan agar input serta kondisi eksternalnya tidak berbeda. *Solar still* yang digunakan adalah *solar still* konvensional (CSS), *developed solar still* 1 (DSS-1) yang penerimaan panasnya dikelompokkan ke dalam *single slope solar still* dan *developed solar still* 2 (DSS-2) yang masuk ke dalam kelompok *double slope solar still*. Ukuran penyerap panas dan kondensor DSS-1 dan DSS-2 dibuat sama perbedaannya hanya pada arah menerima cahaya matahari. Pengujian awal



Gambar 3-1 Posisi sensor pengujian CSS, DSS-1 and DSS-2.

Nomor 1 hingga 10 adalah sensor temperatur; 1=Plat penyerap panas, 2=Air laut, 3=Ruang penguapan, 4=Kaca penutup sisi dalam, 5=Sensor pemanas bawah, 6=Sensor pemanas atas, 7= Air pendingin masuk, 8=Air pendingin keluar, 9=Kondensor, 10= Lingkungan (A)=Pompa sirkulasi, (B)=Penampung air tawar, (C)=Pengatur ketinggian, (D)=Timbangan, (E)= Penampung air laut.

dilakukan di dalam ruangan untuk memeriksa apakah alat dan sensor temperatur berfungsi sesuai dengan tujuannya. Apabila terdapat ketidaksesuaian alat ukur atau terjadi kebocoran maka alat akan diperbaiki dan diuji kembali. Setelah *solar still* dan alat ukur berfungsi dengan baik maka dilakukan pengujian di luar ruangan. Pada pengujian ini air laut di penampung ditimbang untuk mengukur jumlah air laut yang menguap di dalam basin dan membandingkan dengan hasil yang ditampung.



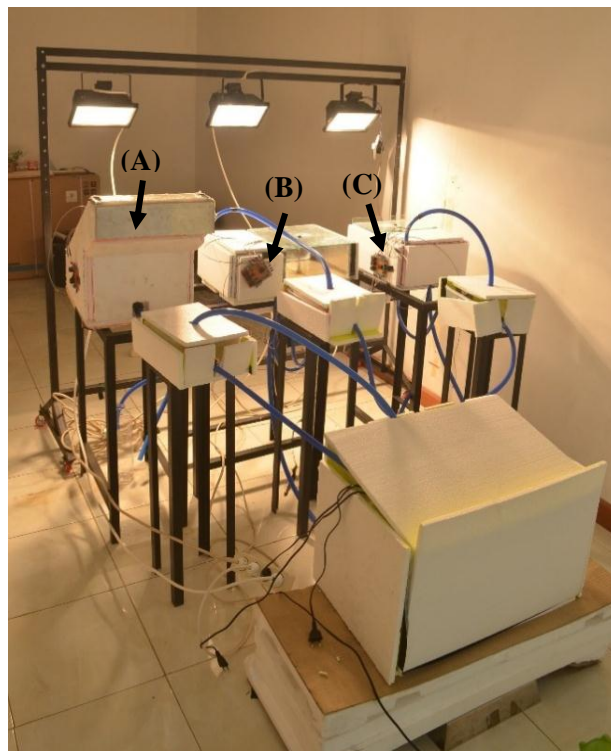
Gambar 3-2 Skema pengujian DSS-2.

1= Bak Penampung, 2= Pompa sirkulasi, 3= Pipa Sirkulasi masuk, 4= Kondensor, 5= Bak Pengatur ketinggian, 6= Pemanas awal, 7= Ruang Penguapan, 8= Pipa kembali ke bak

Gambar 3-1 dan 3-2 merupakan skema penelitian *solar still* yang digunakan pada penelitian disertasi ini. *Solar still* konvensional (CSS) yang hanya terdiri dari satu ruang akan dikembangkan menjadi *solar still* yang memiliki ruang penguapan dan pengembun (DSS). DSS yang digunakan pada penelitian ada dua jenis, yaitu memiliki *solar still* yang menerima matahari hanya di satu sisi seperti pada *single slope solar still* atau disebut sebagai *developed solar still 1* (DSS-1) dan tipe *solar still* yang dapat menerima matahari dari dua sisi seperti pada *double slope solar still* yang disebut sebagai *developed solar still 2* (DSS-2). Sisi yang menerima panas pada DSS-1 diposisikan menghadap arah timur sedangkan pada DSS-2

menghadap timur dan barat. Kaca penutup CSS diposisikan menghadap timur sedangkan instalasi pompa ditempatkan di sisi barat *solar still* untuk mengatur aliran air.

Aliran air dihasilkan oleh tiga buah pompa dengan debit masing-masing pompa 16,65 ltr/jam untuk melayani masing-masing *solar still*. pada CSS, air dari bak penampung akan dipompa ke tangki pengatur ketinggian yang mengisi CSS bila ketinggian air di dalamnya berkurang sementara air yang tidak masuk ke dalam *solar still* akan mengalir kembali ke bak penampung. Air di bak penampung diukur sehingga jumlah air yang berkurang dapat diketahui. Air hasil desalinasi akan dialirkan pada pengumpul yang ditempatkan di atas timbangan. Aliran air pada DSS-1 dan DSS-2 memiliki alur aliran yang sama. Air dari bak penampung dipompa masuk ke dalam pengembun dan berfungsi sebagai pendingin dengan di jaga temperaturnya pada $30\pm 1^{\circ}\text{C}$. Setelah itu air akan mengalir ke bak pengatur ketinggian yang akan mengalirkan air ke dalam *solar still* apabila tinggi air di *solar still* lebih rendah melalui bagian bawah pemanas awal. Air yang tidak masuk ke dalam *solar still* akan mengalir kembali ke bak penampung air laut. Hasil desalinasi pada DSS-1 dan DSS-2 keluar dari bagian bawah pengembun masuk ke dalam pengumpul di atas timbangan. Penelitian ini menggunakan tiga *solar still* secara bersamaan pada tanggal 8-10 Oktober 2019 mulai dari jam 08.00 hingga jam 17.00 WIB dengan terlebih dahulu diuji coba di dalam ruangan untuk menguji fungsi sensor dan kebocoran *solar still* sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 3-3.



Gambar 3-3 Uji coba di dalam ruangan.
Uji coba CSS (A), DSS-1 (B) dan DSS-2 (C) di dalam ruangan

Penguapan di dalam *solar still* terjadi di dalam ruang penguapan. Pasir besi yang memiliki berat jenis 2.554 kg/m^3 ditempatkan di dasar ruang penguapan. Ruang penguapan memiliki ukuran Panjang 400 mm, lebar 300 mm. Semakin rendah permukaan air maka semakin besar produktivitasnya dan yang terbesar adalah pada ketinggian 1 cm (Elango & Kalidasa Murugavel, 2015). Perpindahan panas evaporasi, konveksi dan radiasi yang diusulkan oleh Dunkle pada *solar still* konvensional valid juga untuk wick yang merupakan media berpori (Sodha et al., 1981) oleh karena itu diasumsikan dapat juga digunakan pada pasir besi.

Pasir besi di dalam *solar still* memiliki ketinggian 2 cm sedangkan air laut diatur ketinggiannya 1 cm lebih tinggi. Karena air dan pasir bercampur, maka temperatur awal dan akhir dari pasir besi dan air sama (Mugisidi et al., 2019). Panjang dan lebar ruang penguapan 300 mm dan 300 mm, dengan rasio void 0.4 – 0.85 (Geotechdata.info, 2019) dengan rata-rata 0,625 maka massa air adalah 2,025 Kg. Kapasitas panas spesifik air laut adalah 4190 (J/Kg K) (El-Samadony & Kabeel, 2014) sedangkan kapasitas Panas spesifik pasir besi adalah sebesar 780 (J/Kg K) dan berat jenisnya $2.554 \text{ (Kg/m}^3\text{)}$ (Putra et al., 2008).

Tabel 3-1 Data absorptifitas dan reflektifitas kaca, air dan plat (Omara et al., 2014)

α_g	α_w	α_b	R_g	R_w	α_b'
0.05	0.05	0.95	0.08	0.08	0.725682

Data penelitian dikumpulkan dengan cara eksperimental. Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan termometer yang telah dikalibrasi. Pengambilan data dilakukan selama tiga hari tanpa mempertimbangkan kondisi matahari.

3.2 Bahan dan Alat

Solar still yang digunakan pada penelitian ini akan menggunakan bahan Alumunium sebagai material utamanya yang berfungsi untuk menyerap dan menyalurkan panas karena memiliki konduktifitas yang baik (Mugisidi et al., 2018). Kaca penutup menggunakan kaca transparan tebal 3 mm. Kaca penutup dibuat 2 lapis dengan jarak diantaranya 2 mm. Sisi luar *solar still* yang berbahan Alumunium dilapisi Styrofoam dengan tebal 30 mm seperti dapat dilihat pada Tabel 3-2. Sedangkan ketelitian alat yang digunakan mengukur dapat dilihat pada Tabel 3-3.

Tabel 3-2. Bahan yang dipergunakan untuk *solar still*

No	Bagian	Bahan	Keterangan
1	Plat Penyerap	Alumunium 3 mm	
2	Kaca Penutup	Kaca transparant 3 mm	
3	Media berpori	Pasir besi	Pantai Glagah, Kulonprogo, Yogyakarta

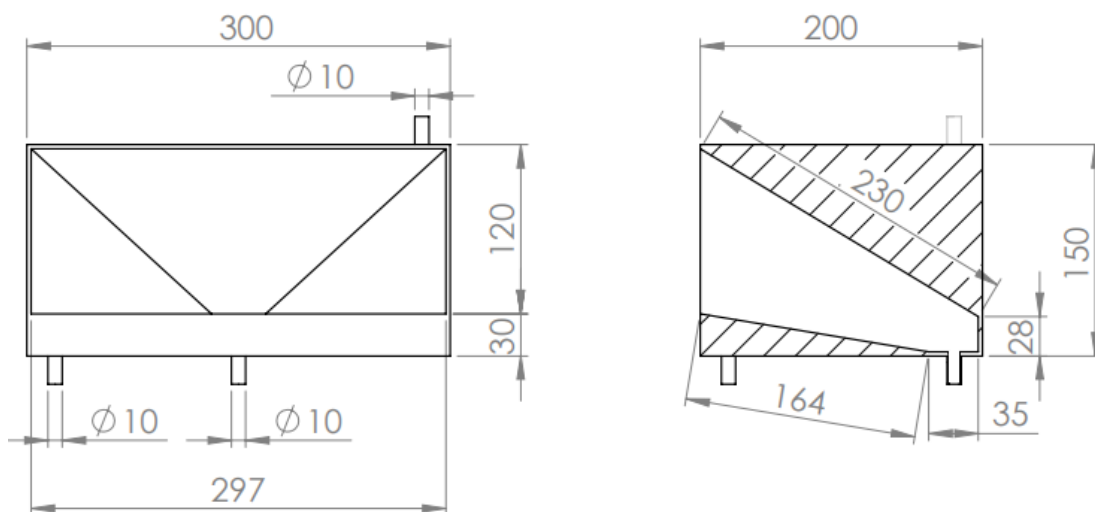
4	Insulasi	Styrofoam 30 mm	
5	Air	Air laut	Ujung kulon

Tabel 3-3. Alat yang digunakan dalam penelitian

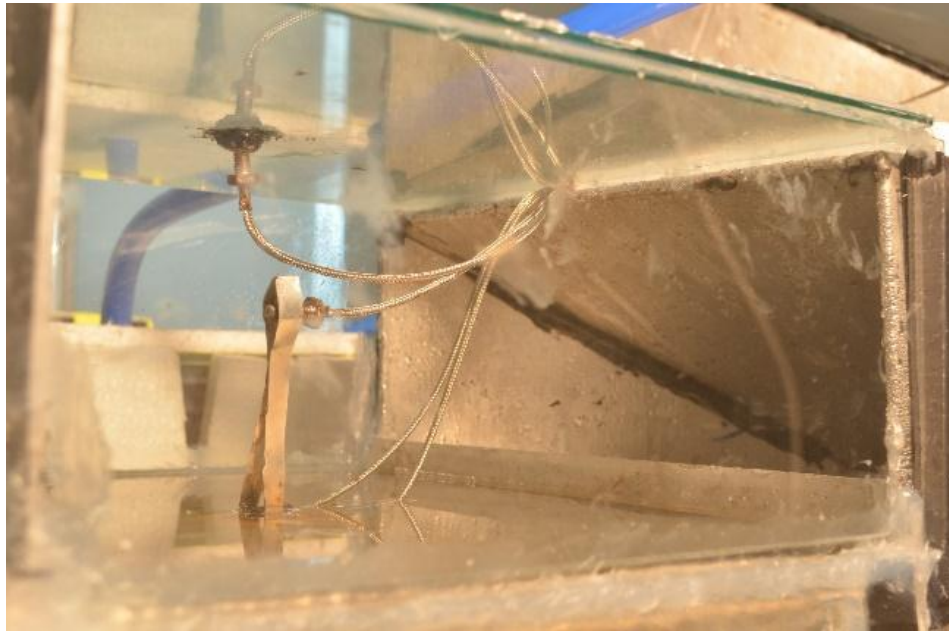
No	Bagian	Alat	Keterangan
1	Data Temperatur	Termometer	40- 400 °C ± 0.09%
2	Solar Radiance	Solar Meter	0 - 2000 W/m ² ± 1%
3	Kecepatan Angin	Wind Meter	0 - 30 ± 0,1 m/s
4	Kelembapan Relatif	Hygrometer	10% - 99%
5	Hasil	Timbangan	0-5.000 ± 1 gr

3.3 Kondensor

Kondensor menjadi bagian penting karena peningkatan produktifitas *solar still* pada penelitian ini terjadi karena adanya penambahan kondensor. Kondensor pada DSS-1 dan DSS-2 terintegrasi dan menjadi bagian dari *solar still* tetapi tidak disatukan dengan ruang penguapan. Kondensor di desain memiliki luas penampang yang sama dengan ruang penguapan sehingga aliran uap air tidak terganggu saat memasuki ruang kondensor. Penampang kondensor semakin dalam akan semakin mengecil dan miring ke bawah. Kemiringan sisi atas dan sisi bawah kondensor untuk memaksa air hasil kondensasi mengalir menuju saluran pengumpul. Kedua sisi samping kondensor semakin mengecil untuk memaksa uap air bersentuhan dengan dinding. Di sekeliling kondensor terdapat ruang yang berisi air laut yang mengalir dari penampung menuju bak pengatur ketinggian. Air laut yang dilewatkan di sisi luar kondensor difungsikan sebagai pendingin dan mengambil panas yang dilepaskan oleh uap air saat terjadi proses pengembunan. Dimensi kondensor dapat dilihat pada Gambar 3-4 sedangkan foto kondensor dapat dilihat pada Gambar 3-5. Luas dinding kondensor adalah 104.470,78 mm² atau 0,104 m².



Gambar 3-4 Bentuk dan dimensi kondensor DSS-1 dan DSS-2



Gambar 3-5 Foto kondensor DSS-1 dan DSS-2

3.4 Simulasi CFD

Simulasi menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD) telah dilakukan oleh banyak peneliti dan dipergunakan sebagai bagian dari analisis hasil penelitian (El-Sebaey et al., 2020; Khare et al., 2017; Nadgire et al., 2020; Yan et al., 2020). Simulasi di dalam penelitian ini menggunakan software Ansys Fluent 18.2.

Computational Fluid Dynamics (CFD) merubah persamaan atur dinamika fluida dalam bentuk integral dan turunan menjadi bentuk aljabar yang terdiskritisasi, yang mana dapat diselesaikan dengan komputer untuk memperoleh nilai-nilai dari medan aliran pada titik atau waktu diskrit tertentu. Adapun persamaan alur dalam dinamika fluida ada tiga yaitu persamaan kontinuitas, persamaan momentum dan persamaan energi.

Persamaan kontinuitas bentuk integral,

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho dV + \iint_A \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (3.1)$$

Persamaan kontinuitas bentuk deferential,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \vec{V} \cdot \vec{V} = 0 \quad (3.2)$$

Persamaan momentum pada arah sumbu x,

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (3.3)$$

Persamaan momentum pada arah sumbu y,

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (3.4)$$

Persamaan momentum pada arah sumbu z,

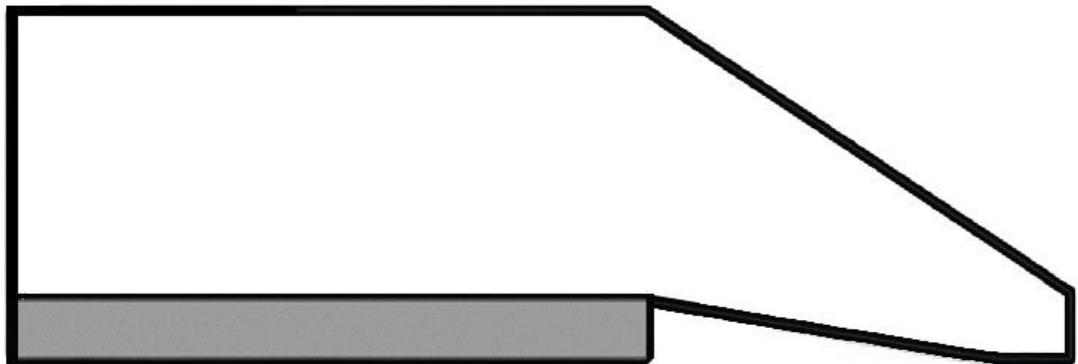
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (3.5)$$

Persamaan energi ditulis dalam bentuk *internal energy*,

$$\frac{\partial}{\partial t} \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \right] + \vec{\nabla} \cdot \left[\rho \left(e + \frac{v^2}{2} \right) \vec{V} \right] = \rho \dot{q} - \frac{\partial(\rho p)}{\partial x} - \frac{\partial(v p)}{\partial y} - \frac{\partial(w p)}{\partial z} + \rho \vec{f} \cdot \vec{V} \quad (3.6)$$

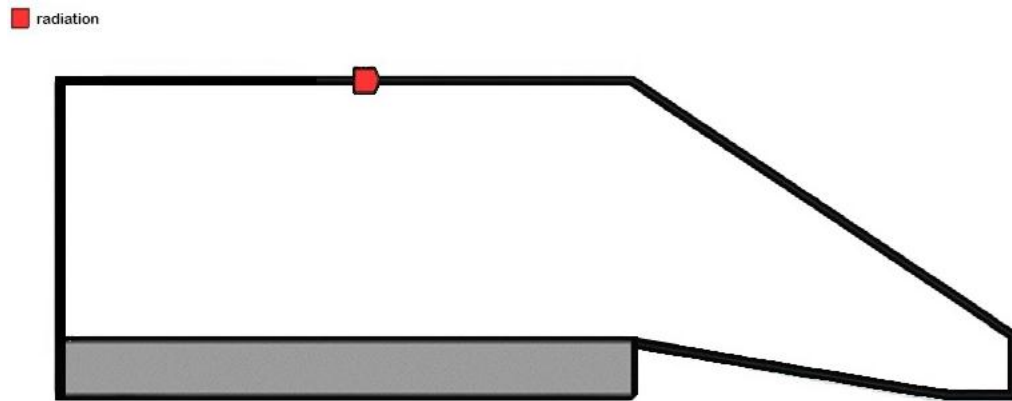
Solusi dari persamaan analitis diferensial parsial menghasilkan ekspresi *dependent variable* bentuk tertutup secara kontinyu pada seluruh domain. Sebaliknya, solusi persamaan numerik hanya dapat memberikan nilai pada titik diskrit dalam domain, disebut juga dengan titik *grid*.

Dalam penelitian ini, ruangan basin dibagi menjadi dua, yaitu bagian atas merupakan tempat terjadinya penguapan dan kondensasi di bagian dinding kondensor, sedangkan bagian bawah merupakan tempat air yang berada dalam fasa cair. Pemisahan ini dilakukan untuk mempermudah proses inialisasi ketinggian air liquid mula-mula (*patch*), seperti terlihat pada gambar 3-6 berikut ini

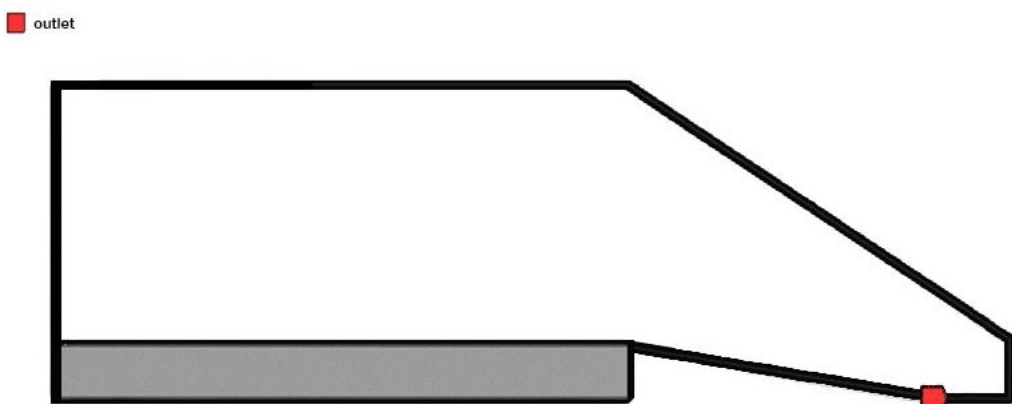


Gambar 3-6 Geometri domain fluida secara umum.

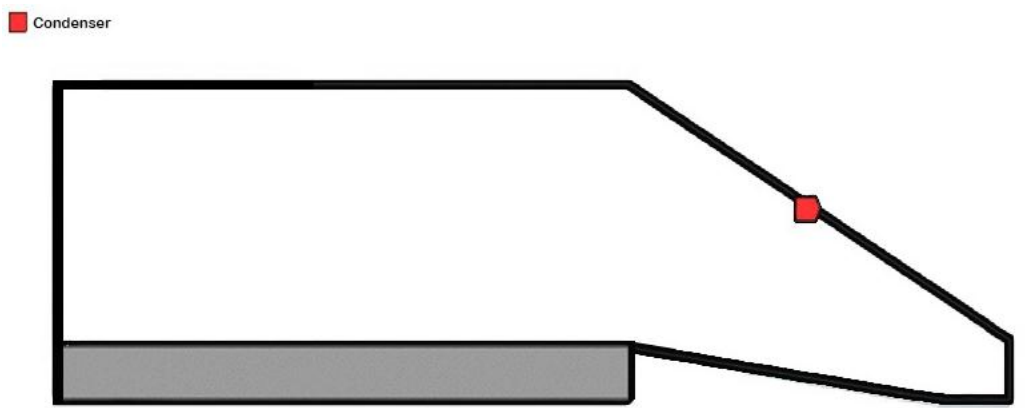
Radiasi matahari melewati kaca atas yang kemudian diserap panasnya oleh dasar basin sehingga memanaskan air di basin. Temperatur air yang naik di basin juga meningkatkan tekanan di permukaan air menjadi lebih tinggi daripada di ruang penguapan sehingga terjadi penguapan. Model yang dibuat adalah domain fluida (negatif) dari sistem, seperti digambarkan pada Gambar 3-7 hingga 3-9.



Gambar 3-7 Lokasi input radiasi dari geometri



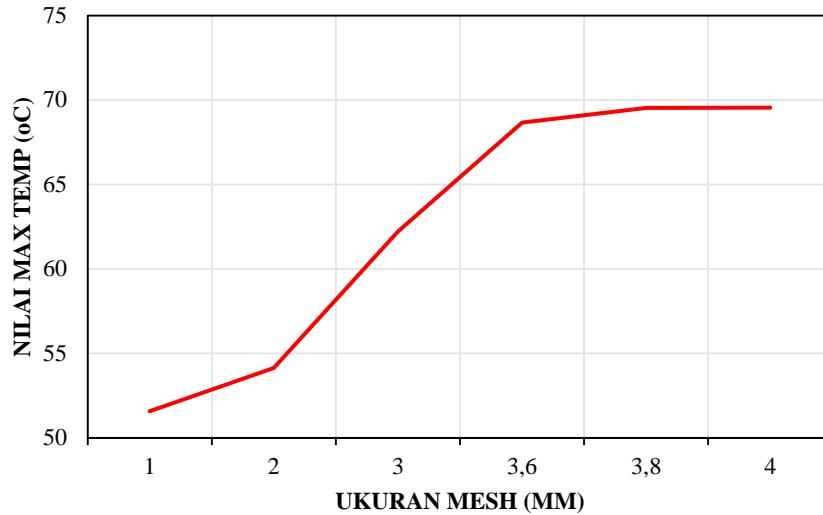
Gambar 3-8 Lokasi outlet dari geometri



Gambar 3-9 Lokasi condenser dari geometri

Meshing atau diskritisasi pada CFD adalah proses konversi domain fluida yang kontinu menjadi domain komputasi yang diskrit. Dengan ini, persamaan-persamaan fluida dapat diselesaikan solusinya menggunakan metode numerik dengan *Computational Fluid Dynamic* (CFD). Mesh yang efisien sangat penting pada simulasi multifasa karena mempengaruhi akurasi

simulasi (Hamad et al., 2018). Oleh karena itu, perlu dilakukan uji grid independent seperti ditampilkan pada Gambar 3-10. Grid independent telah konvergen apabila error kurang dari 1% (Gnanavel et al., 2020; Shoeibi et al., 2021) dan pada penelitian diperoleh pada ukuran mesh terbesar 4 mm.



Gambar 3-10 *Grid independent test*

Dalam simulasi ini, meshing dibuat menggunakan metode meshing hexahedron (Gambar 3-11) karena relatif lebih efisien dalam membentuk ukuran, lebih efektif dalam hal transfer data, dan resolusi yang lebih tinggi dengan setting komputasi seperti pada Tabel 3-4.



Gambar 3-11 Meshing hexahedron

Tabel 3-4 menunjukkan setting komputasi yang digunakan dalam simulasi CFD untuk mendapatkan distribusi aliran dan evaporasi di dalam basin.

Tabel 3-4. Setting komputasi

No	Setting	Parameter
1	Gravitasi	9,81
2	Multifasa	Eulerian
3	Turbulen	K-epsilon realizable

Karena dalam simulasi ini terdapat beberapa fluida yang memiliki fasa yang berbeda (udara, air, dan uap), maka harus digunakan permodelan multifasa. Untuk aliran dengan pemisahan yang jelas antara fasa satu dengan fasa lainnya, maka model Volume of Fluid (VoF) digunakan, model ini juga relatif jauh lebih sederhana dan efisien dibandingkan dengan eulerian atau mixture. Kemudian, model VOF ini dikombinasikan dengan model evaporasi dan kondensasi untuk memfasilitasi perubahan fasa liquid dan uap. Untuk Aliran, model k-epsilon realisable digunakan karena aliran yang mendominasi adalah aliran free stream (jauh dari dinding), sedangkan modifikasi realizable digunakan untuk meningkatkan akurasi pada daerah dekat dinding seperti kondensor dan sekitar outlet dengan persamaan:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \kappa) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \cdot \vec{u} \cdot \kappa) = \vec{\nabla} \cdot \left(\rho \left\{ v_l + \frac{v_t}{\sigma_{t,\kappa}} \right\} \cdot \vec{\nabla} \kappa \right) + \rho \cdot (P_K - \varepsilon) \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \cdot \varepsilon) + \vec{\nabla} \cdot (\rho \cdot \vec{u} \cdot \varepsilon) = \vec{\nabla} \cdot \left(\rho \left\{ v_l + \frac{v_t}{\sigma_{t,\varepsilon}} \right\} \cdot \vec{\nabla} \varepsilon \right) + \rho \cdot \left(C_{1\varepsilon} \cdot S \cdot \varepsilon - C_{2\varepsilon} \cdot \varepsilon^2 / \left\{ \kappa + \sqrt{(v_l \cdot \varepsilon)} \right\} \right) \quad (3.8)$$

Input-input yang digunakan untuk kondisi batas adalah:

- wall: Pada dinding-dinding didefinisikan sebagai wall dengan no slip condition untuk merepresentasikan gesekan antara fluida dengan dinding. Pada dinding radiation didefinisikan dengan heat flux, sedangkan pada dinding kondensor didefinisikan dengan suhu sesuai dengan data.
- Outlet: pada bagian outlet didefinisikan sebagai pressure-outlet untuk merepresentasikan “jalan keluar” dari aliran.
- Patch: Pada zona bagian bawah, dilakukan patch pada saat awal simulasi untuk mendefinisikan volume fraction liquid water sebesar 100%.

3.5 Validitas Data

Validasi data pada *solar still* dapat dilakukan dengan beberapa cara yang salah satunya adalah menggunakan data eksperimen dan dikorelasikan dengan nilai prediksi (Dimri et al., 2008; Panchal & Thakkar, 2016). Cara ini banyak digunakan karena cara validasi yang lain seperti menggunakan standar deviasi lebih sulit untuk digunakan karena radiasi matahari yang menjadi input selalu berubah sehingga tidak dapat dibandingkan secara langsung (Shukla & Sorayan, 2005). Bila data perhitungan divalidasi menggunakan data eksperimen, kesesuaiannya dapat diukur dengan menggunakan koefisien korelasi

$$r = \frac{N \sum x_i y_i - \sum(x_i) \sum(y_i)}{\sqrt{N \cdot \sum(x_i^2) - (\sum x_i)^2} \cdot \sqrt{N \cdot \sum(y_i^2) - (\sum y_i)^2}} \quad (3.9)$$

Kesesuaian nilai juga dapat dipresentasikan menggunakan *root mean square deviation*, dengan persamaan:.

$$e = \sqrt{\frac{\sum(e_i)^2}{N}} \quad (3.10)$$

$$e_i = \frac{x_i - y_i}{x_i} \quad (3.11)$$

Selain simulasi hasil penelitian, simulasi hasil validasi dilakukan dengan membandingkan dengan hasil eksperimen (Yan et al., 2020). Validasi temperatur dilakukan pada temperatur air, temperatur kaca atas dan temperatur basin dengan selisih temperatur antara pengukuran dengan simulasi sebesar 1,35 °C.

3.6 Analisa Ketidakpastian

Analisa ketidakpastian bertujuan untuk mengukur variabilitas output yang disebabkan oleh variabilitas input (Geffray et al., 2018). Kuantifikasi paling sering dilakukan dengan memperkirakan secara statistik seperti mean, median, dan kuantil populasi. Estimasi sangat dipengaruhi pada teknik propagasi ketidakpastian karena ukuran sampel yang seringkali terbatas (Moffat, 1985).

Analisa ketidakpastian dapat diperkirakan dengan ketidakpastian individu dari nilai sampel dengan menghitung akar kuadrat dari jumlah setiap standar deviasi sampel dibagi dengan akar kuadrat dari jumlah sampel. Estimasi ketidakpastian internal (U_i) dapat diperkirakan dengan (Kumar & Tiwari, 1996; Manchanda & Kumar, 2017; Pengra & Dillman, 2009):

$$u_i = \sqrt{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \dots + \sigma_i^2}{N^2}} \quad (3.12)$$

dimana U_i adalah ketidakpastian dan σ_i adalah simpangan baku setiap data sedangkan N adalah jumlah data. Ketidakpastian pada penelitian ini diketahui dengan menghitung simpangan baku antara hasil air yang dihasilkan dengan energi matahari yang diterima dengan memasukkan ketidakpastian alat ukur yang ditampilkan pada Tabel 3-3.

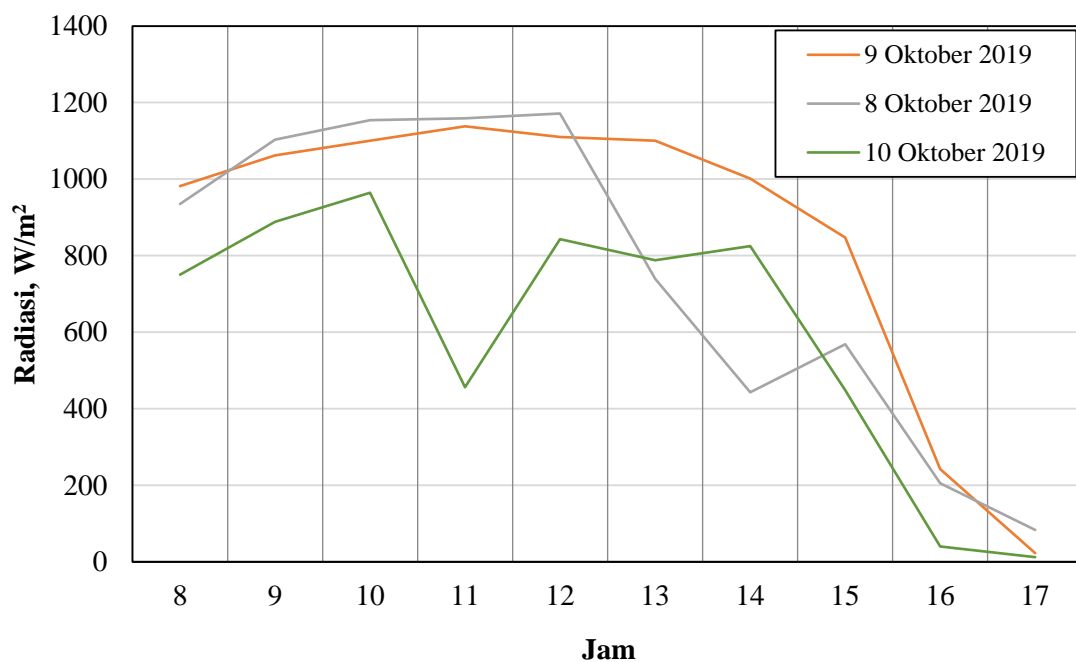
BAB 4 ANALISIS HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

4.1 Perbandingan CSS, DSS-1 dan DSS-2

Solar still di uji coba di dalam ruangan untuk memeriksa kebocoran dan bekerjanya sistim. Setelah pengujian di dalam ruangan menunjukkan bahwa tidak ada kebocoran pada *solar still* dan sistim bekerja dengan baik maka dilakukan pengambilan data dengan kondisi sebenarnya. Pengambilan data pada tahap ini menggunakan tiga jenis *solar still* yaitu CSS, DSS-1 dan DSS-2. Pengambilan data pada ketiga *solar still* dilakukan pada waktu yang bersamaan yaitu pada tanggal 8 – 10 Oktober 2019.

4.1.1 Temperatur dan Hasil

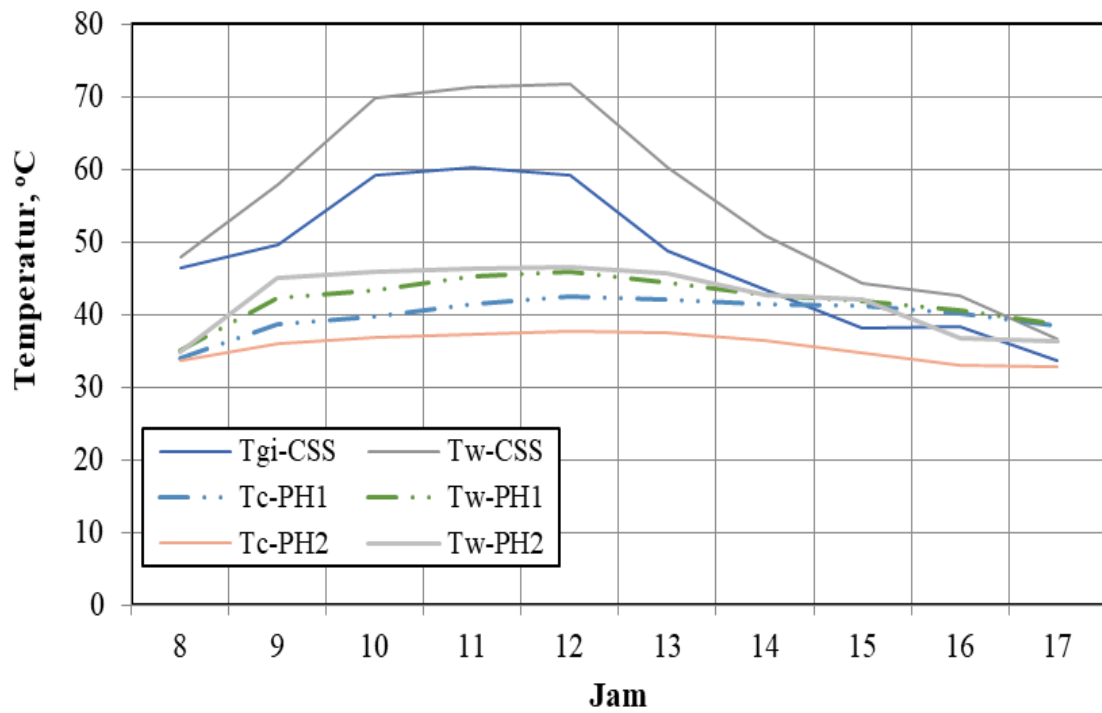
Data hasil penelitian untuk CSS, DSS-1 dan DSS-2 mulai tanggal 8 hingga 10 Oktober 2019 ditampilkan pada tabel LAMPIRAN-2 hingga LAMPIRAN-10. Pada CSS data kecepatan angin dimasukkan karena proses kondensasi yang terjadi pada kaca penutup dipengaruhi oleh kecepatan angin (El-Sebaai, 2000) sedangkan pada DSS-1 dan DSS-2 angin tidak mempengaruhi hasil karena kaca penutup menggunakan kaca ganda yang terpisah 2 mm dan proses kondensasi terjadi di kondensor yang sekelilingnya berisi air sebagai media pendingin.



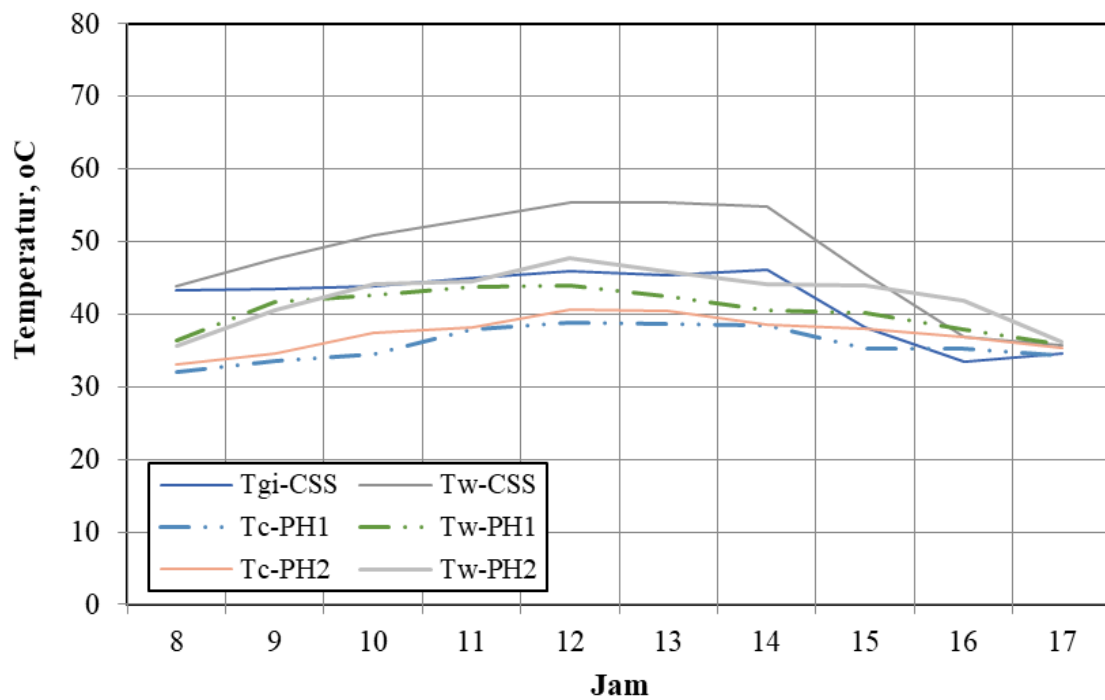
Gambar 4-1 Radiasi matahari tanggal 8 - 10 Oktober 2019

Data hasil penelitian yang dapat dilihat pada Tabel LAMPIRAN-2 hingga LAMPIRAN-10 yang merepresentasikan radiasi matahari, hasil air bersih, temperatur dan kelembaban relatif. Temperatur kaca penutup bagian dalam (T_{gi}), meskipun diukur untuk ketiga *solar still*, hanya ditampilkan pada CSS sedangkan untuk DSS-1 dan DSS-2 digantikan dengan temperatur air masuk pendingin kondensor (T_{pi}) dan temperatur keluar pendingin kondensor (T_{po}) karena proses kondensasi untuk *solar still* DSS-1 dan DSS-2 terjadi di kondensor. Temperatur uap di dalam kondensor diberi notasi T_c sedangkan temperatur uap di ruang penguapan diberi notasi T_v . Proses penguapan di CSS, DSS-1 dan DSS-2 seluruhnya terjadi di ruang penguapan.

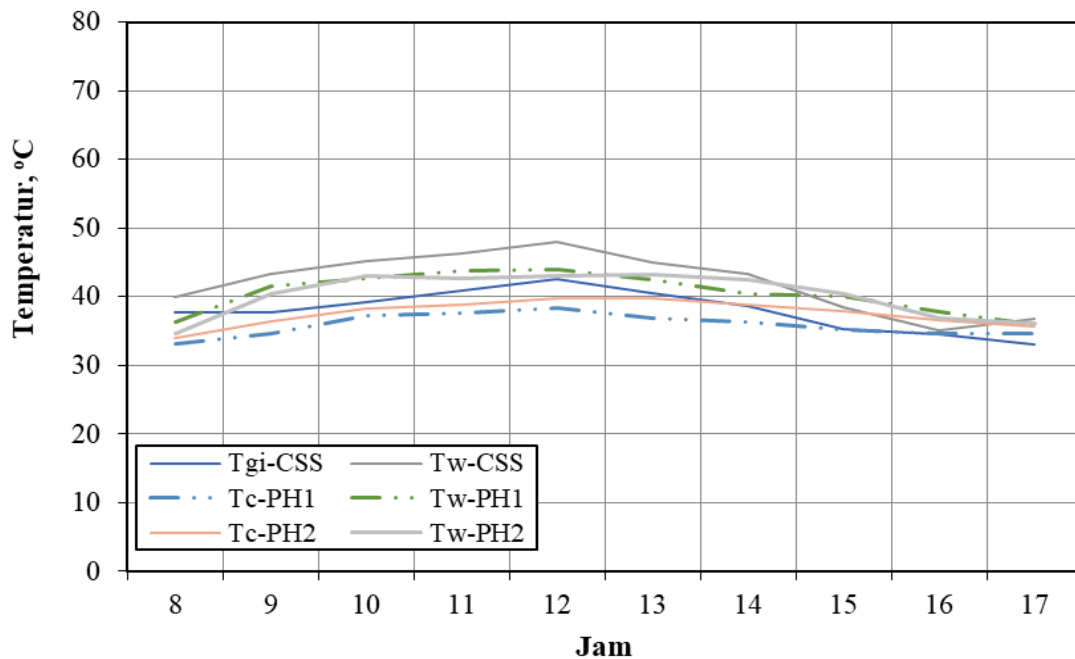
Proses penguapan di dalam *solar still* sangat dipengaruhi oleh radiasi panas yang diperoleh dari matahari. Radiasi matahari selama tiga hari pengambilan data diukur dan ditampilkan pada Gambar 4-1. Tampak bahwa radiasi matahari selama tiga hari berbeda-beda dengan akumulasi radiasi matahari yang terbesar terjadi pada hari kedua yaitu tanggal 9 Oktober 2019. Perbedaan radiasi matahari terjadi karena penelitian ini dilakukan di luar ruangan sehingga dipengaruhi oleh faktor luar yang tidak dapat dikendalikan. Contohnya pada hari ke-tiga langit berawan lebih merata dibandingkan hari sebelumnya sehingga akumulasi radiasi matahari menjadi lebih rendah. Perbedaan radiasi matahari ini mempengaruhi temperatur air di dalam *solar still*. Temperatur setiap *solar still* pada tanggal 8 - 10 Oktober 2019 dipresentasikan pada Gambar 4-2 hingga 4-4.



Gambar 4-2 Temperatur pada CSS, DSS-1 dan DSS-2 tanggal 8 Oktober 2019



Gambar 4-3 Temperatur pada CSS, DSS-1 dan DSS-2 tanggal 9 Oktober 2019



Gambar 4-4 Temperatur pada CSS, DSS-1 dan DSS-2 tanggal 10 Oktober 2019

Temperatur pada ketiga *solar still* memiliki kecenderungan yang berbeda. Perubahan temperatur di Gambar 4-2 hingga 4-4 menunjukkan temperatur air dan kaca penutup bagian dalam di CSS, DSS-1 dan DSS-2 tampak sangat dipengaruhi radiasi matahari yang masuk meskipun pada DSS-1 dan DSS-2 temperaturnya cenderung lebih rendah dari pada temperatur CSS. Meskipun temperatur air di CSS lebih tinggi tetapi proses produksi air bersih pada CSS dipengaruhi oleh kecepatan angin yang akan mempengaruhi temperatur kaca penutup di sisi dalam (Tgi) dan pada akhirnya berpengaruh pada produktifitasnya. Apabila temperatur kaca penutup bagian dalam lebih rendah daripada temperatur embun uap air maka proses kondensasi akan terjadi dan kelembaban relatif di dalam *solar still* akan turun (Deshmukh & Thombre, 2017). *Solar still* DSS-1 dan DSS-2 menggunakan kaca penutup ganda dan kondensor dikelilingi oleh air pendingin sehingga tidak dipengaruhi kecepatan angin karena itu proses kondensasi *solar still* DSS-1 dan DSS-2 terjadi di dalam kondensor. Data temperatur sisi dalam kaca penutup atas dan temperatur pengembunan dituliskan pada Tabel 4-1.

Tabel 4-1 Temperatur Tgi dan Tp CSS, DSS-1 dan DSS-2 tanggal 8 – 10 Oktober 2019

Jam	CSS		DSS-1		DSS-2		8 Oktober 2019
	Tgi	Tp	Tgi	Tp	Tgi	Tp	
8	46,4	41,1	43,0	31,2	36,0	29,9	
9	51,0	50,0	42,7	35,3	41,5	33,3	
10	61,0	60,2	45,8	35,7	40,8	32,9	

11	60,2	60,6	45,5	37,5	42,4	32,2
12	59,2	61,0	47,6	38,0	42,9	31,6
13	48,7	50,9	44,7	37,6	43,0	31,2
14	43,4	43,4	44,1	36,3	36,5	31,4
15	38,2	37,4	41,1	36,0	35,4	31,9
16	38,3	35,4	39,4	35,1	31,7	30,5
17	33,7	30,5	37,2	32,2	28,2	31,0

Jam	CSS		DSS-1		DSS-2	
	Tgi	Tp	Tgi	Tp	Tgi	Tp
8	43,3	47,3	43,0	26,1	41	27,4
9	43,5	45,5	42,7	31,7	41	32,7
10	43,9	46,1	45,8	31,7	44	33,5
11	44,9	46,0	45,5	34,0	46	33,1
12	45,9	47,2	47,6	33,8	50	33,1
13	45,3	46,7	44,7	32,4	48	33,3
14	46,2	46,9	44,1	32,0	44	33,0
15	38,2	35,8	41,1	31,4	44	32,8
16	33,5	33,7	39,4	31,3	40	33,0
17	34,6	29,4	37,2	31,5	36	32,5

9 Oktober 2019

Tabel 4-1 Lanjutan

Jam	CSS		DSS-1		DSS-2	
	Tgi	Tp	Tgi	Tp	Tgi	Tp
8	38	38,4	38,3	27,1	38	31,1
9	38	46,1	40,2	32,9	43	34,5
10	39	48,3	43,2	34,0	47	34,4
11	41	47,1	42,5	33,8	45	34,8
12	43	46,9	43,2	34,0	49	33,5
13	41	47,9	45,5	32,5	48	33,4
14	39	41,9	43,6	31,4	47	32,6
15	35	37,2	40,8	31,2	41	32,8
16	35	33,1	38,5	30,8	39	31,5
17	33	29,6	37,5	30,7	37	30,7

10 Oktober 2019

Karena proses pengembunan diinginkan terjadi di dalam kondensor maka kaca penutup di buat menjadi 2 lapis dan diberi jarak sehingga pengaruh angin dapat diperkecil dan pelepasan panas melalui kaca penutup dapat dikurangi. Oleh karena itu temperatur kaca penutup bagian dalam (T_{gi}) memiliki temperatur yang lebih tinggi dari temperatur embun uap air (Tabel 4-1)

sehingga tidak terjadi kondensasi di ruang penguapan DSS-1 dan DSS-2 dan uap air bergerak menuju kondensor.

Tabel 4-2 Selisih temperatur
CSS (T_w-T_{gi}), DSS-1 dan DSS-2 (T_w-T_c) tanggal 8 – 10 Oktober 2019

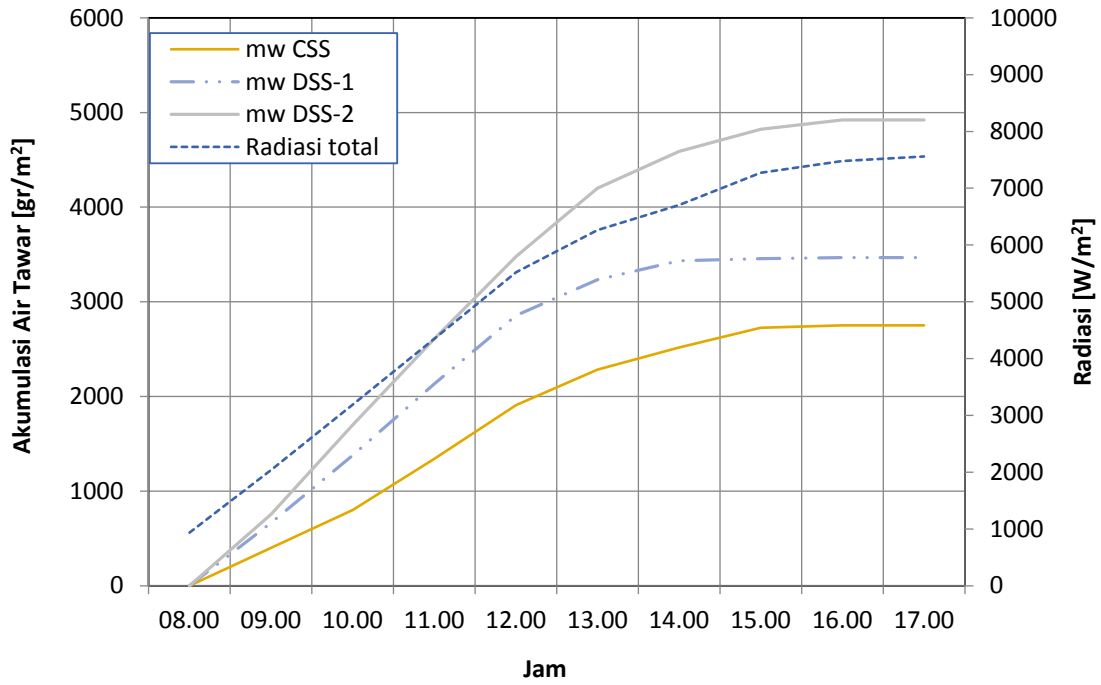
Jam	8 Oktober 2019			9 Oktober 2019			10 Oktober 2019		
	ΔT CSS	ΔT DSS- 1	ΔT DSS- 2	ΔT CSS	ΔT DSS- 1	ΔT DSS- 2	ΔT CSS	ΔT DSS- 1	ΔT DSS- 2
8	1,6	4,6	4,6	0,6	6,1	5,5	2,1	5,7	4,2
9	7,0	11,1	13,8	4,2	10,5	9,6	5,7	10,9	9,3
10	8,8	11,9	14,4	7,0	11,4	12,8	6,0	12,8	11,4
11	11,1	13,6	14,9	8,2	12,7	12,9	5,6	11,4	11,0
12	12,6	14,2	15,2	9,4	13,0	15,8	5,5	12,7	11,7
13	11,5	13,3	14,2	10,1	11,8	14,1	4,4	10,1	12,0
14	7,6	12,2	11,5	8,6	9,8	12,4	4,8	10,9	11,2
15	6,2	11,5	10,9	7,3	9,5	12,4	3,3	10,0	9,2
16	4,3	10,3	6,0	3,3	7,6	10,7	0,6	4,9	6,7
17	2,9	8,4	5,9	1,2	6,0	5,7	3,8	4,6	6,2

Kondensor yang digunakan di DSS-1 dan DSS-2 sekelilingnya diisi air yang dijaga temperatur masuknya pada 30 ± 1 °C. Oleh karena itu, di dalam perhitungan evaporasi, yang digunakan sebagai selisih temperatur adalah perbedaan temperatur antara temperatur air (T_w) dan temperatur dinding kondensor (T_c). Temperatur dinding kondensor yang lebih rendah menyebabkan selisih temperatur DSS-1 dan DSS-2 menjadi lebih besar dari pada CSS (Tabel 4-2). Selisih temperatur antara air dan permukaan pendingin di dalam *solar still* besarnya sebanding dengan perbedaan tekanannya (Abu-Hijleh, 1996). Apabila tekanan di permukaan air lebih besar dari pada ruang di atasnya maka akan terjadi proses penguapan. Oleh karena itu Evaporasi akan menjadi lebih besar apabila selisih temperatur antara air dengan permukaan pendingin semakin besar.

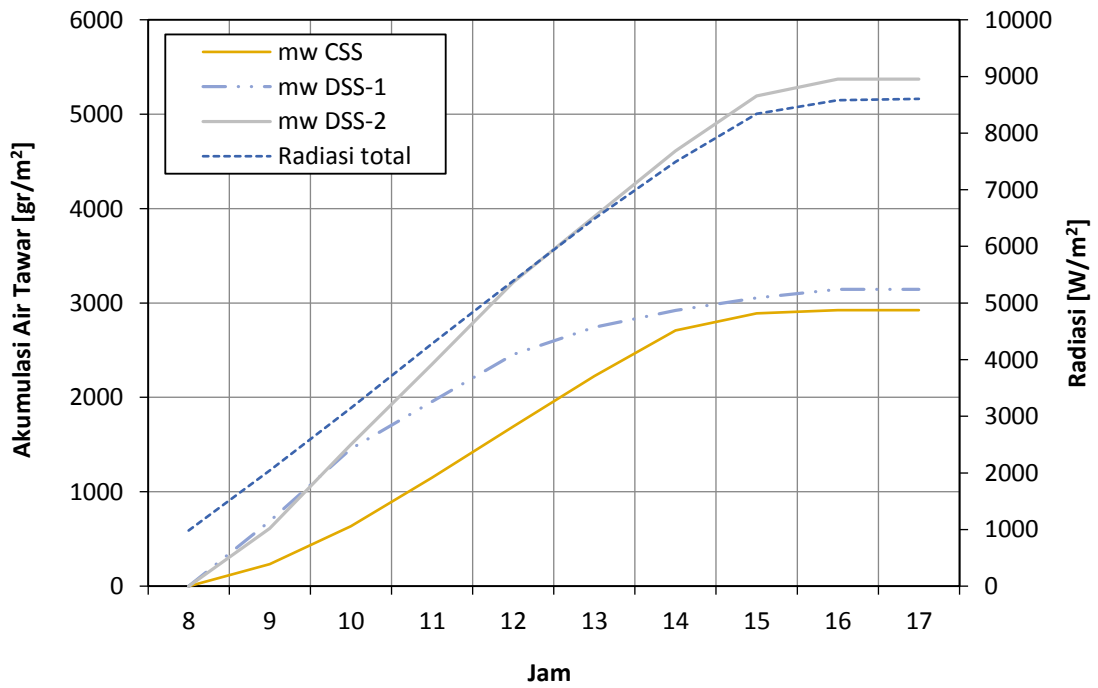
Selisih temperatur air dan permukaan pendingin di DSS-1 dan DSS-2 lebih besar dari pada CSS sehingga hasil air tawar yang diperoleh oleh DSS-1 dan DSS-2 lebih tinggi dari pada CSS seperti yang ditampilkan pada Gambar 4-5 hingga 4-7.

Gambar 4-5 hingga 4-7 menunjukkan bahwa akumulasi air tawar yang dihasilkan oleh DSS-1 dan PH 2 lebih tinggi dibandingkan dengan CSS pada berbagai akumulasi radiasi. Akan tetapi produksi air DSS-1 mencapai puncaknya pada jam 12.00 dan setelah itu menurun karena radiasi

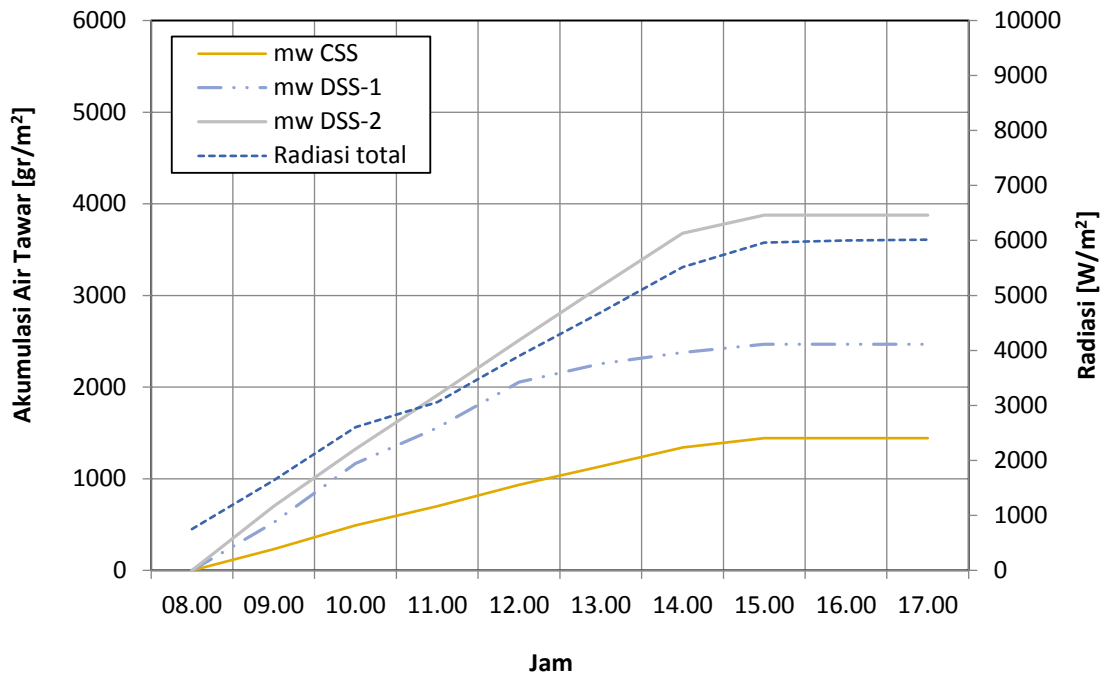
matahari terhalang oleh kondensor yang terintegrasi pada DSS-1 sehingga radiasi matahari tidak dapat memanaskan air di dalam *solar still* DSS-1.



Gambar 4-5 Akumulasi air tawar CSS, DSS-1, DSS-2 dan radiasi; 8 Oktober 2019



Gambar 4-6 Akumulasi air tawar CSS, DSS-1, DSS-2 dan radiasi; 9 Oktober 2019



Gambar 4-7 Akumulasi air tawar CSS, DSS-1, DSS-2 dan radiasi; 10 Oktober 2019

4.1.2 Koefisien Perpindahan Panas C dan n

Perpindahan panas di dalam *solar still* terjadi secara natural. Koefisien perpindahan panas dihitung mulai dari koefisien perpindahan panas evaporasi yang dihitung berdasarkan massa air bersih yang dihasilkan. Asumsi pada perhitungan ini adalah (Elango et al., 2015)

1. Tidak ada kebocoran uap air dari *solar still*.
2. Massa air yang hilang diabaikan
3. Level air di dalam basin dijaga konstan

Area kondensasi pada CSS dan DSS-1 dan DSS-2 memiliki perbedaan karena area kondensasi pada CSS adalah kaca penutup sisi dalam sedangkan DSS-1 dan DSS-2 adalah kondensor yang terintegrasi dengan *solar still* sehingga pengukuran temperatur pada CSS adalah T_{gi} pada kaca penutup sedangkan DSS-1 dan DSS-2 adalah T_c pada kondensor. Perhitungan untuk menentukan bilangan-bilangan tak berdimensi juga mengikuti ketentuan tersebut.

Perhitungan bilangan tak berdimensi dilakukan dengan menggunakan massa air yang dihasilkan dan temperatur hasil pengukuran. Bilangan Nusselt (Nu) diperoleh dengan terlebih dahulu menghitung koefisien perpindahan panas evaporasi (h_{ew}) dan koefisien perpindahan panas konveksi (h_{cw}) berdasarkan massa air yang dihasilkan (Mugisidi et al., 2021). Sebagai contoh perhitungan digunakan massa dan temperatur hasil pengukuran tanggal 9 Oktober pada jam 12.00. Massa air yang dihasilkan DSS-2 pada waktu tersebut adalah 78,3 gr atau 0,0783 kg.

Kemudian dengan menggunakan persamaan 2.11 maka koefisien panas penguapan (h_e) dapat diperoleh:

$$h_e = \frac{m_w \times h_{fg}}{(T_w - T_{gi}) \cdot 3600} \quad (4.1)$$

Pada DSS-2, T_{gi} diganti dengan T_c karena permukaan pengembunan yang digunakan adalah permukaan kondensor. Temperatur air (T_w) dan temperatur kondensor (T_c) pada waktu yang sama adalah $47,8^\circ\text{C}$ dan $40,7^\circ\text{C}$. H_{fg} dihitung dengan menggunakan persamaan 2.13 yang hasilnya adalah $2,379,975.27 \text{ J/kg}$ sehingga koefisien penguapan diperoleh sebesar

$$h_e = 7,29 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Koefisien penguapan selanjutnya digunakan untuk menghitung koefisien konveksi (h_c) dengan merubah persamaan (2.10)

$$h_c = \frac{h_e}{16,273 \times 10^{-3}} \cdot \left[\frac{T_w - T_c}{P_w - P_c} \right] \quad (4.2)$$

Tekanan air dan tekanan pada dinding kondensor dihitung menggunakan persamaan 2.4 dan 2.5 sehingga diperoleh (untuk DSS-2 notasi P_{gi} diganti menjadi P_c karena tekanan yang dihitung adalah tekanan di kondensor) :

$$P_w = 10.743,8 \text{ Pa}$$

$$P_c = 7.473,9 \text{ Pa}$$

Sehingga diperoleh nilai koefisien konveksi sebesar:

$$h_c = 0,973 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

Koefisien konveksi dipergunakan untuk menghitung bilangan Nusselt (Nu) dengan persamaan:

$$Nu = \frac{h_c \cdot d_f}{k_f} \quad (4.3)$$

Nilai d_f dan k_f

$$d_f = 0,13$$

$$k_f = 0,02871 \text{ (Lampiran)}$$

Sehingga diperoleh nilai Nusselt number

$$Nu = 4,51$$

Untuk menentukan Grashof (Gr) dan Prandtl (Pr) number ditentukan dengan persamaan:

$$Gr = \frac{\beta \cdot g \cdot L^3 \cdot \rho^2 \cdot \Delta T}{\mu} \quad (4.4)$$

$$Pr = \frac{\mu \cdot C_p}{k_f} \quad (4.5)$$

$$\Delta T = (T_w - T_v) + \frac{(P_w - P_v) \cdot T_w}{268,9 \cdot 10^3 - P_w} \quad (4.6)$$

Nilai-nilai yang digunakan untuk menghitung Gr dan Pr dapat dilihat pada Tabel LAMPIRAN-11 sehingga diperoleh nilai Gr dan Pr :

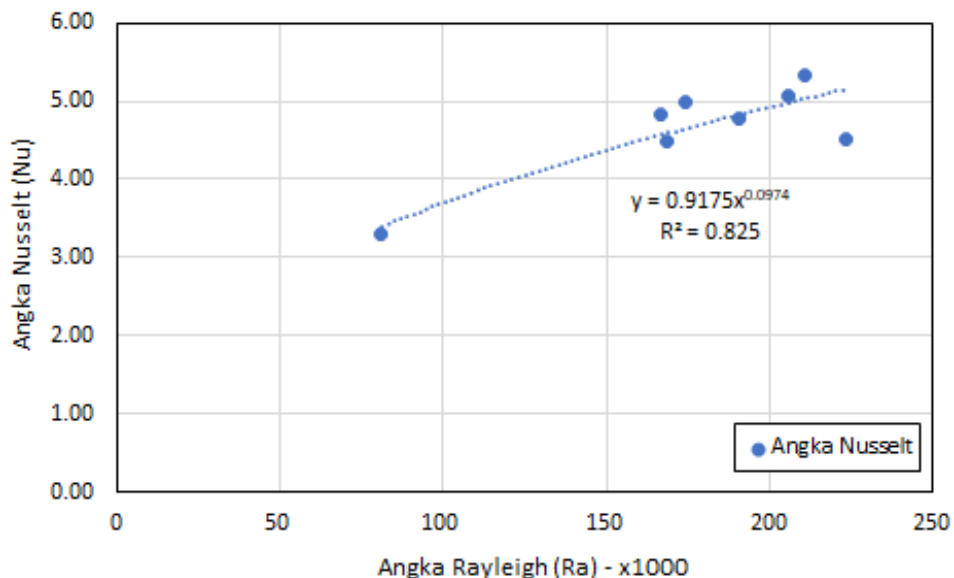
$$Gr = 327.167,41$$

$$Pr = 0,68263$$

Selanjutnya diperoleh Rayleigh number (Ra)

$$Ra = 223.332,83$$

Dengan menggunakan regresi power maka C dan n dapat diperoleh dengan menggunakan grafik antara Ra dan Nu. Dengan menggunakan prosedur yang sama nilai Nu dan Ra pada jam yang berbeda di hari yang sama dapat dihitung. Sebagai contoh digunakan data DSS-2 pada tanggal 9 Oktober 2019 sebagaimana ditampilkan pada Gambar 4-8.



Gambar 4-8 Korelasi massa air hasil eksperimen dan perhitungan, 9 Oktober 2019

Dengan menggunakan regresi power maka nilai C dan n dapat ditentukan untuk mendapatkan pola yang sama dengan hasil penelitian (Mohamed et al., 2019a) dan hasilnya ditampilkan di tabel 4-3.

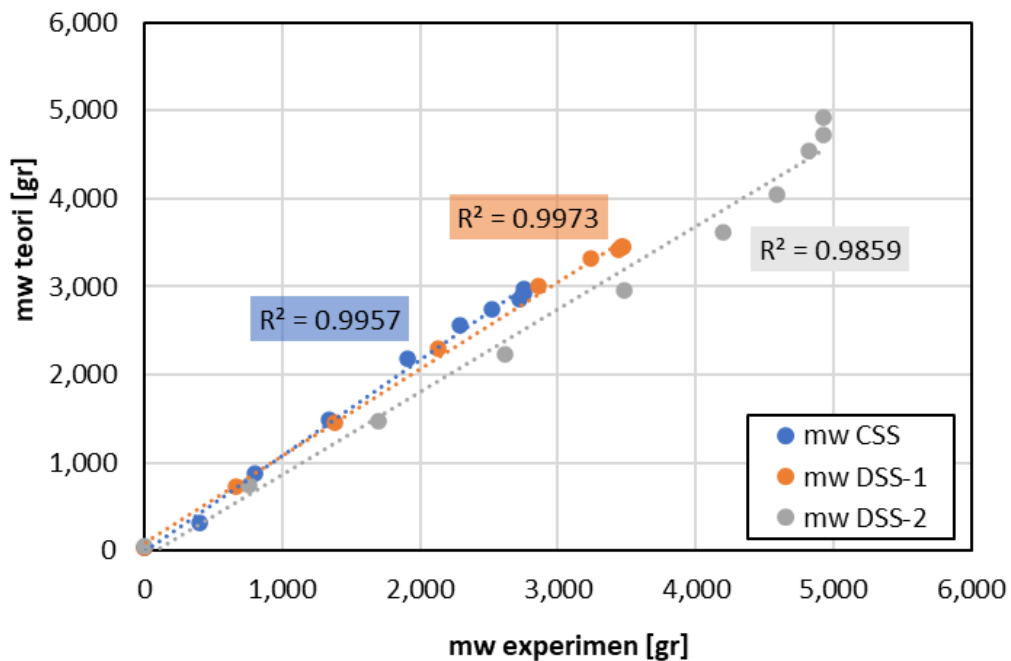
Tabel 4-3 nilai konstanta C dan n

	CSS		DSS-1		DSS-2	
	C	n	C	n	C	n
10/8/2019	0.4112	0.0010	0.0001	0.9704	0.9194	0.0984
10/9/2019	0.9196	0.0492	0.9175	0.0974	0.9175	0.0974
10/10/2019	0.9163	0.0499	0.9167	0.0896	0.9068	0.1731

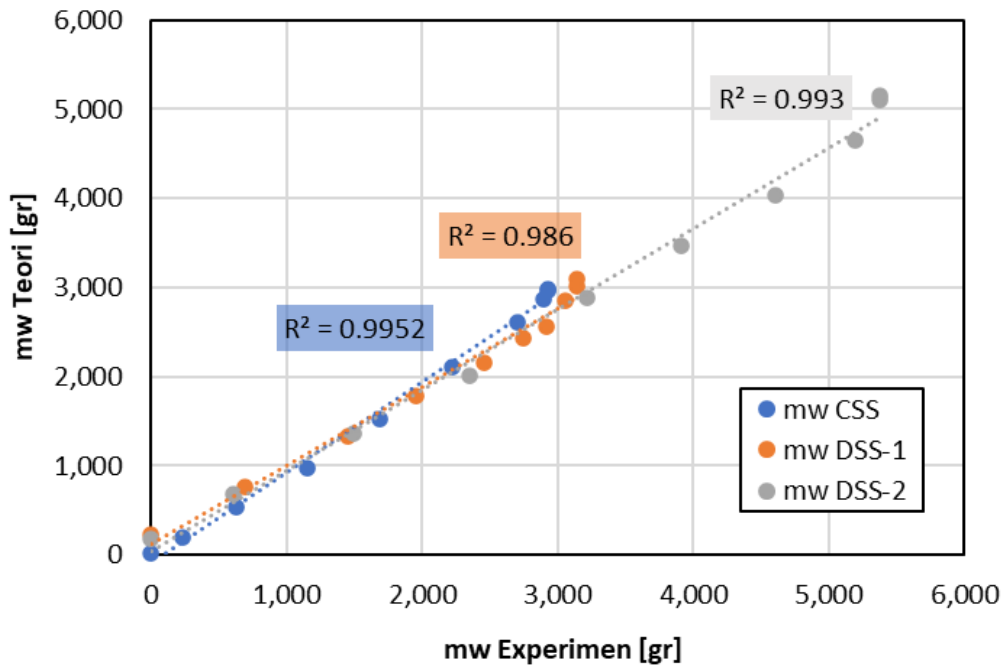
Setelah memperoleh nilai C dan n maka angka Nusselt dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan Nusselt-Rayleigh yang sekaligus digunakan untuk mendapatkan nilai koefisien perpindahan panas konveksi (Tsilingiris, 2015):

$$Nu = \frac{h_c \cdot d_f}{k_f} = C \cdot (G_r \cdot P_r)^n \quad (4.7)$$

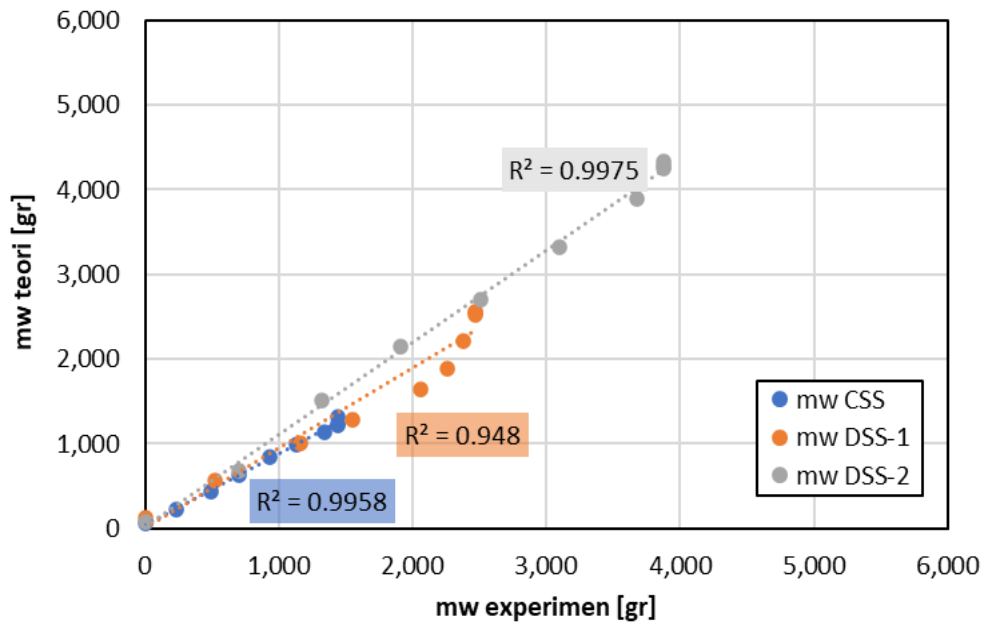
Dengan menggunakan hasil perhitungan koefisien konveksi tersebut maka nilai koefisien panas penguapan (h_c) dapat dihitung dan hasil air bersih dapat diprediksi yang selanjutnya dibandingkan dengan air hasil eksperimen seperti ditunjukkan pada Gambar 4-9 hingga 4-11.



Gambar 4-9 Koefisien determinasi massa air; Hari 1 Hasil eksperimen dan perhitungan, 8 Oktober 2019



Gambar 4-10 Koefisien determinasi massa air; Hari 2
 Hasil eksperimen dan perhitungan, 9 Oktober 2019



Gambar 4-11 Koefisien determinasi massa air; Hari 3
 Hasil eksperimen dan perhitungan, 10 Oktober 2019

	8-Oct-19			9-Oct-19			10-Oct-19		
	CSS	DSS-1	DSS-2	CSS	DSS-1	DSS-2	CSS	DSS-1	DSS-2
r	0.998	0.999	0.993	0.998	0.993	0.997	0.998	0.974	0.999
e	0.440	0.316	0.314	0.105	0.314	0.315	0.033	0.308	0.316

Gambar 4-9 hingga Gambar 4-11 menunjukkan bahwa massa air yang diperoleh eksperimen memiliki kesesuaian dengan massa air hasil perhitungan. Massa air hasil eksperimen di plot di sumbu horizontal sedangkan sedangkan massa air perhitungan diplotkan di sumbu vertical sehingga didapat titik hubungan keduanya yang membentuk trend untuk setiap *solar still* setiap hari. Trend yang terbentuk dari massa eksperimen dengan massa perhitungan dianalisa menggunakan regresi linier dan dihitung koefisien determinasi (R^2) untuk menentukan pengaruh variabel bebas terhadap variabel tidak bebasnya (Alessandro Di Bucchianico, 2008) atau kesesuaian data dengan regresinya (Barrett, 1974; Nagelkerke, 1991). Pada analisis ini yang menjadi variabel bebas adalah massa hasil eksperimen dan variabel tidak bebasnya adalah massa hasil perhitungan. Koefisien determinasi massa air hasil eksperimen dengan hasil perhitungan pada CSS berkisar pada 0.9952 – 0.9958, pada DSS-1 korelasi berada pada rentang 0.9480 – 0.9973 dan korelasi DSS-2 berada pada rentang 0.9929 – 0.9975 yang artinya variabel bebas ketiga jenis solar tersebut tersebut sangat berpengaruh terhadap variabel tidak bebasnya sehingga bisa dikatakan bahwa massa hasil perhitungan mendekati massa hasil eksperimen. Untuk memperkuat pernyataan ini, maka koefisien korelasi (r) dan *root mean square deviation* (e) atau perbedaan antara hasil eksperimen dengan hasil perhitungan yang diperkirakan menggunakan persamaan 3.9 hingga 3.11 dan ditunjukkan hasilnya pada Tabel 4-4.

Tabel 4-4 menunjukkan bahwa ketiga *solar still* memiliki Koefisien korelasi pada rentang 0,97 hingga 0,99 dengan *root mean square deviation* berada pada rentang 0,03 hingga 0,44. Hal itu menunjukkan bahwa massa hasil perhitungan memiliki korelasi yang sangat kuat dengan massa hasil eksperimen residu atau perbedaan data yang kecil sehingga bisa dinyatakan bahwa massa hasil perhitungan dapat digunakan untuk memperkirakan hasil eksperimen karena koefisien korelasi mendekati 1 menunjukkan hubungan yang sangat kuat (Rosyada et al., 2015) dan hasil perhitungan dapat dipergunakan untuk memprediksi hasil *solar still*. Lebih jauh lagi dengan menggunakan persamaan (3.12) maka ketidakpastian dihitung dengan menggunakan prosedur pada Holman (2011) berdasarkan Tabel 3-3 dan data pada jam 12.00 tanggal 9 Oktober 2019:

$$T_w = 47,8000 \pm 0,0009 \text{ } ^\circ\text{C}$$

sehingga di peroleh hfg menggunakan persamaan (2.13):

$$hfg = 2.379.975,27$$

$$hfg_{max} = 2.379.871,41 \text{ dan } hfg_{min} = 2.380.079,12$$

untuk memperoleh nilai perbandingan antara energi matahari yang masuk dengan air tawar yang dihasilkan maka menggunakan $\frac{m_w \cdot hfg}{I \cdot A \cdot 3600}$ dimana m_w dihitung dalam kg.

$$\text{Nilai perbandingan} = \frac{78,3 \cdot 2.379.975,27}{978 \cdot 0,09 \cdot 3600} = 0,5881$$

$$\text{Nilai Perbandingan}_{max} = \frac{78,35 \cdot 2.379.871,41}{987,78 \cdot 0,09 \cdot 3600} = 0,5826$$

$$\text{Nilai Perbandingan}_{min} = \frac{78,25 \cdot 2.380.079,12}{968,20 \cdot 0,09 \cdot 3600} = 0,5937$$

Data pada tanggal 8 – 10 Oktober 2019 dihitung dengan menggunakan prosedur yang sama dan kemudian dihitung angka ketidakpastian dengan menggunakan persamaan (3.12) sehingga diperoleh angka ketidakpastian CSS adalah $\pm 7,8\%$, DSS-1 adalah $\pm 5,4\%$ dan DSS-2 adalah $\pm 17,4\%$. Apabila dibandingkan dengan penelitian sejenis oleh peneliti terdahulu maka ketidakpastian pada penelitian ini tidak jauh berbeda karena pada penelitian lain ketidakpastian internal berkisar antara $\pm 3,6\%$ (ben Halima et al., 2016) hingga $\pm 19\%$ (Kumar & Tiwari, 1996) dan disarankan ketidakpastian penelitian tidak melebihi 25% (Holman, 2010b)

4.1.3 Efisiensi *Solar still*

Efisiensi termal *solar still* tergantung pada akumulasi hasil harian, intensitas matahari harian, panas laten penguapan dan luas permukaan area pengembunan. Secara matematis itu dinyatakan pada persamaan (4.8) (Muthu Manokar et al., 2020) dimana massa air dikalikan dengan panas laten penguapan kemudian dijumlahkan demikian pula dengan energi matahari yang masuk. Hasil perhitungan efisiensi ditunjukkan di table 4-5:

$$\eta = \frac{\sum m_w \cdot hfg}{\sum I \cdot A \cdot 3600} \times 100\% \quad (4.8)$$

Tabel 4-5 Efisiensi *solar still*
(Hasil perhitungan tanggal 10 Oktober 2019 disisihkan karena kondisi yang tidak sebanding)

	η [%]		
	CSS	DSS-1	DSS-2
8-Oct-19	23.7%	36.2%	45.4%
9-Oct-19	22.4%	36.0%	46.4%
10-Oct-19	15.9%	37.2%	47.2%

Rerata	23.0%	36.5%	46.4%
--------	-------	-------	-------

Effisiensi *solar still* yang menggunakan kondensor yang terintegrasi lebih tinggi dari pada *solar still* konvensional (CSS) sebagaimana yang ditampilkan pada tabel 4-5. *Solar still* yang terintegrasi dengan kondensor DSS-2 tercatat memiliki efisiensi tertinggi sebesar 47,2% dan rata-ratanya adalah 46,4%. Akan tetapi karena kondisi matahari pada tanggal 10 Oktober 2019 lebih rendah dibandingkan dua hari sebelumnya maka efisiensi pada tanggal tersebut hanya dicantumkan tetapi tidak dimasukkan dalam perhitungan rata-rata. Apabila dibandingkan dengan penelitian *solar still* yang menggunakan kondensor baik terintegrasi ataupun terpisah (Tabel 4-6) maka DSS-2 memiliki efisiensi tinggi. Meskipun rata-rata efisiensi masih lebih rendah 0,5% dibandingkan yang tertinggi tetapi efisiensi tertinggi DSS-2 lebih tinggi dibandingkan hasil eksperimental lainnya kecuali jika dibandingkan dengan hasil penelitian numerik, efisiensi DSS-2 masih lebih rendah.

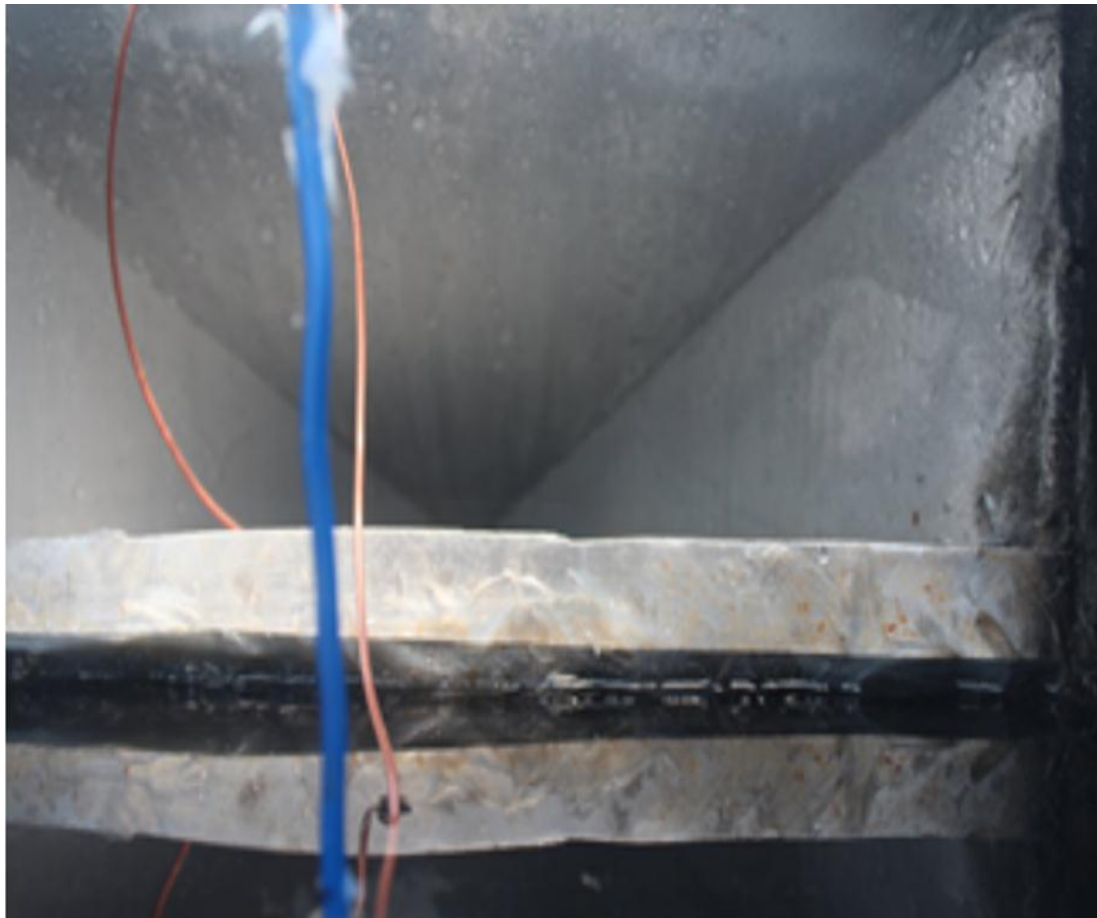
Tabel 4-6 Efisiensi DSS-2 dibandingkan hasil penelitian *solar still* dengan kondensor

No	Judul	Efisiensi	Referensi
1	stepped <i>solar still</i> integrated with a passive external condenser	12.20%	(Sivaram et al., 2020)
2	active single slope <i>solar still</i> with condenser	19.40%	(Hassan, Yousef, et al., 2020)
3	Enhanced <i>solar still</i> condensation by using a radiative cooling system and phase change material	30.70%	(Amarloo & Shafii, 2019)
4	Theoretical Modelling for Experimental Study of <i>Solar still</i> with Integrated Built-in Condenser	33.40%	(Ibrahim & Ahmed, 2018)
6	Impact of salty water medium and condenser on the performance of single acting <i>solar still</i> incorporated with parabolic trough collector	41.95%	(Hassan, Ahmed, et al., 2020)
7	A naturally circulated humidifying/ dehumidifying <i>solar still</i> with a built-in passive condenser	42.00%	(Fath et al., 2004)
8	<i>solar stills</i> connected to passive external condensers	42.90%	(Husham, 2012)

9	An experimental approach to improve the basin type <i>solar still</i> using an integrated natural circulation loop	45.15%	(Rahmani et al., 2015)
10	Numerical investigation of modified <i>solar still</i> using nanofluids and external condenser	46.23%	(Kabeel, Omara, & Essa, 2017)
11	DSS-2	46.40%	
12	<i>Solar still</i> using an external condenser	47.00%	(Abu-Qudais et al., 1996)
13	Numerical study of a passive <i>solar still</i> with separate condenser	52.00%	(Madhlopa & Johnstone, 2009)
14	A numerical study on the effect of the heat sink as condenser on the performance of passive <i>solar still</i>	61.72%	(Elbar et al., 2018)

4.1.4 Efektifitas kondensor

Efektifitas kondensor perlu untuk diketahui karena peningkatan produktifitas *solar still* dalam penelitian sangat dipengaruhi oleh kondensor. Proses kondensasi di *solar still* yang digunakan untuk penelitian ini terjadi seluruhnya di kondensor dan secara visual tampak adanya pengembunan di dinding kondensor sebagaimana ditunjukkan di Gambar 4-12.



Gambar 4-12 Pengembunan di area kondensasi

Gambar 4-12 diambil dari sisi luar kaca penutup atas ruang penguapan sehingga apabila ada pengembunan pada kaca penutup maka akan tampak secara visual. Hasil foto menunjukkan bahwa kaca penutup bersih dari kondensasi sehingga kaca terlihat jernih dan pengembunan tampak dengan jelas terjadi di dinding kondensor. Kondensasi terjadi di dinding kondensor karena uap yang bergerak secara alami menyentuh dinding kondensor. Meski demikian perlu dilakukan pengukuran untuk membuktikan tidak terjadi kebocoran. Oleh karena itu kesetimbangan antara air yang masuk ke dalam *solar still* dengan air yang dihasilkannya diukur dan dibandingkan. Air yang masuk ke dalam *solar still* (m_{in}) diperoleh dengan menimbang bak penampung air laut di awal dan di akhir penelitian setiap hari. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa hasil air yang masuk ke dalam *solar still* sebanding dengan air yang dihasilkan seperti pada Tabel 4-7.

Tabel 4-7 Kestimbangan air untuk CSS, DSS-1 dan DSS-2

	CSS		DSS-1			DSS-2			
	m_{al} [gr]	m_w [gr]		m_{al} [gr]	m_w [gr]		m_{al} [gr]	m_w [gr]	
8 Okt 2019	350	330	94.3%	298	312	104.7%	450	443	98.4%
9 Okt 2019	345	351	101.7%	290	283	97.6%	501	483	96.5%
10 Okt 2019	167	173	103.6%	226	222	98.2%	325	349	107.4%
			99.9%			100.2%			100.8%

Kestimbangan tidak menunjukkan efisiensi maupun efektifitas kondensor tetapi hanya menunjukkan bahwa air yang masuk setimbang dengan air yang dihasilkan sehingga dapat disimpulkan tidak terjadi kebocoran. Efektivitas kondensor diukur menggunakan persamaan 2.30 dan 2.31 dengan asumsi evaporasi yang terjadi di dalam *solar still* sebanding dengan massa air yang keluar sehingga massa air yang digunakan di dalam perhitungan ini adalah massa air teoritis. Pada persamaan (2-31) yaitu $q_h = \dot{m}_v \cdot h_{fg}$, nilai \dot{m}_v diperoleh dengan terlebih dahulu menghitung koefisien konveksi air ke dinding kondensor (h_c) berdasarkan nilai C dan n pada tabel 4-3 dan dihitung menggunakan persamaan 4.2. Koefisien konveksi air ke dinding kondensor digunakan untuk menghitung koefisien evaporasi (h_e) dan massa menggunakan persamaan 2.11. Massa air (m_w) yang dihasilkan oleh *solar still* secara teoritis disamakan dengan massa uap hasil penguapan karena diasumsikan semua uap air di dalam *solar still* berubah fasanya kembali menjadi air (Elango et al., 2015).

Berdasarkan asumsi di atas maka digunakan $m_w = \dot{m}_v$ karena perhitungan massa air yang dihasilkan dilakukan berdasarkan pengambilan dalam waktu 1 jam. Perhitungan berikut ini menggunakan data tangga 9 Oktober 2019 jam 12.00, dimana:

$$\dot{m}_v = 857.23 \text{ gr per jam per m}^2 \text{ atau } 0,000238 \text{ kg/det.}$$

$$h_{fg} = 2.379.975,27 \text{ J/kg. (Persamaan 2.13)}$$

sehingga diperoleh

$$q_h = 51, 27 \text{ J/det.}$$

Sementara untuk menghitung kalor yang dilepaskan oleh pengembunan dan diterima oleh air pendingin dihitung menggunakan persamaan 2.30. Air pendingin kondensor di alirkan dengan debit 16.65 liter/jam atau 0.004720923 kg/det sedangkan Cp air adalah 4.003 KJ/kg.°C.

Temperatur air pendingin masuk (T_{pi}) ke kondensor di jaga pada rentang 30 ± 1 °C dan pada jam 12.00 temperatur $T_{pi} = 30,8$ °C dan temperatur air keluarnya (T_{po}) adalah $33,3$ °C sehingga diperoleh $q_h = 47,24$ J/det. Temperatur air pendingin masuk dan keluar kondensor dapat dilihat pada Tabel 4-8.

Tabel 4-8 Temperatur masuk (Tc-i) dan keluar (Tc-o) kondensor pada DSS-1 dan DSS-2

Jam	8 Okt 2019				9 Okt 2019				10 Okt 2019			
	Tc DSS-1		Tc DSS-2		Tc DSS-1		Tc DSS-2		Tc DSS-1		Tc DSS-2	
	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
8	30.4	30.4	30.2	30.3	30.2	30.4	30.2	30.3	30.2	30.6	30.3	30.8
9	30.3	32.0	30.3	32.3	30.4	31.9	30.3	31.7	30.5	31.3	30.3	31.9
10	30.4	32.4	30.4	32.5	30.5	32.2	30.4	32.3	30.5	31.8	30.6	32.8
11	30.4	32.8	30.4	32.6	30.5	31.8	30.7	32.6	30.5	31.4	30.6	32.6
12	30.5	32.7	30.4	32.5	30.4	31.5	30.8	33.3	30.5	31.5	30.6	32.3
13	30.6	31.5	30.5	32.3	30.3	31.1	30.8	32.6	30.5	31.2	30.4	32.2
14	30.5	30.8	30.5	31.8	30.5	30.9	30.9	32.6	30.3	31.3	30.4	32.1
15	30.4	30.5	30.4	31.8	30.3	30.9	30.7	32.6	30.3	31.2	30.4	32.1
16	30.3	30.3	30.4	31.0	30.2	30.5	30.6	31.9	30.3	30.3	30.2	30.3
17	30.3	30.3	30.4	30.6	30.0	29.8	30.3	30.5	30.3	30.3	30.1	30.0

Dengan menggunakan metode yang sama maka dapat diperoleh efektifitas setiap jam dan dibuat rata-rata setiap hari untuk setiap *solar still*. Efektifitas rata-rata kondensor DSS-2 pada tanggal 9 Oktober 2019 adalah 92,46%. Perhitungan efektifitas kondensor pada DSS-1 dan DSS-2 dapat dilihat pada Tabel 4-9 dan dibandingkan dengan efektifitas kondensor pada CSS yang dalam hal ini adalah kaca penutup *solar still*.

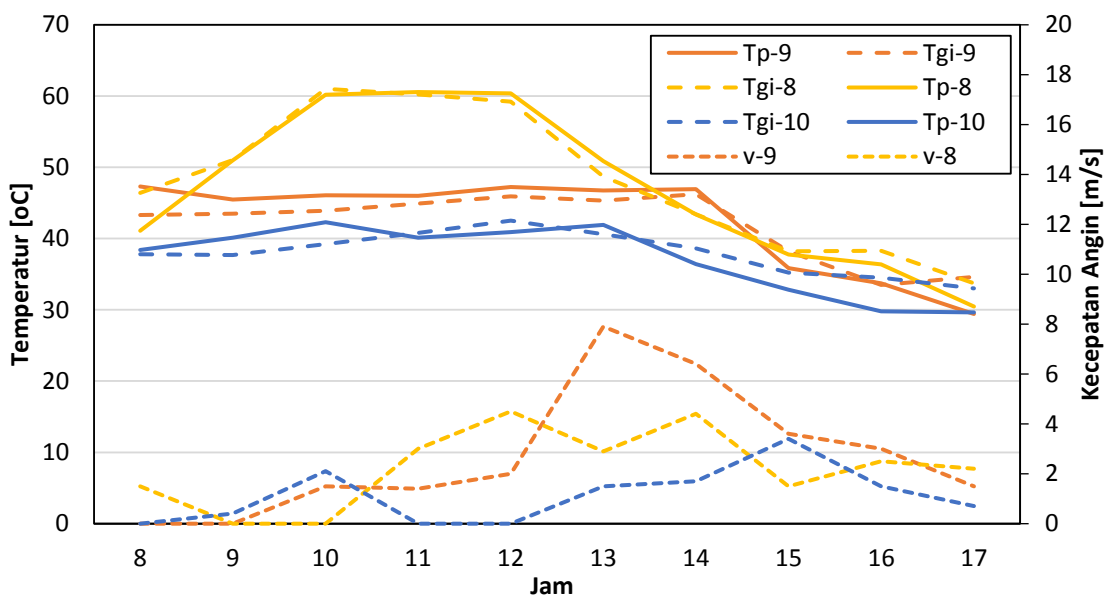
Tabel 4-9 Efektivitas kondensor untuk CSS, DSS-1 dan DSS-2

	CSS	DSS-1	DSS-2
8 Okt 2019	10.77%	88.18%	91.09%
9 Okt 2019	21.19%	84.24%	92.46%
10 Okt 2019	27.76%	84.29%	90.20%
	19.91%	85.57%	91.25%

Efektivitas kondensor CSS yang juga merupakan kaca penutup *solar still* hanya berkisar di angka 20%. Perhitungan menggunakan perbedaan temperatur karena meskipun perbedaan temperatur air dengan sisi kaca bagian dalam yang mencapai $12,6$ °C tidak selalu diikuti dengan

kondensasi pada kaca penutup atas. Kondensasi pada kaca penutup *solar still* sangat dipengaruhi oleh faktor eksternal yaitu kecepatan angin seperti yang ditampilkan pada Gambar 4-13.

Pada Gambar 4-13 menjelaskan pengaruh kecepatan angin terhadap temperatur penutup atas dan mempengaruhi pengembunan. Tampak bahwa kecepatan angin bervariasi mulai 0 hingga 6 m/s sehingga massa air yang dihasilkan juga terpengaruh. Temperatur pada *solar still* dipengaruhi oleh radiasi matahari dan berpengaruh terhadap penguapan tetapi perubahan uap air kembali menjadi air dipengaruhi oleh temperatur pengembunan dan kecepatan angin yang mempengaruhi temperatur kaca penutup sehingga apabila kecepatan angin meningkat maka temperatur sisi dalam kaca penutup atas akan turun di bawah temperatur pengembunan sehingga



Gambar 4-13 Temperatur sisi dalam penutup atas (Tgi), titik embun (Tp) dan kecepatan angin. Temperatur pengembunan (Tp) dan kecepatan angin dalam m/s (v). Angka 8, 9 dan 10 menunjukkan tanggal pengambilan data pada Oktober 2019.

terjadi kondensasi (El-Sebaai, 2000)

Hal ini menjelaskan mengapa efektifitas kondensor pada CSS yang dalam hal ini adalah sisi dalam kaca penutup atasnya hanya 20%. Pengaruh angin pada *solar still* tidak terjadi pada DSS-1 dan DSS-2 karena kedua *solar still* menggunakan kaca penutup ganda sehingga uap air yang terbentuk di ruang penguapan tidak mengalami kondensasi dan mengalir ke arah kondensor.

Proses penguapan di dalam ruang penguapan *solar still* akan meningkatkan kelembaban relatif di dalam sistim *solar still*. Kelembaban relatif di dalam sistim *solar still* berada pada rentang 55% hingga 100% (Ahsan & Fukuhara, 2010; Boukhriss et al., 2013; Mahmood & Al-Ansari, 2022) sedangkan di dalam penelitian ini kelembaban relatifnya berada di rentang 62% hingga 90%. Aliran uap yang memasuki kondensor dan bersentuhan dengan dinding kondensor akan mengembun apabila temperatur dinding kondensor lebih rendah daripada temperatur embun uap. Temperatur kondensor dihitung dari hasil pengukuran temperatur air masuk dan keluar kondensor dengan menggunakan persamaan (Holman, 2010a):

$$T_c = \frac{T_{pi} + T_{po}}{2} \quad (4.9)$$

Temperatur embun uap (T_p) air dapat diprediksi dengan menggunakan persamaan (Lawrence, 2005):

$$T_p = T_{uc} \left[1 - \frac{T_{uc} \cdot \ln\left(\frac{RH}{100}\right)}{Hfg/R} \right]^{-1} \quad (4.10)$$

Dimana:

T_p = Temperatur embun uap (K)

T_{uc} = Temperatur uap di kondensor (K)

RH = Kelembaban relatif (%)

R = Konstanta gas untuk uap air ($461,5 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)

L = Enthalpy penguapan ($2.501 \times 10^6 \text{ J/kg}$ pada 273,15 K dan 2.257×10^6 pada 373.15 K)

Hasil perhitungan temperatur embun yang ditampilkan di Tabel 4-10 menunjukkan bahwa temperatur kondensor dapat dikatakan lebih rendah daripada temperatur embun kecuali pada beberapa point saja saat jam 8 pagi ketika penelitian dimulai dimana temperatur kondensor lebih tinggi dari pada temperatur embun. Hal tersebut disebabkan penguapan mulai terjadi sehingga kelembaban relatif belum tinggi (Data RH dapat dilihat pada Tabel LAMPIRAN-2 hingga Tabel LAMPIRAN-9).

Tabel 4-10 Temperatur kondensor dan embun uap untuk CSS, DSS-1 dan DSS-2

Jam	8 Okt 2019				9 Okt 2019				10 Okt 2019			
	DSS-1		DSS-2		DSS-1		DSS-2		DSS-1		DSS-2	
	Tc	Tp	Tc	Tp	Tc	Tp	Tc	Tp	Tc	Tp	Tc	Tp
8	30.4	31.2	30.2	29.9	30.3	26.1	30.3	27.4	30.4	27.1	30.6	31.1
9	31.1	35.3	31.3	33.3	31.2	31.7	31.0	32.7	30.9	32.9	31.1	34.5
10	31.4	35.7	31.5	32.9	31.4	31.7	31.4	33.5	31.2	34.0	31.7	34.4
11	31.6	37.5	31.5	32.2	31.2	34.0	31.7	33.1	31.0	33.8	31.6	34.8
12	31.6	38.0	31.5	31.6	31.0	33.8	32.1	33.1	31.0	34.0	31.5	33.5

13	31.1	37.6	31.4	31.2	30.7	32.4	31.7	33.3	30.9	32.5	31.3	33.4
14	30.7	36.3	31.2	31.4	30.7	32.0	31.8	33.0	30.8	31.4	31.3	32.6
15	30.4	36.0	31.1	31.9	30.6	31.4	31.7	32.8	30.7	31.2	31.3	32.8
16	30.3	35.1	30.7	30.5	30.4	31.3	31.3	33.0	30.3	30.8	30.3	31.5
17	30.3	32.2	30.5	31.0	29.9	31.5	30.4	32.5	30.3	30.7	30.1	30.7

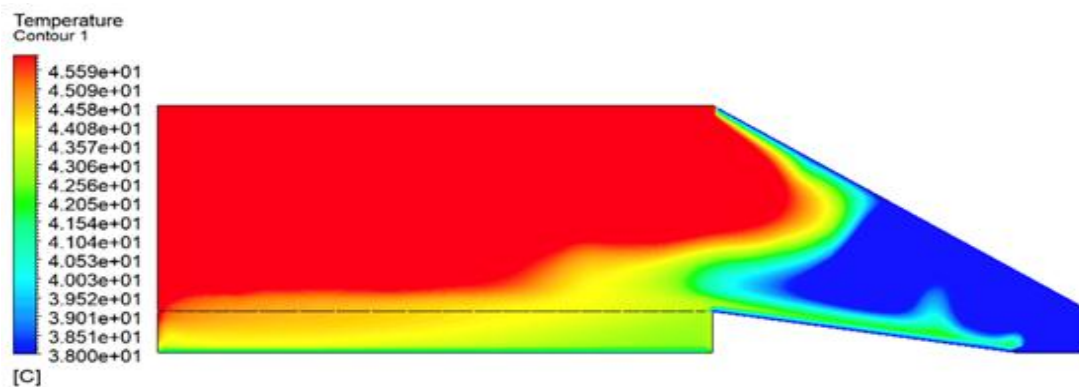
4.2 Hasil Simulasi CFD

Efisiensi tinggi yang diperoleh DSS-2 tidak lepas dari bentuk kondensornya yang mengerucut semakin kecil di arah keluar. Bentuk kondensor yang mengerucut semakin kecil di arah keluarnya air tawar memaksa uap air bersentuhan dengan dinding kondensor sehingga terjadi kondensasi. Untuk memastikan hasil simulasi dapat merepresentasikan hasil penelitian maka dilakukan validasi pada temperatur signifikan yang ditampilkan pada Tabel 4-11.

Tabel 4-11 Validasi simulasi CFD

	T_w [°C]	T_b [°C]	T_{gi} [°C]	T_c [°C]
Eksperimen	47.8	41.1	48.0	40.7
Simulasi	46.09	41.54	46.09	38.0
Perbedaan	3.58%	1.07%	3.98%	6.63%

Hasil simulasi dapat dilihat dari kontur temperatur di dalam DSS-2 di Gambar 4-14.

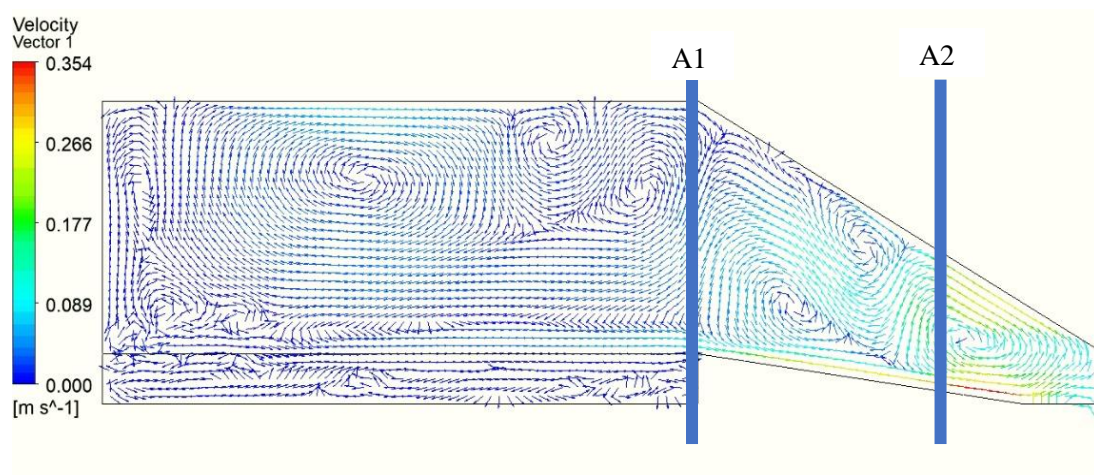


Gambar 4-14 Kontur temperatur di DSS-2

Kontur temperatur di dalam DSS-2, seperti yang ditampilkan pada Gambar 4-14, menunjukkan bahwa temperatur di area penguapan di atas air merupakan area dengan temperatur tertinggi di *solar still*. Hasil simulasi sesuai dengan eksperimen pada penelitian ini dan sejalan dengan penelitian sejenis lainnya (Hansen et al., 2015; Kumar et al., 2016; Morad et al., 2017; Ouar et al., 2017; Reddy & Sharon, 2016; Sivaram et al., 2021). Mulai di atas permukaan air hingga kaca penutup dalam. Kaca penutup DSS-2 menggunakan dua lapis kaca yang memiliki celah sebesar 3 mm. Uap air yang terbentuk karena penguapan air

terakumulasi di area penguapan sehingga tekanan dan temperaturnya naik. Kondensasi di *solar still* konvensional yang biasanya terjadi pada sisi bagian dalam kaca penutup tidak terjadi pada kaca penutup ganda karena panas di sisi bagian dalam bergerak ke sisi luar secara lambat karena tidak dipengaruhi pendinginan oleh angin dan menyebabkan temperatur sisi dalam kaca naik menjadi di atas temperatur pengembunan sehingga tidak terjadi kondensasi (Boutriaa & Rahmani, 2017). Karena tidak terjadi pengembunan maka tekanan uap air di area penguapan semakin meningkat dan akhirnya akan bergerak menuju tekanan yang lebih rendah. Meski demikian tekanan di dalam ruang penguapan juga membentuk lapisan tekanan sebagaimana tekanan di udara bebas. Meskipun pada awalnya ada gaya buoyancy sehingga uap air naik ke atas tetapi setelah mengalami kejenuhan maka uap air membentuk lapisan.

Seperti yang telah disampaikan di atas bahwa tekanan uap air terbesar berada di dasar dan itu berarti tepat di atas permukaan air tetapi tekanannya lebih rendah dibandingkan tekanan air di permukaan oleh karena itu penguapan terus terjadi karena ada selisih tekanan di permukaan air dengan ruang di atasnya (El-Bahi & Inan, 1999). Penguapan yang terus berlangsung akan mendesak uap air yang ada di ruang penguapan untuk bergerak menuju kondensor meskipun tidak secara langsung sebagaimana yang dapat dilihat pada Gambar 4-15.



Gambar 4-15 Kontur arah kecepatan uap DSS-2

Kontur arah dan kecepatan uap pada Gambar 4-15 menunjukkan bahwa uap bergerak dari area penguapan menuju kondensor tanpa ada perubahan kecepatan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa aliran uap masuk dengan mudah dan tidak ada gangguan pada saat memasuki kondensor yang memiliki luas penampang yang sama dengan ruang penguapan. Perubahan kecepatan terjadi setelah ukuran kondensor mulai mengecil. Aliran uap air tampak bergerak masuk ke dalam kondensor dan membentuk aliran berputar atau vortex yang kemudian mengarah ke lubang keluar sedangkan uap di atas di atas permukaan air, karena tekanan di regim itu lebih tinggi dibandingkan di atasnya, uap langsung bergerak menuju kondensor dan

mengarah ke saluran keluar. Aliran uap yang masuk ke kondensor terlihat mengalami penambahan kecepatan. Penambahan kecepatan terjadi dikarenakan luas penampang kondensor semakin mengecil. Kecepatan uap air ketika mendekati saluran keluar dapat didekati dengan persamaan:

$$v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad (4.11)$$

Uap memasuki kondensor yang semula memiliki luas penampang (A_1) 39.000 mm² dengan kecepatan (v_1) 3.141 x 10⁻² m/s dan kemudian bertambah cepat (v_2) menjadi 4.08 x 10⁻¹ karena luas penampang kondensor mengecil (A_2) menjadi 3.000 mm². Meskipun kecepatan uap bertambah cepat tetapi gerakannya tetap berputar sehingga menyentuh dinding kondensor dan berpengaruh terhadap efektifitas kondensor.

Tabel 4-12 Uap yang keluar melalui saluran kondensat

Fluida (kg/s)	massa (gr)
Cairan	3.89E-02
Uap	5.79E-05

Seperti ditampilkan pada tabel 4-9 efektifitas kondensor pada DSS-1 dan DSS-2 mencapai 85,57% dan 91,25% dan hal ini sejalan dengan simulasi yang hasilnya dapat dilihat pada tabel 4-12.

Berdasarkan hasil pada tabel 4-12, maka dapat diketahui bahwa sejumlah besar uap yang dihasilkan dari proses penguapan di dalam *solar still* menyentuh dinding kondensor sehingga berubah fasa menjadi cair dengan efektifitas sebesar 99,85%. Luas kondensor mempengaruhi efektifitasnya (Rahmani & Boutriaa, 2017) dan bentuknya yang mengerucut menjadi kecil di bagian ujungnya memaksa uap air untuk menyentuh dinding kondensor. Hasil eksperimen dan simulasi menunjukkan bahwa bentuk kondensor mengerucut yang digunakan pada DSS-1 dan DSS-2 terbukti efektif.

4.3 Pertimbangan Finansial

Solar still adalah salah satu metode yang paling banyak digunakan (Tabrizi et al., 2010) untuk memperoleh air bersih karena merupakan perangkat sederhana yang bekerja berdasarkan efek rumah kaca (Kalogirou, 2004) dan efektif untuk memenuhi kebutuhan air bersih (Fritzmman et al., 2007) Meskipun *solar still* belum banyak digunakan produktivitasnya yang masih rendah (Arunkumar et al., 2013) akan tetapi WHO memprediksikan 1,6 Miliar populasi dunia tidak

memiliki akses untuk mendapatkan air bersih pada 2030 (UNICEF, 2021) sehingga penelitian untuk menghasilkan air bersih melalui proses desalinasi terus berkembang.

Desalinasi menggunakan *solar still* melibatkan beberapa jenis biaya untuk waktu yang lama sehingga memerlukan perhitungan keekonomisan (Papapetrou et al., 2017) dengan menggunakan metode yang telah digunakan oleh beberapa penelitian terdahulu (Fath et al., 2003; Goosen et al., 2000; Kumar & Tiwari, 2009; Rahbar & Esfahani, 2012). Beberapa asumsi yang digunakan pada perhitungan ekonomi *solar still*. Nilai sisa (S) digunakan 20% dari investasi awal sedangkan perawatannya adalah 15% dari nilai awal tahunan (AFC) seperti yang ditampilkan pada tabel 4-13:

Tabel 4-13 Analisa ekonomi untuk *solar still*

Metode	Rumus
Capital Recovery Factor	$CRF = \frac{i \cdot (1 + i)^n}{[(1 + i)^n - 1]}$
Annual First Cost	$AFC = P \cdot CRF$
Sinking Fund Factor	$SFF = \frac{i}{[(1 + i)^n - 1]}$
Salvage Value	$S = 20\% \cdot P$
Annual Salvage Value	$ASV = S \cdot SFF$
Annual Maintenance Cost	$AMC = 15\% \cdot AFC$
Annual Cost	$AC = AFC + AMC - ASV$

Solar still pada penelitian ini menggunakan bahan alumunium yang harga tinggi apabila dibandingkan bahan lain seperti besi maupun kayu. Penggunaan alumunium dalam penelitian karena mempertimbangkan konduktifitas termal nya yang tinggi. Bahan yang digunakan untuk membuat *solar still* pada penelitian ini adalah Alumunium 3mm, kaca 3mm, insulator, sealent dan cat pelapis. Alumunium yang digunakan untuk membuat CSS, DSS-1 dan DSS-2 masing masing adalah 0,57, 0,43 dan 0,50 m² sedangkan luas kaca yang digunakan adalah 0,17, 0,20, dan 0,31 untuk CSS, DSS-1 dan DSS-2. Apabila digabungkan dengan biaya-biaya untuk bahan lain dan proses pembuatan maka investasi awal *solar still* sebagaimana pada tabel 4-14.

Tabel 4-14 Biaya/liter CSS, DSS-1 dan DSS-2

	CSS	DSS-1	DSS-2
Investasi Awal (P)	\$ 136.42	\$ 135.39	\$ 147.20
Tingkat suku bunga (i)	3.50%		
Tahun (n)	10		
Produksi, lt/tahun	865.90	1104.5	1724.3
Rp/ liter	Rp 274.5	Rp 211.3	Rp 146.0
\$/liter	\$ 0.019	\$ 0.015	\$ 0.01

Tabel 4-14 memberikan informasi besarnya investasi awal untuk CSS, DSS-1 dan DSS-2. Tingkat suku bunga di Indonesia pada tahun 2021 adalah 3,5% dengan perkiraan umur pakai

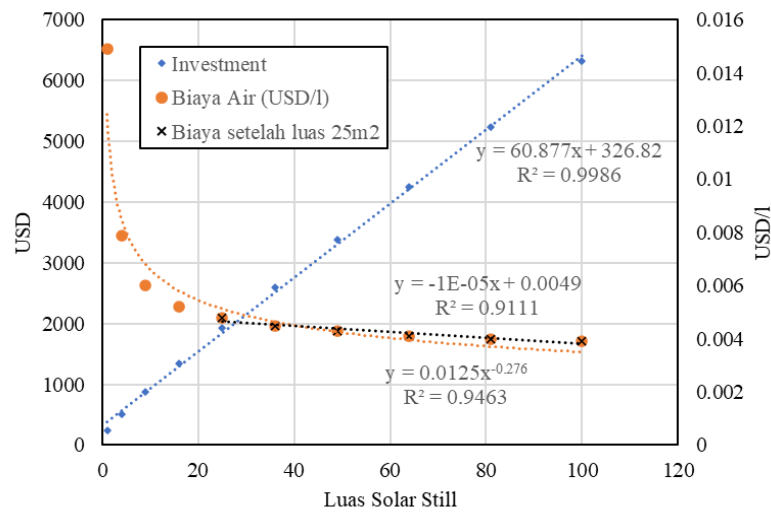
alat selama 10 tahun sehingga diperoleh biaya air per liter. Apabila dibandingkan dengan biaya air dengan PDAM di Indonesia yang hanya dikisaran Rp 1,05 per liter (*PAM JAYA*, 2021) maka biaya air yang dihasilkan *solar still* masih jauh lebih tinggi. Akan tetapi apabila dibandingkan dengan harga air di pesisir kalimantan yang bisa mencapai Rp 500 per liter (Ananda, 2017) maka biaya air yang dihasilkan *solar still* masih lebih rendah. Apabila dibandingkan dengan biaya air penelitian-penelitian yang telah dilakukan terdahulu yang memiliki rentang antara \$ 0,010 - \$ 0.3570 (Tabel 4-15) maka biaya *solar still* DSS-2 masih berada di batas bawah yaitu \$ 0,010 per liter.

Tabel 4-15 Perbandingan Biaya/liter DSS-2 dengan peneliti lain

Jenis <i>Solar still</i>	Biaya/liter (USD/L)	Keterangan
Solar Distillation Unit	0.0174	(Govind & Tiwari, 1984)
<i>Solar still</i> with spherical ball heat storage still using agitation effect and external condenser	0.0100	(Kumar et al., 2016)
	0.0900	(Kumar et al., 2016)
Nanopartikel dalam <i>Solar still</i>	0.3570	(Kabeel, Omara, Essa, et al., 2017)
Partitioning of <i>solar still</i>	0.0100	(Rashidi et al., 2017)
Stepped <i>Solar still</i>	0.0100	(Rashidi et al., 2017)
Mutiple v-shaped floating wick	0.0252	(Agrawal & Rana, 2019)
<i>Solar still</i> with basalt stone	0.0170	(Mohamed et al., 2019b)
Hemispherical	0.0170	(Seyednezhad et al., 2020)
MSS+PTC+Wire mesh	0.0190	(Hassan, Ahmed, et al., 2020)

Meskipun biaya air yang dihasilkan DSS-2 berada di batas bawah apabila dibandingkan dengan *solar still* dari peneliti lain, biaya air di kepulauan Indonesia masih dibawah \$ 0,010 per liter oleh karena itu perlu dilakukan upaya untuk menurunkan biayanya, salah satunya dengan menentukan ukuran *solar still* yang memiliki biaya paling efektif. Dengan menggunakan hasil pengambilan data dan perhitungan sebelumnya, massa air yang dihasilkan *solar still* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (Tiwari & Tiwari, 2005):

$$m_w = \frac{\dot{q}_e \cdot A \cdot t}{h_{fg}} \quad (4.12)$$



Gambar 4-16 Luas *solar still* terhadap: Biaya investasi (USD) dan harga air (USD/l)

Hasil perhitungan menggunakan persamaan (4-12) dan digabungkan dengan perhitungan ekonomi untuk memperbesar luas *solar still* di peroleh hasil sebagai mana di ditampilkan pada Gambar 4-16. Pada perhitungan yang digunakan sebagai basis perhitungan adalah DSS-2. Perubahan dimensi dilakukan pada ruang penguapan karena terkena langsung sinar matahari dan dimensi bagian bagian yang terikut sedangkan tinggi *solar still* tetap. Pada Gambar 4-16 tampak bahwa biaya investasi meningkat seiring dengan penambahan luas *solar still* dengan persamaan $Y = 60,88 \cdot x + 326,82$ sementara biaya produksi air menurun seiring dengan penambahan luas *solar still* yang artinya penambahan produksi lebih besar dari pada penambahan biaya investasi. Meskipun biaya air terus menurun dengan naiknya penambahan luas *solar still*, perbandingannya dengan biaya investasi yang dikeluarkan karena penurunan biaya air mengikuti persamaan $Y = 0,1028 \cdot x^{-0,276}$ yang semakin lama penurunan biayanya semakin kecil. Oleh karena itu dengan mempertimbangkan selisih biaya air rasio pada setiap penambahan luas *solar still* dan penambahan biaya investasi maka luas *solar still* 25 m² menjadi pilihan yang terbaik karena biayanya turun menjadi 0,0048 USD/l dan pada penambahan luas berikutnya penurunan biaya menjadi linier mengikuti persamaan $Y = -1 \times 10^{-5} \cdot x + 0,0049$ dan menjadi tidak signifikan apabila dibandingkan dengan kenaikan investasi.

Agar biaya air dapat diturunkan di bawah Rp 32.000/ m³ atau 0,0022 USD/l maka beberapa bagian harus diganti dengan material lain yang lebih murah, salah satunya dengan menggunakan kayu (Hassan, Ahmed, et al., 2020) dan umur *solar still* diperpanjang menjadi 15 tahun.

Tabel 4-16 Biaya/liter *solar still* dengan material kayu

Investasi Awal (P)	\$ 834.00
Tingkat suku bunga (<i>i</i>)	3.50%
Tahun (<i>n</i>)	15
Produksi, lt/tahun	49001.74
Rp/ liter	Rp 21.89
\$/liter	\$ 0.0015

Dengan menggunakan material kayu maka biaya air dapat dikurangi menjadi 0,0015 USD/l atau 21,89 Rupiah per liter sebagaimana dapat dilihat pada tabel 4-16. Harga tersebut menjadi lebih ekonomis apabila dibandingkan dengan harga yang berlaku di kepulauan seribu, Jakarta Utara .

BAB 5 KESIMPULAN, IMPLIKASI DAN SARAN

A. Kesimpulan

Penelitian untuk memperoleh air bersih dengan menguapkan air laut dan mengembunkannya kembali telah dilaksanakan dengan menggunakan tiga jenis *solar still* dan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil yang diperoleh DSS-1 dan DSS-2 secara berurutan lebih 1,17 kali dan 1,81 kali apabila dibandingkan dengan *solar still* konvensional atau CSS. Apabila dibandingkan dengan hasil penelitian sejenis maka *solar still* dengan dua preheater (DSS-2) memiliki efisiensi yang cukup tinggi hingga mencapai 46,4% sedangkan efisiensi CSS dan DSS-1 adalah 23% dan 36,5%. Peningkatan produktifitas DSS-1 dan DSS-2 sangat dipengaruhi oleh bentuk kondensor yang terintegrasi pada kedua *solar still* tersebut.
2. Efektifitas kondensor yang digunakan pada *solar still* DSS-2 berdasarkan hasil eksperimen rerata mencapai 91,25%. Efektifitas DSS-1 dan CSS adalah 85,57% dan 19,91%. Efektifitas DSS-2 dengan menggunakan simulasi mencapai 99,85%. Oleh karena itu dapat disimpulkan bahwa kondensor dengan bentuk kerucut memiliki efektifitas yang tinggi dan dapat dimanfaatkan lebih lanjut pada penelitian sejenis ataupun digunakan pada kondisi sebenarnya.
3. Untuk pengembangan DSS-2 lebih lanjut maka pertimbangan keekonomisan alat menunjukkan bahwa *solar still* ini memiliki biaya air 0,01 USD/l dan berada di batas bawah bila dibandingkan dengan biaya air *solar still* dari hasil penelitian sejenis. Perhitungan lebih lanjut menunjukkan bahwa DSS-2 memiliki biaya yang efektif pada luas 25 m² dengan biaya air sebesar 0,0048 USD/l dan dapat diturunkan lagi menjadi 0,0015 apabila material *solar still* menggunakan kayu. Biaya air ini lebih rendah dari pada harga jual air bersih di kepulauan seribu yang mencapai 0,0022 USD/l. Oleh karena itu DSS-2 dapat dikembangkan untuk dipergunakan di daerah pesisir pantai yang dan kerap mengalami krisis air bersih.

Berdasarkan Paparan di atas maka dapat disimpulkan bahwa bentuk kondensot kerucut memiliki efektifitas yang tinggi dan memiliki biaya air yang rendah sehingga dapat dimanfaatkan sebagai bentuk kondensor pada *solar still*.

B. Saran

Solar still ini meskipun telah menunjukkan produktifitas yang tinggi tetapi masih memiliki banyak ruang untuk perbaikan terutama dalam kemudahan pengoperasian. Agar dapat di manfaatkan oleh masyarakat luas maka perlu dilakukan penelitian pengembangan untuk menguji kemudahan pengoperasian dan perawatan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abu-Hijleh, B. A. K. (1996). Enhanced solar still performance using water film cooling of the glass cover. *Desalination*, 107(3), 235–244. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(96\)00165-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(96)00165-8)
- Abu-Hijleh, B. A. K., & Mousa, H. A. (1997). Water film cooling over the glass cover of a solar still including evaporation effects. *Energy*, 22(1), 43–48. [https://doi.org/10.1016/S0360-5442\(96\)00088-6](https://doi.org/10.1016/S0360-5442(96)00088-6)
- Abu-Qudais, M., Bassam, I., Abu-Hijleh, K., & Othman, O. N. (1996). EXPERIMENTAL STUDY AND NUMERICAL SIMULATION OF A SOLAR STILL USING AN EXTERNAL CONDENSER. *Pergamon Energy*, 21(10), 851–855.
- Agrawal, A., & Rana, R. S. (2019). Theoretical and experimental performance evaluation of single-slope single-basin solar still with multiple V-shaped floating wicks. In *Heliyon* (Vol. 5, Issue 4). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01525>
- Ahmed, H. M., & Ibrahim, G. (2017). Thermal Performance of a Conventional Solar Still with a Built-in Passive Condenser : Experimental studies. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 7(3), 1–12.
- Ahmed, S. T. (1988). Study of Single-Effect Solar Still With An Internal Condenser. *Solar and Wind Technology*, 5(6), 637–643.
- Ahsan, A., & Fukuhara, T. (2010). Mass and heat transfer model of Tubular Solar Still. *Solar Energy*, 84(7), 1147–1156. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2010.03.019>
- Alaudeen, A., Johnson, K., Ganasundar, P., Syed Abuthahir, A., & Srithar, K. (2014). Study on stepped type basin in a solar still. *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 26(2), 176–183. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2013.05.002>
- Alessandro Di Bucchianico. (2008). Coefficient of Determination (R²). In *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*. Wiley Online Library. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9780470061572.eqr173>
- Al-Hamadani, A., & Shukla, S. (2013). Performance of single slope solar still with solar protected condenser. *Distributed Generation and Alternative Energy Journal*, 28(2), 6–28. <https://doi.org/10.1080/21563306.2013.10677548>
- Amarloo, A., & Shafii, M. B. (2019). Enhanced solar still condensation by using a radiative cooling system and phase change material. *Desalination*, 467(June), 43–50. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.05.017>
- Ananda, J. (2017). *Mahalnya Satu Kubik Air Bersih di Pesisir Bontang*. <https://klikkaltim.com/category/bontang/mahalnya-satu-kubik-air-bersih-di-pesisir-bontang>
- Arun Kumar, T., Jayaprakash, R., Ahsan, A., Denkenberger, D., & Okundamiya, M. S. (2013). Effect of water and air flow on concentric tubular solar water desalting system. In *Applied Energy* (Vol. 103, pp. 109–115). <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.09.014>
- Badan Geologi. (2022). *Jakarta Alami Krisis Air Bersih*. Kementerian Energi Dan Sumber Daya Mineral. <https://www.esdm.go.id/id/berita-unit/badan-geologi/badan-geologi-jakarta-alami-krisis-air-bersih>
- Bakri, M. (2019, August 2). Krisis Air Bersih Melanda Pesisir Maros Sulsel. *Detiknews*. <https://news.detik.com/berita/d-4649550/krisis-air-bersih-melanda-pesisir-maros-sulsel>

- Barrett, J. P. (1974). The coefficient of determination-some limitations. *American Statistician*, 28(1), 19–20. <https://doi.org/10.1080/00031305.1974.10479056>
- Belessiotis, V., Kalogirou, S., & Delyannis, Emmy. (2016). *Thermal Solar Desalination - Methods and Systems* (M. Convey, Ed.; 1st ed.). Academic Press.
- Belhadj, M. M., Bouguettaia, H., Marif, Y., & Zerrouki, M. (2015). Numerical study of a double-slope solar still coupled with capillary film condenser in south Algeria. *Energy Conversion and Management*, 94, 245–252. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.069>
- ben Halima, H., Frikha, N., & Gabsi, S. (2016). Experimental study of a bubble basin intended for water desalination system. *Desalination*, August. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.08.003>
- Bhardwaj, R., ten Kortenaar, M. v., & Mudde, R. F. (2015). Maximized production of water by increasing area of condensation surface for solar distillation. *Applied Energy*, 154, 480–490. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.060>
- Billions of people will lack access to safe water, sanitation and hygiene in 2030 unless progress quadruples – warn WHO, UNICEF.* (2021). <https://www.who.int/news/item/01-07-2021-billions-of-people-will-lack-access-to-safe-water-sanitation-and-hygiene-in-2030-unless-progress-quadruples-warn-who-unicef>
- Boukhriss, M., Zhani, K., & Ghribi, R. (2013). Study of thermophysical properties of a solar desalination system using solar energy. *Desalination and Water Treatment*, 51(4–6), 1290–1295. <https://doi.org/10.1080/19443994.2012.714925>
- Boutriaa, A., & Rahmani, A. (2017). Thermal modeling of a basin type solar still enhanced by a natural circulation loop. *Computers and Chemical Engineering*, 101, 31–43. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.02.033>
- Chairunnisa, N., Arif, C., Perdinan, & Wibowo, A. (2021). Analisis Analisis Neraca Air di Pulau Jawa-Bali sebagai Upaya Antisipasi Krisis Air. *Jurnal Teknik Sipil Dan Lingkungan*, 6(2), 61–80. <https://doi.org/10.29244/jstil.6.2.61-80>
- CNN. (2022). *Kelangkaan Air di Jawa, Bali dan Nusa Tenggara Diprediksi Naik.* CNNIndonesia. <https://www.cnnindonesia.com/nasional/20220223133008-20-762939/kelangkaan-air-di-jawa-bali-dan-nusa-tenggara-diprediksi-naik>
- Deshmukh, H. S., & Thombre, S. B. (2017). Solar distillation with single basin solar still using sensible heat storage materials. *Desalination*, 410, 91–98. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.01.030>
- Dimri, V., Sarkar, B., Singh, U., & Tiwari, G. N. (2008). Effect of condensing cover material on yield of an active solar still: an experimental validation. *Desalination*, 227(1–3), 178–189. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.06.024>
- Elango, C., Gunasekaran, N., & Sampathkumar, K. (2015). Thermal models of solar still - A comprehensive review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 47, 856–911. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.03.054>
- Elango, T., & Kalidasa Murugavel, K. (2015). The effect of the water depth on the productivity for single and double basin double slope glass solar stills. *Desalination*, 359, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.036>

- El-Bahi, A., & Inan, D. (1999). Analysis of a parallel double glass solar still with separate condenser. *Renewable Energy*, 17(4), 509–521. [https://doi.org/10.1016/S0960-1481\(98\)00768-X](https://doi.org/10.1016/S0960-1481(98)00768-X)
- Elbar, A. R. A., Hassan, H., & Ookawara, S. (2018). A numerical study on the effect of the heat sink as condenser on the performance of passive solar still. *5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Application, ICREGA 2018, 2018-Janua*, 256–259. <https://doi.org/10.1109/ICREGA.2018.8337589>
- El-Samadony, Y. A. F., Abdullah, A. S., & Omara, Z. M. (2015). Experimental study of stepped solar still integrated with reflectors and external condenser. *Experimental Heat Transfer*, 28(4), 392–404. <https://doi.org/10.1080/08916152.2014.890964>
- El-Samadony, Y. A. F., & Kabeel, A. E. (2014). Theoretical estimation of the optimum glass cover water film cooling parameters combinations of a stepped solar still. *Energy*, 68, 744–750. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.01.080>
- El-Sebaey, M. S., Ellman, A., Hegazy, A., & Ghonim, T. (2020). Experimental analysis and CFD modeling for conventional basin-type solar still. *Energies*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/en13215734>
- El-Sebaili, A. A. (2000). Effect of wind speed on some designs of solar stills. *Energy Conversion and Management*, 41(6), 523–538. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(99\)00119-3](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(99)00119-3)
- Essa, F. A., Abd Elaziz, M., & Elsheikh, A. H. (2020). An enhanced productivity prediction model of active solar still using artificial neural network and Harris Hawks optimizer. *Applied Thermal Engineering*, 170(August 2019), 115020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115020>
- Fath, H. E. S., El-Samanoudy, M., Fahmy, K., & Hassabou, A. (2003). Thermal-economic analysis and comparison between pyramid-shaped and single-slope solar still configurations. *Desalination*, 159(1), 69–79. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(03\)90046-4](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(03)90046-4)
- Fath, H. E. S., & Elsherbiny, S. M. (1993). Effect of adding a passive condenser on solar still performance. *Energy Conversion and Management*, 34(1), 63–72. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(93\)90008-X](https://doi.org/10.1016/0196-8904(93)90008-X)
- Fath H, Elsherbiny S, & Gazy. (2004). A naturally circulated humidifying/dehumidifying solar still with a built-in passive condenser. *Desalination*, 169(2), 129–149. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.08.014>
- Febryan, A., & Nusalikah, A. (2019, August 7). Krisis Air Ancam Seperempat Populasi Dunia. *Republika Online*. <https://www.republika.co.id/berita/pvui9b366/krisis-air-ancam-seperempat-populasi-dunia>
- Fritzmann, C., Löwenberg, J., Wintgens, T., & Melin, T. (2007). State-of-the-art of reverse osmosis desalination. *Desalination*, 216(1–3), 1–76. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2006.12.009>
- Geffray, C., Gerschenfeld, A., Kudinov, P., Mickus, I., Jeltsov, M., Kööp, K., Grishchenko, D., & Pointer, D. (2018). Verification and validation and uncertainty quantification. In *Thermal Hydraulic Aspects of Liquid Metal Cooled Nuclear Reactors* (pp. 383–405). <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101980-1.00008-9>
- Geotechdata.info. (2019). *Soil void ratio*. <http://www.geotechdata.info/parameter/void-ratio.html>

- Gnanavel, C., Saravanan, R., & Chandrasekaran, M. (2020). CFD analysis of solar still with PCM. *Materials Today: Proceedings*, 37(Part 2), 694–700.
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.638>
- Goosen, M. F. A., Sablani, S. S., Shayya, W. H., Paton, C., & Al-Hinai, H. (2000). Thermodynamic and economic considerations in solar desalination. *Desalination*, 129(February), 63–89.
- Govind, & Tiwari, G. N. (1984). Economic Analysis of Some Solar Energy System. *Energy Conversion and Management*, 24(2), 131–135.
- Hamad, A., Aftab, S. M. A., & Ahmad, K. A. (2018). Reducing flow separation in T-junction pipe using Vortex Generator: CFD study. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 44(1), 36–46.
- Hansen, R. S., Narayanan, C. S., & Murugavel, K. K. (2015). Performance analysis on inclined solar still with different new wick materials and wire mesh. *Desalination*, 358, 1–8.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.006>
- Hassan, H., Ahmed, M. S., Fathy, M., & Yousef, M. S. (2020). Impact of salty water medium and condenser on the performance of single acting solar still incorporated with parabolic trough collector. *Desalination*, 480(September 2019), 114324.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114324>
- Hassan, H., Yousef, M. S., Fathy, M., & Ahmed, M. S. (2020). Impact of condenser heat transfer on energy and exergy performance of active single slope solar still under hot climate conditions. *Solar Energy*, 204(April), 79–89.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.026>
- Holman, J. P. (n.d.). *Experimental Methods for Engineers Eighth Edition*. Mc Grww Hill.
www.mhhe.com/holman
- Holman, J. P. (2010a). Heat Transfer. In *McGraw-Hill* (Ten, Vol. 15, Issue 3).
<https://doi.org/10.1080/01973762.1999.9658510>
- Holman, J. P. (2010b). *Heat Transfer Tenth Edition*.
- Husham, M. A. (2012). Experimental Investigations of Solar Stills Connected to External Passive Condensers. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 2(2012), 1–11.
- Ibrahim, G., & Ahmed, H. M. (2018). Theoretical modeling of Solar Still with water cooled Integrated Built-in Condenser. *Journal of Advanced Science and Engineering Research*, 8(1), 17–30.
- Indreswari Suroso. (2017). ANALISIS SECARA FISIS DAN MEKANIS PASIR BESI DARI PANTAI SELATAN KULONPROGO BERGUNA BAGI MATERIAL PESAWAT TERBANG [Physical and mechanical analysis of iron sand from the south coast of Kulon Progo for aircraft materials]. *Jurnal Teknik STTKD*, 4(1), 26–38.
- Jay Kumar, S., & Tiwari, G. N. (1996). ESTIMATION OF CONVECTIVE MASS TRANSFER IN SOLAR DISTILLATION SYSTEMS. *Solar Energy*, 57(6), 459–464.
- Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., & Mahgoub, M. (2016). The performance of a modified solar still using hot air injection and PCM. *Desalination*, 379, 102–107.
<https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.11.007>
- Kabeel, A. E., Omara, Z. M., & Essa, F. A. (2014). Enhancement of modified solar still integrated with external condenser using nanofluids: An experimental approach. *Energy*

- Conversion and Management*, 78, 493–498.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.11.013>
- Kabeel, A. E., Omara, Z. M., & Essa, F. A. (2017). Numerical investigation of modified solar still using nanofluids and external condenser. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 75, 77–86. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2017.01.017>
- Kabeel, A. E., Omara, Z. M., Essa, F. A., Abdullah, A. S., Arunkumar, T., & Sathyamurthy, R. (2017). Augmentation of a solar still distillate yield via absorber plate coated with black nanoparticles. *Alexandria Engineering Journal*, 56(4), 433–438.
<https://doi.org/10.1016/j.aej.2017.08.014>
- Kalogirou, S. A. (2004). Solar thermal collectors and applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 30(3), 231–295. <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2004.02.001>
- Khare, V. R., Singh, A. P., Kumar, H., & Khatri, R. (2017). Modelling and Performance Enhancement of Single Slope Solar Still Using CFD. *Energy Procedia*, 109(November 2016), 447–455. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.03.064>
- Kumar, R. A., Esakkimuthu, G., & Murugavel, K. K. (2016). Performance enhancement of a single basin single slope solar still using agitation effect and external condenser. *Desalination*, 399, 198–202. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.09.006>
- Kumar, S., & Tiwari, G. N. (1996). Estimation of convective mass transfer in solar distillation systems. *Solar Energy*, 57(6), 459–464. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00122-3](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00122-3)
- Kumar, S., & Tiwari, G. N. (2009). Life cycle cost analysis of single slope hybrid (PV/T) active solar still. *Applied Energy*, 86(10), 1995–2004.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.03.005>
- Lawrence, M. G. (2005). The relationship between relative humidity and the dewpoint temperature in moist air: A simple conversion and applications. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 86(2), 225–233. <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-2-225>
- LIPI. (2018, March 23). *Indonesia Negeri Tropis, Tapi Krisis Air Bersih di Kawasan Pesisir Terjadi?* <http://lipi.go.id/lipimedia/Indonesia-Negeri-Tropis-Tapi-Krisis-Air-Bersih-di-Kawasan-Pesisir-Terjadi/20218>
- Long, C., & Sayma, N. (2018). Heat Transfer. In *Coulson and Richardson's Chemical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102550-5.00001-8>
- Madhlopa, A., & Johnstone, C. (2009). Numerical study of a passive solar still with separate condenser. *Renewable Energy*, 34(7), 1668–1677.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.12.032>
- Mahian, O., Kianifar, A., Heris, S. Z., Wen, D., Sahin, A. Z., & Wongwises, S. (2017). Nanofluids effects on the evaporation rate in a solar still equipped with a heat exchanger. *Nano Energy*, 36(April), 134–155. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.04.025>
- Mahmood, F., & Al-Ansari, T. (2022). Design and analysis of a renewable energy driven greenhouse integrated with a solar still for arid climates. *Energy Conversion and Management*, 258(December 2021), 115512.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115512>
- Maizunati, N. A., & Arifin, M. Z. (2017). PENGARUH PERUBAHAN JUMLAH PENDUDUK TERHADAP KUALITAS AIR DI INDONESIA. *Jurnal Litbang Provinsi Jawa Tengah*, 15(2), 207–215. <https://doi.org/10.36762/JURNALJATENG.V15I2.417>

- Manchanda, H., & Kumar, M. (2017). Performance analysis of single basin solar distillation cum drying unit with parabolic reflector. *Desalination*, 416(March), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.04.020>
- Mekdori, Y. (2022, February 23). *BMKG Ingatkan Ancaman Krisis Air Bersih di Indonesia Akibat Perubahan Iklim - News Liputan6.com*. Liputan 6. <https://www.liputan6.com/news/read/4894653/bmkg-ingatkan-ancaman-krisis-air-bersih-di-indonesia-akibat-perubahan-iklim>
- Moffat, R. J. (1985). Using uncertainty analysis in the planning of an experiment. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 107(2), 173–178. <https://doi.org/10.1115/1.3242452>
- Mohamed, A. F., Hegazi, A. A., Sultan, G. I., & El-Said, E. M. S. (2019a). Augmented heat and mass transfer effect on performance of a solar still using porous absorber: Experimental investigation and exergetic analysis. *Applied Thermal Engineering*, 150(January), 1206–1215. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.01.070>
- Mohamed, A. F., Hegazi, A. A., Sultan, G. I., & El-Said, E. M. S. (2019b). Enhancement of a solar still performance by inclusion the basalt stones as a porous sensible absorber: Experimental study and thermo-economic analysis. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 200(November 2018), 109958. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2019.109958>
- Morad, M. M., El-Maghawry, H. A. M., & Wasfy, K. I. (2017). A developed solar-powered desalination system for enhancing fresh water productivity. *Solar Energy*, 146, 20–29. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.02.002>
- Muftah, A. F., Sopian, K., & Alghoul, M. A. (2018). Performance of basin type stepped solar still enhanced with superior design concepts. *Desalination*, 435(March), 198–209. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.07.017>
- Mugisidi, D., Cahyani, R. S., Heriyani, O., Agusman, D., & Rifky. (2019). Effect of Iron Sand in Single Basin Solar Still: Experimental Study. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 268(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/268/1/012158>
- Mugisidi, D., Fajar, B., Syaiful, S., Utomo, T., Heriyani, O., Agusman, D., & Regita, R. (2020). Iron Sand as a Heat Absorber to Enhance Performance of a Single-Basin Solar Still. *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 70(1), 125–135. <https://doi.org/10.37934/arfmts.70.1.125135>
- Mugisidi, D., & Heriyani, O. (2018). Sea Water Characterization at Ujung Kulon Coastal Depth as Raw Water Source for Desalination and Potential Energy. *The 2nd International Conference on Energy, Environmental and Information System (ICENIS 2017)*, 31(2018). <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183102005>
- Mugisidi, D., Heriyani, O., Abdel-Rehim, Z. S., & Fathurohman, H. (2018). The influence of container material conductivity to sea water evaporation. *AIP Conference Proceedings*, 1977. <https://doi.org/10.1063/1.5042943>
- Mugisidi, D., Rahman, A., Gunawan, P. H., & Heriyani, O. (2021). DETERMINATION OF THE CONVECTIVE HEAT TRANSFER CONSTANT (C AND N) IN A SOLAR STILL. *TEKNOSAINS*, 11(1), 1–12.
- Muthu Manokar, A., Taamneh, Y., Kabeel, A. E., Prince Winston, D., Vijayabalan, P., Balaji, D., Sathyamurthy, R., Padmanaba Sundar, S., & Mageshbabu, D. (2020). Effect of water depth and insulation on the productivity of an acrylic pyramid solar still – An experimental

- study. *Groundwater for Sustainable Development*, 10(December 2019), 100319. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100319>
- Nadgire, A. R., Barve, S. B., & Ithape, P. K. (2020). Experimental Investigation and Performance Analysis of Double-Basin Solar Still Using CFD Techniques. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, 101(3), 531–539. <https://doi.org/10.1007/s40032-020-00561-y>
- Nagelkerke, N. J. D. (1991). A Note on a General Definition of the Coefficient of Determination. In *Biometrika* (Vol. 78, Issue 3).
- Omara, Z. M., Kabeel, A. E., & Younes, M. M. (2014). Enhancing the stepped solar still performance using internal and external reflectors. *Energy Conversion and Management*, 78, 876–881. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.092>
- Ouar, M. L. A., Sellami, M. H., Meddour, S. E., Touahir, R., Guemari, S., & Loudiyi, K. (2017). Experimental yield analysis of groundwater solar desalination system using absorbent materials. *Groundwater for Sustainable Development*, 5(July 2016), 261–267. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2017.08.001>
- PAM JAYA. (2021). <https://pamjaya.co.id/infopelanggan/tarifairminum>
- Panchal, H. N., & Thakkar, H. (2016). Theoretical and experimental validation of evacuated tubes directly coupled with solar still. *Thermal Engineering*, 63(11), 825–831. <https://doi.org/10.1134/S0040601516110045>
- Papapetrou, M., Cipollina, A., La Commare, U., Micale, G., Zaragoza, G., & Kosmadakis, G. (2017). Assessment of methodologies and data used to calculate desalination costs. *Desalination*, 419(March), 8–19. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.05.038>
- Pengra, D. B., & Dillman, L. T. (2009). *Notes on Data Analysis and Experimental Uncertainty*. 1–10.
- Pratama, A., Pradhana, A. B., Ismoyo, B., & R. Ismail, N. (2013). ANALISA PASIR BESI UNTUK MENINGKATKAN EFISIENSI PELAT PENYERAP PANAS RADIASI MATAHARI. 5(2), 5–9. <https://doi.org/10.13989/j.cnki.0517-6611.2015.10.011>
- Putra, H., Satyarno, I., Wijatna, A. B., & Fisika, J. T. (2008). Penggunaan Pasir Besi Dari Kulon Progo Dengan Berat Jenis 4, 311 Untuk Mortar Perisai. *Forum Teknik Sipil, XVIII*, 909–920.
- Rabhi, K., Nciri, R., Nasri, F., Ali, C., & Ben Bacha, H. (2017). Experimental performance analysis of a modified single-basin single-slope solar still with pin fins absorber and condenser. *Desalination*, 416, 86–93. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2017.04.023>
- Rahbar, N., & Esfahani, J. A. (2012). Experimental study of a novel portable solar still by utilizing the heatpipe and thermoelectric module. *Desalination*, 284, 55–61. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.036>
- Rahmani, A., & Boutriaa, A. (2017). Numerical and experimental study of a passive solar still integrated with an external condenser. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(48), 29047–29055. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.07.242>
- Rahmani, A., Boutriaa, A., & Hadeif, A. (2015). An experimental approach to improve the basin type solar still using an integrated natural circulation loop. *Energy Conversion and Management*, 93, 298–308. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.01.026>

- Rashidi, S., Abolfazli Esfahani, J., & Rahbar, N. (2017). Partitioning of solar still for performance recovery: Experimental and numerical investigations with cost analysis. *Solar Energy*, *153*, 41–50. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.05.041>
- Reddy, K. S., & Sharon, H. (2016). Active multi-effect vertical solar still: Mathematical modeling, performance investigation and enviro-economic analyses. *Desalination*, *395*, 99–120. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2016.05.027>
- Refalo, P., Ghirlando, R., & Abela, S. (2016). The use of a solar chimney and condensers to enhance the productivity of a solar still. *Desalination and Water Treatment*, *57*(48–49), 23024–23037. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1106096>
- Rosyada, M., Prasetyo, Y., & Haniah, H. (2015). Analisis Korelasi Suhu Permukaan Laut terhadap Curah Hujan dengan Metode Penginderaan Jauh Tahun 2021-2013. *Jurnal Geodesi Undip*, *4*(1), 85–94.
- Sampathkumar, K., Arjunan, T. V., Pitchandi, P., & Senthilkumar, P. (2010). Active solar distillation-A detailed review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 6, pp. 1503–1526). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.01.023>
- Schewe, J., Heinke, J., Gerten, D., Haddeland, I., & Arnell, N. W. (2014). Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol: 111 (9) pp: 3245-50. <https://doi.org/10.1073/pnas.1222460110>
- Seyednezhad, M., Sheikholeslami, M., Ali, J. A., Shafee, A., & Nguyen, T. K. (2020). Nanoparticles for water desalination in solar heat exchanger. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *139*(3), 1619–1636. <https://doi.org/10.1007/s10973-019-08634-6>
- Shoeibi, S., Rahbar, N., Esfahlani, A. A., & Kargarsharifabad, H. (2021). Energy matrices, exergoeconomic and enviroeconomic analysis of air-cooled and water-cooled solar still: Experimental investigation and numerical simulation. *Renewable Energy*, *171*, 227–244. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.081>
- Shukla, S. K., & Sorayan, V. P. S. (2005). Thermal modeling of solar stills: An experimental validation. *Renewable Energy*, *30*(5), 683–699. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.03.009>
- Sivaram, P. M., Dinesh Kumar, S., Premalatha, M., Sivasankar, T., & Arunagiri, A. (2020). Experimental and numerical study of stepped solar still integrated with a passive external condenser and its application. *Environment, Development and Sustainability*, *0123456789*. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00667-4>
- Sivaram, P. M., Dinesh Kumar, S., Premalatha, M., Sivasankar, T., & Arunagiri, A. (2021). Experimental and numerical study of stepped solar still integrated with a passive external condenser and its application. *Environment, Development and Sustainability*, *23*(2), 2143–2171. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00667-4>
- Sodha, M. S., Kumar, A., Tiwari, G. N., & Tyagi, R. C. (1981). Simple multiple wick solar still: Analysis and performance. *Solar Energy*, *26*(2), 127–131. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(81\)90075-X](https://doi.org/10.1016/0038-092X(81)90075-X)
- Tabrizi, F. F., Dashtban, M., & Moghaddam, H. (2010). Experimental investigation of a weir-type cascade solar still with built-in latent heat thermal energy storage system. *Desalination*, *260*(1), 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.03.033>

- Tiwari, A. Kr., & Tiwari, G. N. (2005). Effect of the condensing cover's slope on internal heat and mass transfer in distillation: an indoor simulation. *Desalination*, *180*(2), 73–88. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2004.12.029>
- Tiwari, G. N., Kupfermann, A., & Aggarwal, S. (1997). A new design for a double-condensing chamber solar still. *Desalination*, *114*(2), 153–164. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(98\)00007-1](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(98)00007-1)
- Tsilingiris, P. T. (2015). Parameters affecting the accuracy of Dunkle's model of mass transfer phenomenon at elevated temperatures. *Applied Thermal Engineering*, *75*, 203–212. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.09.010>
- UNICEF. (2020). *Water scarcity*. <https://www.unicef.org/wash/water-scarcity>
- Xiong, J., Xie, G., & Zheng, H. (2013). Experimental and numerical study on a new multi-effect solar still with enhanced condensation surface. *Energy Conversion and Management*, *73*, 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.024>
- Yan, T., Xie, G., Liu, H., Wu, Z., & Sun, L. (2020). CFD investigation of vapor transportation in a tubular solar still operating under vacuum. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, *156*, 119917. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119917>
- Zurigat, Y. H., & Abu-Arabi, M. K. (2004). Modelling and performance analysis of a regenerative solar desalination unit. *Applied Thermal Engineering*, *24*(7), 1061–1072. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2003.11.010>

LAMPIRAN

A. Contoh Perhitungan

Contoh perhitungan pada penelitian *solar still* menggunakan data DSS-2 tanggal 9 Oktober 2019 jam 12.00.

Menghitung tekanan air

$$P_w = \exp \left[25,317 - \left(\frac{5144}{47,8+273} \right) \right] = 10.743,8 \frac{N}{m^2} \quad (2-4)$$

Menghitung tekan di kondensor

$$P_c = \exp \left[25,317 - \left(\frac{5144}{40,7+273} \right) \right] = 7.473,9 \frac{N}{m^2} \quad (2-5)$$

Menghitung kapasitas panas spesifik uap air

$$\begin{aligned} c_p &= 999,2 + (0,1434 \times 47,8) + (1,101 \times 10^{-4} \times (47,8)^2) - (6,76 \times 10^{-8} \times (47,8)^3) \\ &= 1.006,3 \frac{J}{kg \cdot K} \end{aligned}$$

Menghitung densitas uap air

$$\rho = \frac{353,44}{40,7 + 273,15} = 1,13 \frac{kg}{m^3}$$

Menghitung konduktifitas termal

$$k_f = 0,0244 + 0,00007673(40,7) = 0,0281 \frac{W}{m \cdot K}$$

Menghitung koefisien volumetric

$$\beta = \frac{1}{40,7 + 273,15} = 0,00319 \frac{1}{K}$$

Menghitung viskositas

$$\mu = ((40,7) \cdot 0.0000000462) + 0.00001718) = 1,90 \times 10^{-5} \frac{Ns}{m^2}$$

Menghitung ΔT

$$\Delta T = (47,8 - 40,7) + \frac{(10.743,8 - 7.473,9) \cdot 47,8}{268,9 \cdot 10^3 - 10.743,8} = 11,78 \text{ K}$$

Menghitung bilangan Grashof (Gr)

$$Gr = \frac{0,00319 \cdot 9,81 \cdot 0,13^3 \cdot 1,13^2 \cdot 11,78}{1,90 \times 10^{-5}} = 302.256,06$$

Menghitung bilangan Prandtl (Pr)

$$Pr = \frac{1,90 \times 10^{-5} \cdot 1.006,3}{0,0281} = 0.69512$$

Menghitung Hfg

$$\begin{aligned} h_{fg} &= 2.4935 \cdot 10^6 \\ &\times [1 - (9.4779 \cdot 10^{-4} \times 40,7) + (1.3132 \cdot 10^{-7} \times 40,7^2) - (4.7974 \cdot 10^{-9} \times 40,7^3)] \\ &= 2.379.975,27 \text{ J/kg} \end{aligned}$$

Menghitung angka Rayleigh (Ra)

$$Ra = 302.256,06 \times 0.69512 = 210.174,46$$

Menghitung angka Nusselt (Nu)

$$Nu = \frac{1,23 \times 0,13}{0,02871} = 4,51$$

Menghitung nilai koefisien konveksi (h_c)

$$h_c = \frac{0,0281}{0,13} \times 0,9177(210.174,46)^{0,1225} = 0,9657 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Menghitung koefisien evaporasi

$$h_e = 16,237 \cdot 10^{-3} \times 4,51 \frac{10.743,8 - 7.473,9}{47,8 - 40,7} = 7,24 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

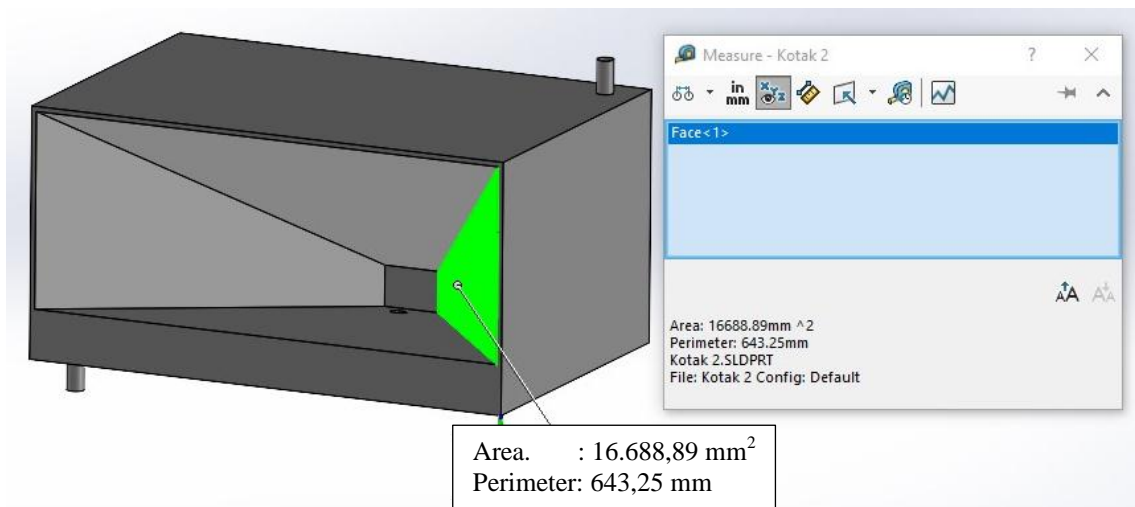
Menghitung massa teoritis

$$m_w = \frac{7,24 \cdot (47,8 - 40,7)}{2.379.975,27 \times 3600 \times 1000 / 0,09} = 863,63 \text{ gr/jam/m}^2$$

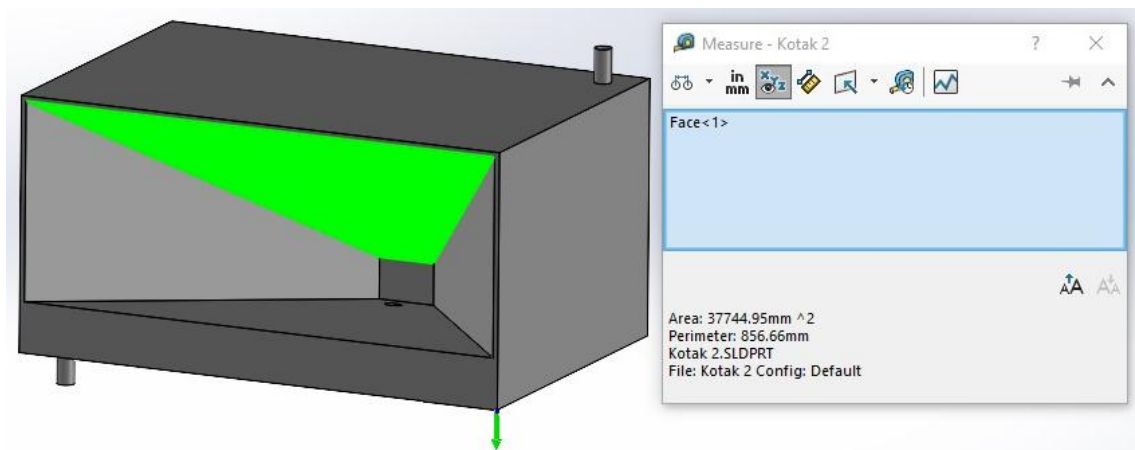
Menghitung efisiensi *solar still*

$$\eta = \frac{1,154,558.83}{2,486,052} \times 100\% = 46,4\%$$

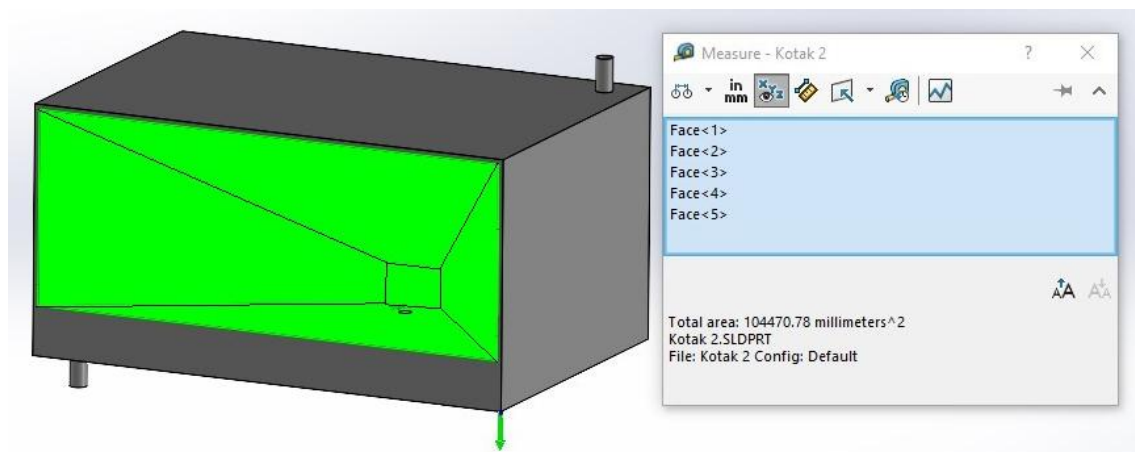
B. Luas Kondensor



Gambar LAMPIRAN-1 Luas sisi dinding kondensor



Gambar LAMPIRAN-2 Luas atas dinding kondensor



Gambar LAMPIRAN-3 Luas dinding kondensor

C. Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian di laksanakan di Kampus Universitas Muhammadiyah Prof DR HAMKA di Jakarta.

Tabel LAMPIRAN-1 Waktu pelaksanaan penelitian disertasi

Kegiatan	Waktu Pengerjaan
Pembuatan Alat	September - Desember 2018
Pengadaan Alat	November - Desember 2018
Uji coba alat dalam ruang	Juni - Agustus 2019
Pengambilan data	September - Oktober 2019
Analisa dan Perhitungan	November 2019 - Desember 2020
Penulisan Disertasi	Januari 2021 - Februari 2022

D. Data Penelitian

Tabel LAMPIRAN-2 CSS - 8 Oktober 2021

Jam	Radiasi [W/m ²]	Tw [°C]	Tgi [°C]	Tb [°C]	Tv [°C]	RH [%]	Acc. m [gr/m ²]	gr/m ²	v [m/s]
8	935	48.0	46.4	44.3	48	70	0	0	1,5
9	1103	58.0	51	54	58	68	400	400	0
10	1154	69.8	61	61.3	70.8	65	800	400	0
11	1159	71.3	60.2	64.2	67.7	62	1342	542	3
12	1171	71.8	59.2	51.5	66.3	62	1908	567	4,5
13	739	60.2	48.7	53.1	52.3	64	2283	375	2,9
14	443	51.0	43.4	44.6	48	68	2517	233	4,4
15	568	44.4	38.2	42.9	44.4	69	2725	208	1,5
16	205	42.6	38.3	36.7	39.5	68	2750	25	2,5
17	83	36.6	33.7	35.5	36	71	2750	0	2,2
Total	7560								

Tabel LAMPIRAN-3 DSS-1 - 8 Oktober 2021

Jam	Radiasi [W/m ²]	Tw [°C]	Tc [°C]	Tb [°C]	Tv [°C]	RH [%]	Acc. m [gr/m ²]	gr/m ²	Tpi [°C]	Tpo [°C]
8	520	35.0	34	39.5	38	78	0	0	30.4	30.4
9	930	42.2	38.6	43.2	44.5	90	667	667	30.3	32.0
10	1017	43.3	39.7	44.3	46.8	83	1378	711	30.4	32.4
11	1141	45.2	41.5	44	49.8	80	2133	756	30.4	32.8
12	1151	45.8	42.5	43.9	52.2	78	2856	722	30.5	32.7
13	591	44.3	42.1	42.6	48.2	78	3233	378	30.6	31.5
14	398	42.8	41.5	40.9	44	75	3433	200	30.5	30.8
15	370	41.9	41.2	39.5	42	75	3456	22	30.4	30.5
16	169	40.6	40.2	38.4	40.4	75	3467	11	30.3	30.3
17	64	38.7	38.5	36.9	38.1	70	3467	0	30.3	30.3
Total	6351									

Tabel LAMPIRAN-4 DSS-2 - 8 Oktober 2021

Jam	Radiasi [W/m ²]	Tw [°C]	Tc [°C]	Tb [°C]	Tv [°C]	RH [%]	Acc. m [gr/m ²]	gr/m ²	Tpi [°C]	Tpo [°C]
8	959	34.8	33.7	33.1	38.2	70	0	0	30.2	30.3
9	1025	45.1	36.1	38.8	46.5	85	756	756	30.3	32.3
10	1052	45.8	36.8	38.6	47.8	80	1700	944	30.4	32.5
11	1203	46.4	37.2	39.1	48.7	75	2611	911	30.4	32.6
12	1145	46.6	37.8	39.5	48.3	70	3478	867	30.4	32.5
13	758	45.6	37.4	38.1	47.9	70	4200	722	30.5	32.3
14	424	42.6	36.4	34.2	46.4	75	4589	389	30.5	31.8
15	360	42.0	34.7	33.6	43.5	85	4822	233	30.4	31.8
16	190	36.7	33.1	30.2	41.3	86	4922	100	30.4	31.0
17	64	36.4	32.8	30.1	37.2	90	4922	0	30.4	30.6
Total	7180									

Tabel LAMPIRAN-5 CSS - 9 Oktober 2021

Jam	Radiasi [W/m ²]	Tw [°C]	Tgi [°C]	Tb [°C]	Tv [°C]	RH [%]	Acc. m [gr/m ²]	gr/m ²	v [m/s]
8	982	43.9	43.3	39.3	49.3	70	0	0	0
9	1062	47.7	43.5	41.2	49.7	68	233	233	0
10	1100	50.9	43.9	46.3	52.1	65	633	400	1,5
11	1138	53.1	44.9	44.4	54.3	65	1150	517	1,4
12	1110	55.3	45.9	46	55.9	64	1692	542	2
13	1100	55.4	45.3	46.2	55.7	63	2225	533	7,9
14	1001	54.8	46.2	41.5	55.3	65	2708	483	6,4
15	847	45.5	38.2	42.1	44.5	62	2892	183	3,6
16	242	36.8	33.5	38.7	41.4	65	2925	33	3
17	22	35.8	34.6	35.7	35.8	69	2925	0	1,5
Total	8604								

Tabel LAMPIRAN-6 DSS-1 - 9 Oktober 2021

Jam	Radiasi [W/m ²]	Tw [°C]	Tc [°C]	Tb [°C]	Tv [°C]	RH [%]	Acc. m [gr/m ²]	gr/m ²	Tpi [°C]	Tpo [°C]
8	982	36.4	32.1	38.7	38.5	70	0	0	30.2	30.4
9	1075	41.6	33.5	40.8	48.7	90	689	689	30.4	31.9
10	1129	42.7	34.5	41.4	49.4	85	1456	767	30.5	32.2
11	750	43.8	37.9	42.3	53.8	80	1956	500	30.5	31.8
12	680	43.9	38.9	42	53.5	75	2456	500	30.4	31.5
13	478	42.5	38.7	41.3	50.3	70	2744	289	30.3	31.1
14	465	40.5	38.5	39.5	48.1	69	2922	178	30.5	30.9
15	128	40.1	35.3	39.5	44.1	80	3056	133	30.3	30.9
16	104	37.9	35.2	38.6	42.4	80	3144	89	30.2	30.5
17	14	35.9	34.3	36.6	37.7	85	3144	0	30	29.8
Total	5805									

Tabel LAMPIRAN-7 DSS-2 - 9 Oktober 2021

Jam	Radiasi [W/m ²]	Tw [°C]	Tc [°C]	Tb [°C]	Tv [°C]	RH [%]	Acc. m [gr/m ²]	gr/m ²	Tpi [°C]	Tpo [°C]
8	974	35.7	33	37.2	40.6	72	0	0	30.2	30.3
9	1064	40.6	34.5	39.4	43.2	90	611	611	30.3	31.7
10	1040	44.1	37.4	40.9	47.4	80	1500	889	30.4	32.3
11	554	44.5	38.2	40.6	52.3	75	2350	850	30.7	32.6
12	978	47.8	40.7	41.1	53.5	65	3220	870	30.8	33.3
13	999	45.8	40.4	40.1	52.7	67	3917	697	30.8	32.6
14	1009	44.1	38.5	39.1	50.5	73	4611	694	30.9	32.6
15	862	44.0	37.9	35.8	44.9	75	5194	583	30.7	32.6
16	173	41.9	36.9	34.6	44.6	80	5372	178	30.6	31.9
17	20	36.1	35.3	32.1	37.3	85	5372	0	30.3	30.5
Total	7673									

Tabel LAMPIRAN-8 CSS - 10 Oktober 2021

Jam	Radiasi [W/m ²]	Tw [°C]	Tgi [°C]	Tb [°C]	Tv [°C]	RH [%]	Acc. m [gr/m ²]	gr/m ²	v [m/s]
8	750	39,9	37,8	39,3	44,9	70	0	0	0
9	888	43,4	37,7	41,7	48,1	90	233	233	0,4
10	964	45,2	39,2	46,7	51,9	83	492	258	2,1
11	456	46,4	40,8	47	51,4	80	700	208	0
12	843	48,0	42,5	44	51,7	78	933	233	0
13	788	45,0	40,6	45,4	52,7	78	1133	200	1,5
14	825	43,4	38,6	44,2	47,3	75	1342	208	1,7
15	448	38,5	35,2	38,5	42,4	75	1442	100	3,4
16	40	35,1	34,5	37,5	38,2	75	1442	0	1,5
17	12	36,8	33	35	35,8	70	1442	0	0,7
Total	6014								

Tabel LAMPIRAN-9 DSS-1 - 10 Oktober 2021

Jam	Radiasi [W/m ²]	Tw [°C]	Tc [°C]	Tb [°C]	Tv [°C]	RH [%]	Acc. m [gr/m ²]	gr/m ²	Tpi [°C]	Tpo [°C]
8	773	36,1	33,2	37,8	39,1	70	0	0	30,2	30,6
9	812	41,8	34,7	38,8	44,3	90	522	522	30,5	31,3
10	880	43,9	37,3	41,7	45,9	83	1167	644	30,5	31,8
11	345	42,3	37,7	41,7	45,3	80	1556	389	30,5	31,4
12	779	43,7	38,4	42	45,8	78	2056	500	30,5	31,5
13	336	40,9	36,8	41,8	46,1	78	2256	200	30,5	31,2
14	246	41,7	36,4	41,5	44,7	75	2378	122	30,3	31,3
15	192	40,7	35,1	40	42,3	75	2467	89	30,3	31,2
16	29	35,2	34,7	38,4	39,8	75	2467	0	30,3	30,3
17	11	34,9	34,6	37	38,2	70	2467	0	30,3	30,3
Total	4403									

Tabel LAMPIRAN-10 DSS-2 - 10 Oktober 2021

Jam	Radiasi [W/m ²]	Tw [°C]	Tc [°C]	Tb [°C]	Tv [°C]	RH [%]	Acc. m [gr/m ²]	gr/m ²	Tpi [°C]	Tpo [°C]
8	648	34,7	33,9	42,2	40,3	70	0	0	30,3	30,8
9	821	40,4	36,4	43,2	45,3	85	700	700	30,3	31,9
10	790	43,1	38,3	43,9	48,7	80	1322	622	30,6	32,8
11	382	42,6	38,8	42,2	48,5	80	1911	589	30,6	32,6
12	877	43,1	39,8	41,5	49,3	70	2511	600	30,6	32,3
13	715	43,3	39,7	40,9	48,9	70	3100	589	30,4	32,2
14	799	42,4	38,9	40,7	47,9	70	3678	578	30,4	32,1
15	397	40,4	37,9	38,2	46,3	75	3878	200	30,4	32,1
16	21	36,9	36,5	33,2	39,5	75	3878	0	30,2	30,3
17	8	36,2	35,7	32,3	36,8	70	3878	0	30,1	30,0
Total	5458									

Tabel LAMPIRAN-11 nilai untuk menghitung Gr dan Pr

P	K _f	β	L	μ	d _f	P _w	P _c	C _p	ΔT
1,1012	0,0281	0,0031	0.13	1,90E-05	0,065	10743,8	7473,9	1006,3	11,78