



PROTEKSI ISI LAPORAN AKHIR PENELITIAN TERAPAN - LUARAN PROTOTYPE

Dilarang menyalin, menyimpan, memperbanyak sebagian atau seluruh isi proposal ini dalam bentuk apapun kecuali oleh pengusul dan pengelola administrasi penelitian dan pengabdian kepada masyarakat

LAPORAN AKHIR

1. JUDUL PENELITIAN

Pengembangan Prototipe Unit Desalinasi Berbasis Panas Buang Pendingin Udara dengan Vortex Generators dan Internet of Things untuk Penyediaan Air Bersih

Bidang Fokus	Tema	Topik (jika ada)	Prioritas Riset
Produk rekayasa keteknikan	Teknologi dan manajemen bencana hidrometeorologi	Teknologi dan aplikasi digital dalam manajemen bencana hidrometeorologi	Hilirisasi dan industrialisasi

Rumpun Ilmu Level 1	Rumpun Ilmu Level 2	Rumpun Ilmu Level 3
ILMU TEKNIK	ILMU KETEKNIKAN INDUSTRI	Teknik Mesin (dan Ilmu Permesinan Lain)

Skema Penelitian	Strata (Dasar/Terapan/Pengembangan)	Nilai SBK	Target Akhir TKT	Lama Kegiatan
Penelitian Terapan - Luaran Prototipe	Riset Terapan	500.000.000	4	2 Tahun

2. IDENTITAS PENGUSUL

Nama, Peran	Jenis	Program Studi/Bagian	Bidang Tugas	ID Sinta
DAN MUGISIDI 0301126901 Ketua Pengusul Universitas Muhammadiyah Prof Dr Hamka	Dosen	Teknik Mesin	membuat desain experimental, pembuatan prototipe unit desalinasi terintegrasi sistem, uji integrasi sistem, uji usability sistem, analisa sistem, dan pembuatan paten	6007157
OKTARINA HERIYANI 0305067702 Anggota Universitas Muhammadiyah Prof Dr Hamka	Dosen	Teknik Mesin	melakukan indentifikasi dan analisis kebutuhan sistem, uji integrasi sistem dan pengoperasian sistem, uji usability sistem, pembuatan laporan dan paten	6007615
RIFKY 0305046501 Anggota Universitas Muhammadiyah Prof Dr Hamka	Dosen	Teknik Mesin	pembuatan prototipe dan integrasi sistem, uji usability pada lingkungan terbatas, pembuatan luaran untuk laporan dan paten	6188288
AKHMAD RIZAL DZIKRILLAH 0311128701 Anggota Universitas Muhammadiyah Prof Dr Hamka	Dosen	Teknik Informatika	identifikasi dan analisis kebutuhan sistem, uji integrasi sistem dan pengoperasian, uji usability sistem dan pembuatan luaran.	6815648
AHMAD FAIZ RAHMATULLAH 2203035002 Mahasiswa Universitas Muhammadiyah Prof Dr Hamka	Mahasiswa	Teknik Mesin	Membantu dalam desain awal sistem menggunakan perangkat lunak CAD atau simulasi termal. Mempersiapkan dan merakit komponen utama, seperti pendingin	-

Nama, Peran	Jenis	Program Studi/Bagian	Bidang Tugas	ID Sinta
			udara (AC), heat exchanger, kondensor, dan vortex generator. Menginstalasi dan mengkalibrasi sensor IoT (tekanan, suhu, kelembaban) untuk pemantauan data secara real-time.	
DEWA 2303035040 Mahasiswa Universitas Muhammadiyah Prof Dr Hamka	Mahasiswa	Teknik Mesin	Melakukan perbaikan pada prototipe berdasarkan hasil pengujian . Mempersiapkan dan merakit komponen utama, seperti pendingin udara (AC), heat exchanger, kondensor, dan vortex generator. Menginstalasi dan mengkalibrasi sensor IoT (tekanan, suhu, kelembaban) untuk pemantauan data secara real-time.	-

3. DOKUMEN PENDUKUNG

URL Artikel di jurnal sebagai penulis pertama (first author) atau penulis korespondensi (corresponding author) yang relevan dengan usulan penelitian

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398625001614>

4. MITRA KERJASAMA PENELITIAN (Jika Ada)

Pelaksanaan penelitian dapat melibatkan mitra kerjasama yaitu mitra kerjasama dalam melaksanakan penelitian, mitra sebagai calon pengguna hasil penelitian, atau mitra investor

Mitra	Nama Mitra	Dana
PT. Dwiputra Multi Gemilang	Dwi Astuti, S.H	Tahun 1 Rp 0

5. LUARAN DAN TARGET CAPAIAN

Luaran Wajib

Tahun Luaran	Kategori Luaran	Jenis Luaran	Status target capaian	Keterangan
1	Purwarupa/Prototipe	Purwarupa/Prototipe	Ada / Tersedia	Prototipe Unit Desalinasi Berbasis Panas Buang Pendingin Udara dengan Vortex Generators dan Internet of Things untuk Penyediaan Air Bersih
1	Kekayaan Intelektual (KI)	Paten	Terdaftar	http://paten.dgip.go.id
2	Purwarupa/Prototipe	Purwarupa/Prototipe	Ada / Tersedia	prototipe yang telah teruji
2	Dokumen Feasibility Study	Dokumen Feasibility Study	Diterima (Granted)	sertifikasi kelayakan?SNI

6. ANGGARAN

Rencana Anggaran Biaya penelitian mengacu pada PMK dan buku Panduan Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat yang berlaku.

Total RAB 2 Tahun Rp 1.246.778.000,00

Tahun 1 Total Rp 846.268.000,00

Kelompok	Komponen	Item	Satuan	Vol.	Biaya Satuan	Total
Analisis Data	Biaya analisis sampel	uji sistem low fidelity	Unit	9	2.750.000	24.750.000
Analisis Data	Biaya analisis sampel	uji kulaitas air	Unit	9	1.850.000	16.650.000
Analisis Data	Biaya analisis sampel	uji sistem low fidelity	Unit	9	2.750.000	24.750.000
Analisis Data	Biaya analisis sampel	uji kulaitas air	Unit	9	1.850.000	16.650.000
Analisis Data	Transport Lokal	transport ke lapangan selama 30 hari kerja untuk 3 orang	OK (kali)	84	50.000	4.200.000
Analisis Data	Transport Lokal	transport ke lapangan selama 30 hari kerja untuk 3 orang	OK (kali)	90	50.000	4.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	AC 2 pk	Unit	3	5.517.000	16.551.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	AC 1,5 pk	Unit	3	4.000.000	12.000.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	air laut per liter	Unit	500	5.000	2.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	AC 1 pk	Unit	3	3.000.000	9.000.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	Aluminium foil coated sheet	Unit	27	920.000	24.840.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	alat pengarah aliran udara	Unit	9	150.000	1.350.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	AC 2 pk	Unit	3	5.698.000	17.094.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	AC 1,5 pk	Unit	3	4.925.000	14.775.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	air laut per liter	Unit	500	8.500	4.250.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	alat pengarah aliran udara	Unit	9	225.000	2.025.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	Aluminium foil coated sheet	Unit	27	920.000	24.840.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	AC 1 pk	Unit	3	3.768.000	11.304.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	bak penampung air bersih berbahan arkilik	Unit	3	750.000	2.250.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	bak penampung air laut berbahan arkilik	Unit	9	750.000	6.750.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	bak penampung air laut berbahan arkilik	Unit	9	750.000	6.750.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	bak penampung air bersih berbahan arkilik	Unit	9	750.000	6.750.000

Kelompok	Komponen	Item	Satuan	Vol.	Biaya Satuan	Total
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	dudukan AC	Unit	9	1.200.000	10.800.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	dudukan VGs	Unit	3	550.000	1.650.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	dudukan AC	Unit	9	1.500.000	13.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	dudukan VGs	Unit	9	550.000	4.950.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	heat exchanger (HE)	Unit	3	4.500.000	13.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	heat exchanger (HE)	Unit	9	4.500.000	40.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	kondensor	Unit	18	3.250.000	58.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	kondensor	Unit	18	3.250.000	58.500.000
Bahan	Barang Persediaan	mikrokontroler ESP32	Unit	9	1.200.000	10.800.000
Bahan	Barang Persediaan	mikrokontroler ESP32	Unit	9	1.500.000	13.500.000
Bahan	Barang Persediaan	pompa anti korosi	Unit	9	1.700.000	15.300.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	pipa saluran air 0,5 inch 2 m	Unit	3	1.200.000	3.600.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	pipa pendingin 0,5 inch 2 m	Unit	3	1.500.000	4.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	pipa saluran uap 0,5 inch 2 m	Unit	6	1.500.000	9.000.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	Polyvinyl acetate sheet transparan (Ketebalan 3 mm, ukuran 1x2 m)	Unit	18	850.000	15.300.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	pipa saluran air 0,5 inch 2 m	Unit	9	1.500.000	13.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	pipa pendingin 0,5 inch 2 m	Unit	9	1.857.000	16.713.000
Bahan	Barang Persediaan	pompa anti korosi	Unit	9	1.850.000	16.650.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	pipa saluran uap 0,5 inch 2 m	Unit	9	1.500.000	13.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	Polyvinyl acetate sheet transparan (Ketebalan 3 mm, ukuran 1x2 m)	Unit	36	850.000	30.600.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	saluran over flow	Unit	9	2.150.000	19.350.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor temperatur PT-100	Unit	32	125.000	4.000.000

Kelompok	Komponen	Item	Satuan	Vol.	Biaya Satuan	Total
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor tekanan DS18B20	Unit	9	350.000	3.150.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sealent	Unit	27	75.000	2.025.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor kelembaban BMP280	Unit	25	250.000	6.250.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor air	Unit	18	150.000	2.700.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	saluran udara dan konektor	Unit	9	950.000	8.550.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	saluran udara dan konektor	Unit	9	1.250.000	11.250.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	saluran over flow	Unit	9	2.150.000	19.350.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor temperatur PT-100	Unit	64	125.000	8.000.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor tekanan DS18B20	Unit	18	350.000	6.300.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sealent	Unit	27	75.000	2.025.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor kelembaban BMP280	Unit	45	250.000	11.250.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor air	Unit	18	150.000	2.700.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	timbangan digital	Unit	3	98.000	294.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	timbangan digital	Unit	9	98.000	882.000
Bahan	Barang Persediaan	UNI-T UT333 Thermometer Hygrometer Humidity Ukur Suhu Kelembaban Udara	Unit	3	1.500.000	4.500.000
Bahan	Barang Persediaan	UNI-T UT333 Thermometer Hygrometer Humidity Ukur Suhu Kelembaban Udara	Unit	9	1.750.000	15.750.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	vortex generators	Unit	9	250.000	2.250.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	vortex generators	Unit	9	450.000	4.050.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Biaya konsumsi rapat	konsumsi pembuatan luaran	OH	48	25.000	1.200.000
Pelaporan Hasil	Biaya	konsumsi pembuatan	OH	48	25.000	1.200.000

Kelompok	Komponen	Item	Satuan	Vol.	Biaya Satuan	Total
Penelitian dan Luaran Wajib	konsumsi rapat	luaran				
Pengumpulan Data	Biaya konsumsi	pengambilan data lapangan	OH	270	25.000	6.750.000
Pengumpulan Data	Biaya konsumsi	pengambilan data lapangan	OH	320	25.000	8.000.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Biaya Pendaftaran KI	registrasi paten	Paket	1	3.500.000	3.500.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Biaya Pendaftaran KI	registrasi paten	Paket	1	3.500.000	3.500.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Biaya pembuatan dokumen uji produk	SOP	Paket	3	4.500.000	13.500.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Biaya pembuatan dokumen uji produk	SOP	Paket	3	4.500.000	13.500.000
Pengumpulan Data	HR Pembantu Lapangan	pembantu lapangan untuk teknis perbaikan dan pengujian	OH	60	50.000	3.000.000
Pengumpulan Data	HR Pembantu Lapangan	pembantu lapangan untuk teknis perbaikan dan pengujian	OH	60	50.000	3.000.000
Pengumpulan Data	Transport	pengambilan data lapangan	OK (kali)	270	50.000	13.500.000
Pengumpulan Data	Transport	pengambilan data lapangan	OK (kali)	320	50.000	16.000.000
Sewa Peralatan	Kendaraan	pembelian barang dan angkut barang	OK (kali)	8	350.000	2.800.000
Sewa Peralatan	Kendaraan	pembelian barang dan angkut barang	OK (kali)	8	350.000	2.800.000

Tahun 2 Total Rp 400.510.000,00

Kelompok	Komponen	Item	Satuan	Vol.	Biaya Satuan	Total
Analisis Data	Biaya analisis sampel	uji sistem di sucofindo	Unit	12	5.500.000	66.000.000
Analisis Data	Biaya analisis sampel	uji kualitas air	Unit	12	1.750.000	21.000.000
Analisis Data	Biaya analisis sampel	uji usability sistem	Unit	12	1.450.000	17.400.000
Analisis Data	Transport Lokal	analisis data fgd	OK (kali)	150	50.000	7.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	alat pengarah aliran udara	Unit	3	750.000	2.250.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	air laut	Unit	500	8.500	4.250.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	AC 1 pk	Unit	1	3.760.000	3.760.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	aluminium foil coated sheet	Unit	6	920.000	5.520.000
Bahan	Barang Persediaan	AC 1,5 pk	Unit	1	4.500.000	4.500.000
Bahan	Barang	AC 2 pk	Unit	1	5.330.000	5.330.000

Kelompok	Komponen	Item	Satuan	Vol.	Biaya Satuan	Total
	Persediaan					
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	bak penampung air laut berbahan arkilik	Unit	3	850.000	2.550.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	bak penampung air bersih berbahan arkilik	Unit	3	750.000	2.250.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	dudukan AC	Unit	3	1.750.000	5.250.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	dudukan VGs	Unit	3	650.000	1.950.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	heat exchanger (HE)	Unit	3	4.850.000	14.550.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	kondensor	Unit	3	3.550.000	10.650.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	mikrokontroler ESP 32	Unit	3	1.500.000	4.500.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	pipa pendingin 0,5 inci 2 m	Unit	3	1.857.000	5.571.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	polyvinyl acetate sheet transparab (keteebalan 3 mm, ukuran 1 x 2 m)	Unit	9	850.000	7.650.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	pompa anti korosi	Unit	3	1.949.000	5.847.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	pipa saluran air 0,5 inci 2 m	Unit	3	1.756.000	5.268.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	pipa saluran uap 0,5 inci 2 m	Unit	3	1.790.000	5.370.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor kelembaban BMP 280	Unit	9	275.000	2.475.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	saluran over flow	Unit	3	2.150.000	6.450.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor tekanan DS18B20	Unit	9	350.000	3.150.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor air	Unit	3	175.000	525.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sealant	Unit	6	75.000	450.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	sensor temperatur PT-100	Unit	30	125.000	3.750.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	saluran udara dan konektor	Unit	3	1.550.000	4.650.000
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	timbangan digital	Unit	3	98.000	294.000
Bahan	Bahan	UNI-T UT 333	Unit	3	2.850.000	8.550.000

Kelompok	Komponen	Item	Satuan	Vol.	Biaya Satuan	Total
	Penelitian (Habis Pakai)	tehermometer Hygrometer Humudity				
Bahan	Bahan Penelitian (Habis Pakai)	vortex generators	Unit	3	550.000	1.650.000
Honorarium Tim Pelaksana	Honorarium Ketua Pelaksana	5f5da184-04e3-4825-9d00-54c5554ba246	Org/Bln	8	3.500.000	28.000.000
Honorarium Tim Pelaksana	Honorarium Anggota Pelaksana	5f01f85a-0341-4a34-9fcb-10b246413950	Org/Bln	8	2.000.000	16.000.000
Honorarium Tim Pelaksana	Honorarium Anggota Pelaksana	80eaf0d0-04f5-4aa8-b5b6-5899382220a9	Org/Bln	8	2.000.000	16.000.000
Honorarium Tim Pelaksana	Honorarium Anggota Pelaksana	a0cc53d7-509e-4362-b148-ebcaf460b76a	Org/Bln	8	2.000.000	16.000.000
Honorarium Tim Pelaksana	Honorarium Anggota Non Dosen	deaf93c7-bb56-4d70-aa2c-a04bdd8cce8b	Org/Bln	8	1.000.000	8.000.000
Honorarium Tim Pelaksana	Honorarium Anggota Non Dosen	d272c725-160b-4bfa-be12-8d2baa1fc997	Org/Bln	8	1.000.000	8.000.000
Pengumpulan Data	Biaya konsumsi	konsumsi pengamnilan data lapangan	OH	180	25.000	4.500.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Biaya pembuatan dokumen uji produk	pengurusan SNI	Paket	3	4.000.000	12.000.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Biaya konsumsi rapat	rapat pembuatan laporan feasibility study	OH	30	25.000	750.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Biaya pembuatan dokumen uji produk	SOP	Paket	3	3.000.000	9.000.000
Pelaporan Hasil Penelitian dan Luaran Wajib	Biaya pembuatan dokumen uji produk	uji feasibility	Paket	3	3.000.000	9.000.000
Pengumpulan Data	HR Pembantu Lapangan	pembantu lapangan untuk pengambilan data di pulau 3 lokasi (sebanyak 2 orang selama 30 hari kerja)	OH	180	25.000	4.500.000
Pengumpulan Data	HR Petugas Survei	survei identifikasi kebutuhan pasar sebanyak 50 responden untuk setiap lokasi (ada 3 lokasi)	OH/OR	150	5.000	750.000
Pengumpulan Data	Penginapan	home stay pulau tidung (1 bulan) untuk pengambilan data	OH	1	1.850.000	1.850.000
Pengumpulan Data	Penginapan	homestay pulau pari selama 1 bulan untuk pengambilan data	OH	1	1.850.000	1.850.000
Pengumpulan Data	Penginapan	homestay 1 bulan untuk pengambilan data di pangandaran pelabuhan ratu	OH	1	1.850.000	1.850.000
Pengumpulan Data	Transport	bis ke lokasi pengambilan data ke pangandaran pelabuhan	OK (kali)	12	125.000	1.500.000

Kelompok	Komponen	Item	Satuan	Vol.	Biaya Satuan	Total
		ratu 6 orang (PP)				
Pengumpulan Data	Tiket	kapal ke lokasi pengambilan data pulau tidung 6 orang (PP)	OK (kali)	12	350.000	4.200.000
Pengumpulan Data	Tiket	kapal laut untuk pengambilan data ke pulau pari 6 orang (PP)	OK (kali)	12	350.000	4.200.000
Pengumpulan Data	Transport	pengambilan data lapangan	OK (kali)	180	50.000	9.000.000
Sewa Peralatan	Kendaraan	untuk pembelian dan pengangkutan barang serta produk untuk pengujian ke lokasi uji	OK (kali)	6	450.000	2.700.000

*. KEMAJUAN PENELITIAN

A. RINGKASAN

Keterbatasan akses air bersih di wilayah pesisir Indonesia masih menjadi permasalahan utama, sementara penggunaan air conditioner (AC) rumah tangga terus meningkat akibat kenaikan suhu lingkungan. Panas buang AC yang selama ini terlepas ke lingkungan berpotensi dimanfaatkan sebagai sumber energi alternatif untuk proses desalinasi air laut. Pemanfaatan panas buang ini tidak hanya menawarkan solusi penyediaan air bersih, tetapi juga meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi yang lebih ramah lingkungan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan unit desalinasi air laut berbasis panas buang AC rumah tangga yang efisien dan aplikatif serta mencapai Tingkat Kesiapan Teknologi (TKT) 4, yaitu tahap validasi teknologi pada skala laboratorium. Untuk mencapai tujuan tersebut, penelitian dilaksanakan melalui tahapan perancangan dan pembuatan prototipe awal, pengujian eksperimental dengan variasi luas penampang saluran udara dan penerapan vortex generator, serta evaluasi kinerja sistem meliputi suhu, kelembapan, laju penguapan, dan kinerja AC yang dinyatakan dengan Coefficient of Performance (COP). Hasil pengujian kemudian divalidasi menggunakan simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) guna memastikan keandalan dan konsistensi kinerja sistem.

Luaran yang ditargetkan dalam penelitian ini meliputi prototipe unit desalinasi air laut skala laboratorium serta kekayaan intelektual berupa paten berjudul “Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner (AC)” yang telah diregistrasikan di Direktorat Jenderal Kekayaan Intelektual (DJKI) dengan nomor permohonan P00202509515 pada tanggal 27 September 2025.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa prototipe unit desalinasi berbasis panas buang AC berfungsi dengan baik dan tervalidasi pada skala laboratorium (TKT 4). Sistem mampu menurunkan suhu udara buang AC sebesar 6–11°C dan meningkatkan laju penguapan air laut hingga lebih dari 50% melalui penerapan vortex generator, tanpa menurunkan kinerja utama AC yang tetap berada pada kisaran COP 3–4. Validasi antara hasil eksperimen dan simulasi CFD menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan nilai $R^2 > 0,95$, yang menegaskan bahwa teknologi ini andal dan layak untuk dikembangkan ke tahap selanjutnya.

B. KATA KUNCI

air_bersih; desalinasi; pendingin_udara; panas_buang; vortex_generators
false

Pengisian poin C sampai dengan poin H mengikuti template berikut dan tidak dibatasi jumlah kata atau halaman namun disarankan sesingkat mungkin. Dilarang menghapus/modifikasi template ataupun menghapus penjelasan di setiap poin.

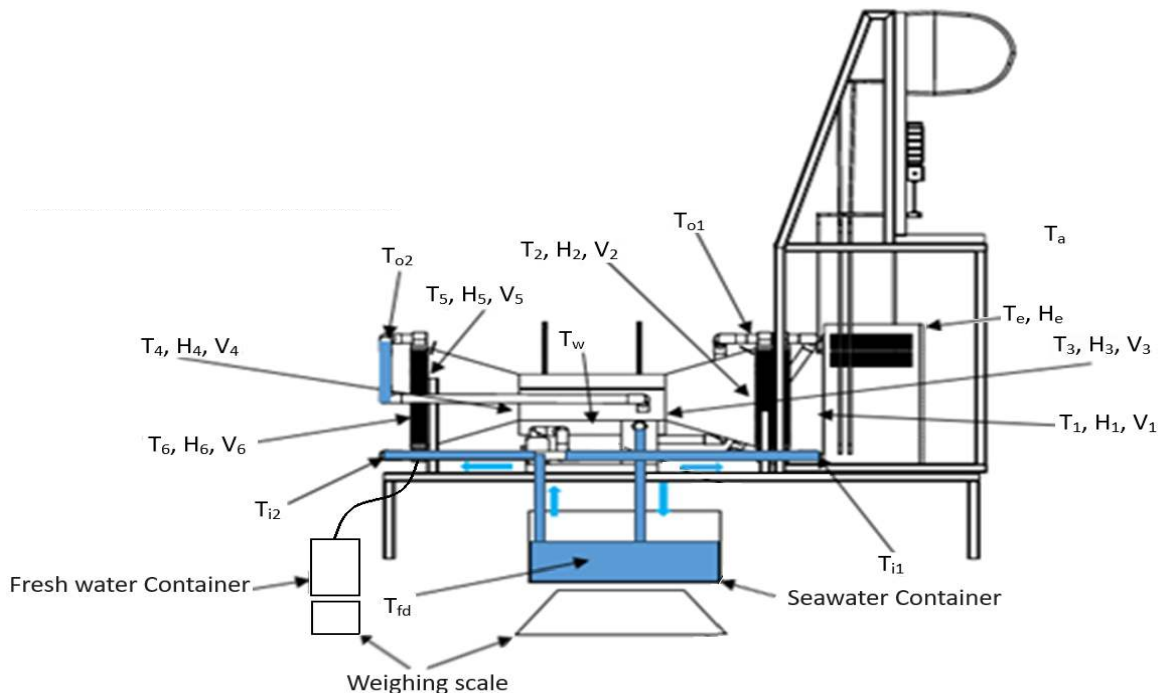
C. HASIL PELAKSANAAN PENELITIAN: Tuliskan secara ringkas hasil pelaksanaan penelitian yang telah dicapai sesuai tahun pelaksanaan penelitian. Penyajian meliputi data, hasil analisis, dan capaian luaran (wajib dan atau tambahan). Seluruh hasil atau capaian yang dilaporkan harus berkaitan dengan tahapan pelaksanaan penelitian sebagaimana direncanakan pada proposal. Penyajian data dapat berupa gambar, tabel, grafik, dan sejenisnya, serta analisis didukung dengan sumber pustaka primer yang relevan dan terkini.

Pada tahun pertama, penelitian difokuskan pada peningkatan Tingkat Kesiapterapan Teknologi (TKT) dari level 3 ke level 4 melalui serangkaian tahapan berkesinambungan, meliputi perancangan sistem, pembuatan prototipe *low-fidelity*, uji laboratorium (*bench testing*), persiapan uji usability, dan penyusunan luaran.

1. Perancangan Sistem

Desain unit desalinasi skala rumah tangga telah dikembangkan dengan memanfaatkan panas buang dari kondensor AC split (1–2 PK) yang diintegrasikan ke dalam sistem pemulihan panas. Sistem ini mencakup ruang evaporasi, kondensor pendingin, serta opsi penambahan *vortex generator* (VGs).

Sistem dirancang dengan integrasi sensor berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk pemantauan suhu, kelembapan, tekanan, dan debit air secara real-time, seperti terlihat pada Gambar 1. Pemantauan ini menjadi dasar dalam evaluasi kinerja selama pengujian dan operasional.



Gambar 1. Perancangan Sistem

Perancangan ini memanfaatkan **energi panas buang** dari AC yang sebelumnya tidak termanfaatkan. Konsep ini selaras dengan strategi *waste heat recovery* yang banyak diterapkan pada sistem pendingin dan industri proses [1]. Integrasi VGs dipilih

berdasarkan studi numerik yang menunjukkan peningkatan perpindahan panas hingga 20–30% pada penukar kalor mikro [2]. Dengan menambahkan VGs, sistem rumah tangga diharapkan mendapatkan peningkatan laju evaporasi signifikan tanpa membutuhkan energi tambahan. Integrasi IoT juga sejalan dengan perkembangan *smart water management*, sebagaimana disampaikan oleh Marugan et al (2023), bahwa sistem berbasis IoT mampu meningkatkan efisiensi pemantauan dan mengurangi risiko kegagalan sistem [3]

2. Pembuatan Prototipe *Low-Fidelity*

Prototipe *low-fidelity* telah berhasil dikembangkan untuk memvalidasi kelayakan konsep (*proof-of-concept*) sebelum dilakukan pengembangan lebih lanjut menuju prototipe yang lebih representatif.

Tahapan ini memastikan integrasi aliran panas buang dari kondensor AC ke ruang evaporasi berfungsi stabil sesuai rancangan. Selain itu, tahapan ini memfasilitasi observasi fenomena penguapan pada fase awal pengembangan.



Gambar 2 Prototipe

3. Uji Laboratorium (*Bench Testing*) dan Analisis Data

Pengujian laboratorium dilakukan untuk mengevaluasi performa termal, dampak integrasi terhadap kinerja AC, kapasitas produksi air bersih, serta kualitas air hasil kondensasi.

Hasil utama menunjukkan COP AC tetap stabil pada kisaran 3,1–3,3, sehingga integrasi unit desalinasi tidak menurunkan kinerja pendinginan secara signifikan pada kondisi uji.

Ringkasan data hasil uji laboratorium disajikan sebagai berikut.

Tabel 1. Hasil Uji Laboratorium

Parameter Uji	Data Hasil Pengujian
Koefisien Performansi (CoP) AC	3,1 – 3,3 (stabil)

Parameter Uji	Data Hasil Pengujian
Suhu panas buang (°C)	42 – 46
Laju evaporasi tanpa VGs (ml/jam)	35 – 40 (rata-rata 37,5)
Laju evaporasi dengan VGs (ml/jam)	55 – 62 (rata-rata 58,5)
Produksi air bersih harian (liter)	1,2 – 1,5
Konduktivitas air (μS/cm)	150 – 180 (rata-rata 165)
Waktu start-up (menit)	±45

Hasil uji menunjukkan bahwa integrasi desalinasi tidak menurunkan kinerja AC. COP tetap berada di kisaran 3,1–3,3 pada sistem AC terintegrasi [4]. VGs terbukti meningkatkan evaporasi $\pm 57\%$ [5]. Produksi air bersih harian (1,2–1,5 L) memenuhi target untuk skala rumah tangga kecil [6]. Kualitas air hasil kondensasi (150–180 $\mu\text{S/cm}$) jauh di bawah standar WHO ($<500 \mu\text{S/cm}$), membuktikan bahwa sistem efektif memisahkan garam [7]. Kendala utama adalah waktu start-up ± 45 menit, yang relatif lama di mana sistem *heat pump* berbasis desalinasi memerlukan fase transien awal 30–50 menit sebelum mencapai kondisi stabil [8].

Untuk memperjelas pengaruh vortex generator (VG) pada konfigurasi pemanfaatan panas buang kondensor, ringkasan hasil uji tanpa dan dengan VG disajikan pada tabel berikut.

Tabel 2. Hasil Uji Coba Menggunakan Kondensor

Koefisien performansi (COP) AC	3,1–3,3	3,1–3,3	Stabil, tidak menurunkan kinerja AC
Suhu panas buang (°C)	42–46	42–46	Sesuai kebutuhan proses evaporasi bersuhu rendah
Laju evaporasi (ml/jam)	35–40	55–62	VGs meningkatkan $\pm 57\%$
Produksi air bersih (liter/hari)	1,0–1,2	1,2–1,5	Sesuai target rumah tangga
Konduktivitas air (μS/cm)	170–200	150–180	Jauh di bawah batas acuan WHO ($<500 \mu\text{S/cm}$)
Waktu start-up (menit)	±45	±45	Relatif lama (perlu optimasi)

Berdasarkan Tabel 2 menunjukkan ketika panas buang diarahkan ke unit desalinasi, sistem mampu menghasilkan air bersih dengan volume 1,0–1,2 L/hari. COP AC sedikit turun menjadi 3,1–3,3, namun masih dalam kisaran normal sehingga kinerja pendinginan tidak terganggu. Suhu panas buang berada pada 42–46 °C, sesuai literatur yang menyebutkan rentang optimal 40–60 °C untuk desalinasi berbasis panas buang [9]. Kualitas air hasil kondensasi memiliki konduktivitas 170–200 $\mu\text{S/cm}$, jauh di bawah ambang batas WHO ($<500 \mu\text{S/cm}$). Namun, laju evaporasi hanya 35–40 ml/jam, menunjukkan keterbatasan efisiensi akibat aliran udara kondensor yang masih dominan laminar [10]. Penambahan VGs menghasilkan peningkatan signifikan pada laju

evaporasi menjadi 55–62 ml/jam, atau meningkat $\pm 57\%$ dibandingkan tanpa VGs. Produksi air bersih naik menjadi 1,2–1,5 L/hari dengan kualitas air lebih baik (150–180 $\mu\text{S}/\text{cm}$). COP AC tetap stabil pada kisaran 3,1–3,3, menunjukkan bahwa integrasi VGs tidak menambah beban signifikan pada sistem. VGs dapat meningkatkan laju perpindahan panas hingga 50–60% pada sistem desalinasi [11], dengan peningkatan efisiensi 15–25% pada penukar panas mikro dengan penambahan VGs [12].

4. Uji *Usability* (Persiapan Pelaksanaan)

Uji *usability* belum sepenuhnya dilaksanakan pada tahun pertama karena prototipe masih dalam tahap penyelesaian agar tampilan dan aspek operasional lebih representatif bagi responden. Metode yang disiapkan meliputi kuesioner dan wawancara semi-terstruktur dengan target responden calon pengguna rumah tangga dan teknisi AC. Fokus evaluasi meliputi kemudahan pemasangan, pengoperasian, serta kejelasan dashboard IoT. Potensi penerimaan pengguna diperkirakan cukup tinggi, yang menekankan pentingnya integrasi IoT dan kemudahan operasional dalam adopsi teknologi desalinasi [13].

5. Penyusunan Luaran Penelitian (Tahun Pertama)

Luaran tahun pertama telah disusun sesuai target, yaitu prototipe low-fidelity yang telah diuji di laboratorium sebagai bukti validasi fungsi (indikator peningkatan menuju TKT 4), penyusunan SOP awal, serta dokumen hasil uji laboratorium sebagai dukungan verifikasi kinerja. Selain itu, luaran wajib berupa paten telah didaftarkan pada DJKI dengan bukti registrasi No. Permohonan P00202509515 (27 September 2025)..

D. STATUS LUARAN: Tuliskan jenis, identitas dan status ketercapaian setiap luaran wajib dan luaran tambahan (jika ada) yang dijanjikan. Jenis luaran dapat berupa publikasi, perolehan kekayaan intelektual, atau luaran lainnya yang telah dijanjikan pada proposal. Uraian status luaran harus didukung dengan bukti kemajuan ketercapaian luaran sesuai dengan luaran yang dijanjikan. Lengkapi isian jenis luaran yang dijanjikan serta mengunggah bukti dokumen ketercapaian luaran melalui BIMA.

Pada tahun pertama, penelitian menghasilkan beberapa luaran sesuai yang dijanjikan dalam proposal, mencakup luaran wajib dan luaran tambahan. Luaran wajib terdiri atas dua jenis: (1) prototipe low *fidelity* (TKT 4) berupa unit desalinasi berbasis panas buang AC yang telah diintegrasikan dengan vortex generators (VGs) dan sistem IoT; prototipe telah berhasil dirakit serta menjalani uji awal di laboratorium, namun masih berada pada tahap finishing dan perakitan, sementara data pengujian masih dilengkapi untuk memperoleh hasil yang lebih komprehensif dan akan disajikan secara penuh pada laporan berikutnya; capaian ini menunjukkan kelayakan sistem serta peningkatan TKT dari level 3 menuju level 4; dan (2) luaran kekayaan intelektual berupa paten berjudul “Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner (AC)” yang telah diregistrasikan di DJKI dengan nomor permohonan P00202509515 tertanggal 27 September 2025; bukti registrasi resmi telah diterbitkan sehingga luaran ini dinyatakan tercapai sepenuhnya. Luaran tambahan meliputi dokumen pendukung, yaitu: draft SOP operasional awal yang masih disusun dan ditargetkan selesai pada awal tahun kedua sebagai acuan pengoperasian standar sistem; laporan hasil uji laboratorium yang masih dalam proses pelengkapan seiring penyempurnaan data performa termal, laju evaporasi, kualitas air hasil kondensasi, serta parameter operasional AC; dan data usability test yang belum dapat dilaksanakan secara penuh karena prototipe belum selesai difinishing, sehingga pengujian dengan calon pengguna direncanakan setelah alat siap digunakan.

E. PERAN MITRA: Tuliskan realisasi kerjasama dan kontribusi Mitra baik *in-kind* maupun *in-cash* serta mengunggah bukti dokumen pendukung sesuai dengan kondisi yang sebenarnya. Bukti dokumen realisasi kerjasama dengan Mitra dapat diunggah melalui BIMA.

Catatan:

Bagian ini wajib diisi untuk penelitian terapan, untuk penelitian dasar (KATALIS, Fundamental, Pascasarjana, dan Dosen Pemula) boleh mengisi bagian ini (tidak wajib) jika melibatkan mitra dalam pelaksanaan penelitiannya

Pada tahun pertama, tim peneliti bekerja sama dengan PT Dwiputra Multigemilang sebagai mitra industri untuk mendukung proses pengembangan prototipe. Dukungan *in-kind* yang diberikan mitra berupa ketersediaan perlengkapan dan kebutuhan bengkel untuk perakitan, seperti komponen mekanis, sistem perpipaan, serta material penunjang lainnya. Selain itu, mitra juga mendampingi secara teknis melalui konsultasi pada tahap desain dan saat integrasi sistem desalinasi dengan unit pendingin udara (AC). PT Dwiputra Multigemilang turut membuka akses fasilitas bengkel kerja untuk perakitan awal, sehingga proses konstruksi bisa berjalan lebih cepat dan efisien. Secara keseluruhan, kolaborasi ini membantu mempercepat pekerjaan teknis sekaligus memperkuat kesiapan implementasi prototipe, serta menunjukkan dukungan nyata mitra industri terhadap penelitian terapan berorientasi teknologi tepat guna. Dokumen realisasi kerja sama telah disiapkan dan akan diunggah melalui sistem BIMA sesuai ketentuan pelaporan luaran penelitian..

F. KENDALA PELAKSANAAN PENELITIAN: Tuliskan kesulitan atau hambatan yang dihadapi selama melakukan penelitian dan mencapai luaran yang dijanjikan, termasuk penjelasan jika pelaksanaan penelitian dan luaran penelitian tidak sesuai dengan yang direncanakan atau dijanjikan.

Hambatan utama terdapat pada **proses perakitan prototipe low-fidelity**. Walaupun seluruh komponen sudah tersedia, proses perakitan memerlukan waktu lebih lama dari yang diperkirakan. Hal ini disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain kompleksitas integrasi antara sistem desalinasi dengan unit AC, penyesuaian desain mekanis untuk memastikan aliran panas buang dapat dimanfaatkan secara optimal, serta kebutuhan modifikasi ulang pada bagian perpipaan dan sistem kondensasi agar sesuai dengan kondisi nyata. Selain itu, proses perapian dan finishing membutuhkan ketelitian ekstra karena prototipe harus memenuhi aspek keamanan, keandalan, dan kemudahan penggunaan sebelum diuji lebih lanjut.

Keterlambatan dalam penyelesaian prototipe ini berdampak langsung pada kegiatan pengujian laboratorium. Uji performa hanya dapat dilakukan secara terbatas, sehingga data hasil uji yang diperoleh masih perlu dilengkapi pada periode berikutnya agar lebih komprehensif. Demikian pula, penyusunan SOP operasional awal belum dapat difinalisasi karena prototipe belum sepenuhnya selesai, sehingga SOP baru tersedia dalam bentuk draft. Hambatan lainnya terdapat pada **usability test**, yang belum dapat dilakukan sesuai rencana karena prototipe masih dalam tahap finishing. Akibatnya, keterlibatan calon pengguna dalam memberikan umpan balik belum dapat diwujudkan pada tahun pertama, dan baru akan dijadwalkan ulang pada awal tahun kedua.

Meskipun demikian, salah satu luaran wajib berupa **paten** tetap dapat direalisasikan tepat waktu. Paten dengan judul “*Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner (AC)*” berhasil diregistrasikan di DJKI dengan nomor permohonan

P00202509515 pada tanggal **27 September 2025**, menunjukkan adanya kebaruan invensi dari penelitian ini.

Dengan demikian, hambatan yang dihadapi terutama bersumber dari kompleksitas teknis dalam perakitan prototipe, bukan dari ketersediaan komponen. Hal ini menjadi pengalaman penting untuk memperbaiki manajemen waktu, meningkatkan koordinasi teknis, serta menyempurnakan desain agar proses pengembangan prototipe *high-fidelity* pada tahun kedua dapat berjalan lebih efisien.

G. RENCANA TAHAPAN SELANJUTNYA: Tuliskan dan uraikan rencana penelitian selanjutnya berdasarkan indikator luaran yang telah dicapai, rencana realisasi luaran wajib yang dijanjikan dan tambahan (jika ada) di tahun berikutnya serta *roadmap* penelitian keseluruhan. Pada bagian ini diperbolehkan untuk melengkapi penjelasan dari setiap tahapan dalam metoda yang akan direncanakan termasuk jadwal berkaitan dengan strategi untuk mencapai luaran seperti yang telah dijanjikan dalam proposal. Jika diperlukan, penjelasan dapat juga dilengkapi dengan gambar, tabel, diagram, serta pustaka yang relevan. Jika laporan kemajuan merupakan laporan pelaksanaan tahun terakhir, pada bagian ini dapat dituliskan rencana penyelesaian target yang belum tercapai.

Berdasarkan capaian penelitian tahun pertama, prototipe *low fidelity* unit desalinasi berbasis panas buang AC rumah tangga yang terintegrasi dengan vortex generators (VGs) dan Internet of Things (IoT) telah berhasil dibuat dan diuji pada skala laboratorium. Hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa sistem mampu menguapkan air laut dan menghasilkan air bersih tanpa mengganggu performa utama AC. Selain itu, dokumen paten telah diajukan sebagai luaran wajib, serta draft Standar Operasional Prosedur (SOP) operasional telah disusun sebagai acuan awal penggunaan sistem. Dengan demikian, indikator capaian TKT 4 telah berhasil dipenuhi sesuai dengan target tahun pertama.

Pada tahun kedua, penelitian difokuskan untuk meningkatkan *fidelitas* prototipe menuju TKT 5 dengan tujuan utama menghasilkan sistem yang tidak hanya berfungsi pada lingkungan laboratorium, tetapi juga mampu diuji di kondisi mendekati nyata. Rencana realisasi luaran wajib pada tahun kedua meliputi: (1) prototipe *high fidelity* dengan integrasi penuh antara sistem desalinasi, panas buang AC, vortex generators, dan sistem IoT; (2) laporan feasibility study yang mencakup aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan; (3) hasil validasi teknis oleh lembaga independen (SUCOFINDO) termasuk uji kualitas air hasil desalinasi sesuai SNI dan Permenkes No. 2 Tahun 2023; serta (4) dokumen SOP operasional final yang telah disesuaikan dengan hasil uji lapangan, seperti terlihat pada gambar 3 di bawah ini.

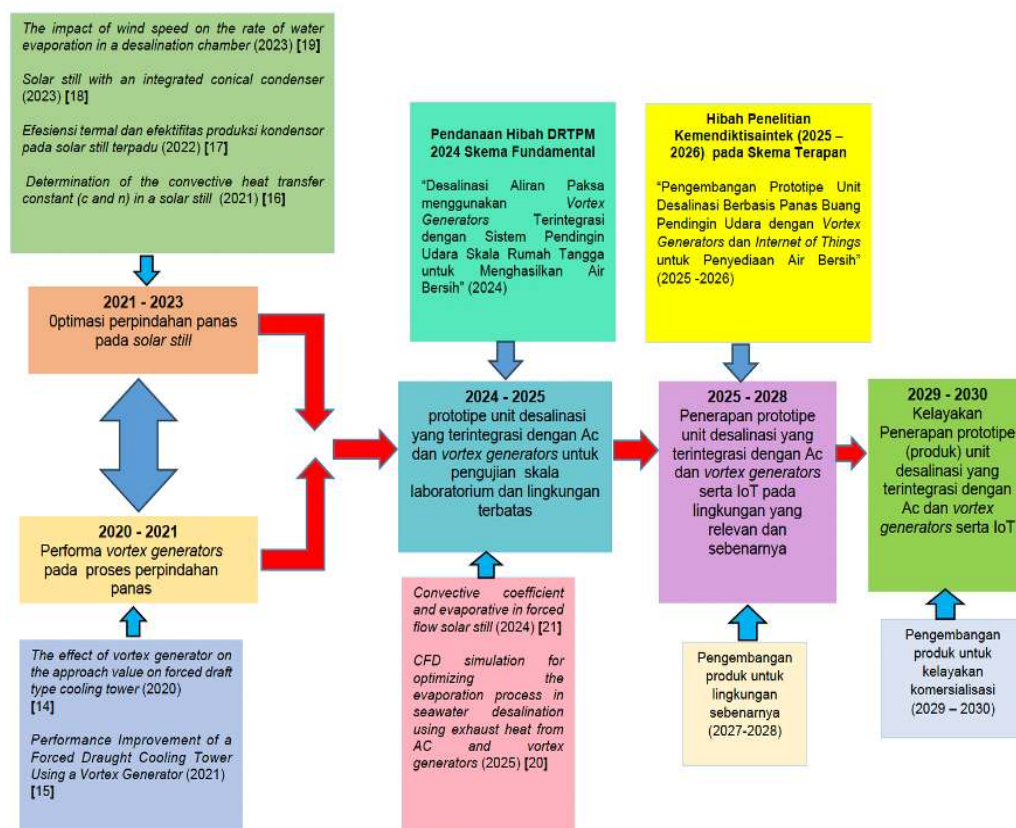


Gambar 3 Diagram Alir Penelitian Tahun Ke-2

Metode penelitian pada tahun kedua mencakup beberapa tahapan strategis. Tahap pertama adalah identifikasi kebutuhan pasar melalui survei lapangan di wilayah pesisir (Pulau Pari, Pulau Tidung, dan Pangandaran) untuk memperoleh data terkait preferensi pengguna, kondisi operasional, serta aspek sosial ekonomi. Data ini akan menjadi dasar dalam

penyusunan spesifikasi sistem. Tahap kedua adalah *feasibility study* yang dilakukan untuk menilai kelayakan teknis (efisiensi termal, kestabilan operasional), ekonomi (biaya produksi, operasional, dan penghematan air bersih), serta lingkungan (dampak terhadap ekosistem pesisir dan efisiensi energi). Tahap ketiga adalah pembuatan prototipe *high fidelity* melalui proses manufaktur, integrasi subsistem (penukar kalor AC, VG, sensor IoT, sistem kondensasi), serta kalibrasi perangkat di workshop mitra industri. Selanjutnya, dilakukan uji kelayakan sistem untuk menilai performa awal, kestabilan operasi, dan efektivitas integrasi. Tahap keempat adalah *uji usability* di lingkungan mendekati nyata, yang dilakukan dengan instalasi sekitar 9 unit prototipe di lokasi pesisir. Data teknis (temperatur, tekanan, kelembapan, volume air hasil desalinasi) dan non-teknis (*usability*, kepuasan pengguna) akan dikumpulkan untuk dianalisis. Hasil uji ini akan digunakan untuk penyempurnaan SOP operasional dan perawatan sistem. Tahap akhir adalah validasi sistem dan luaran yang dilaksanakan melalui audit oleh SUCOFINDO, meliputi pengujian kualitas air sesuai standar kesehatan, uji performa teknis, serta keamanan sistem IoT. Validasi ini akan menghasilkan sertifikat kelayakan teknis sebagai bukti kesiapan prototipe untuk hilirisasi. Dengan strategi ini, penelitian tahun kedua ditargetkan dapat menghasilkan sistem desalinasi berbasis panas buang AC yang efisien, stabil, *user-friendly*, dan siap diadopsi oleh masyarakat pesisir.

Secara keseluruhan, *roadmap* penelitian jangka panjang (2025–2030) telah disusun secara bertahap, seperti terlihat pada gambar 4 berikut ini.



Gambar 4. Roadmap Penelitian

5	Uji usability mendekati lingkungan sebenarnya / uji lapangan													
6	Pembuatan luaran													

Dengan capaian, rencana lanjutan, dan roadmap yang terintegrasi, penelitian ini diharapkan mampu memberikan kontribusi signifikan dalam menyediakan teknologi desalinasi air laut berbasis panas buang AC rumah tangga yang adaptif, berbiaya rendah, dan ramah lingkungan, serta mendukung pencapaian tujuan pembangunan berkelanjutan (SDGs), khususnya pada aspek air bersih (SDG 6) dan energi bersih (SDG 7).

H. DAFTAR PUSTAKA: Penyusunan Daftar Pustaka berdasarkan sistem nomor sesuai dengan urutan pengutipan. Hanya pustaka yang disitasi pada laporan kemajuan yang dicantumkan dalam Daftar Pustaka.

- [1] A. Attar and F. Albatati, "Analytical and experimental investigation of thermoelectric generators for low-grade waste heat recovery from air conditioning units," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, vol. 165, p. 109083, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.ICHEATMASSTRANSFER.2025.109083.
- [2] J. Kalizan and J. Tušek, "Caloric Micro-Cooling: Numerical modelling and parametric investigation," *Energy Convers Manag*, vol. 225, p. 113421, Dec. 2020, doi: 10.1016/J.ENCONMAN.2020.113421.
- [3] T. M. Murugan, R. Kiruba Shankar, P. Shivkumar, S. Raja Kumar, K. Gayathri, and A. Jeyam, "Monitoring and controlling the desalination plant using IoT," *Measurement: Sensors*, vol. 27, p. 100720, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.MEASEN.2023.100720.
- [4] G. Gong, W. Zeng, L. Wang, and C. Wu, "A new heat recovery technique for air-conditioning/heat-pump system," *Appl Therm Eng*, vol. 28, no. 17–18, pp. 2360–2370, Dec. 2008, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2008.01.019.
- [5] D. Mugisidi and O. Heriyani, "Improving the Performance of a Forced-flow Desalination Unit using a Vortex Generator," *CFD Letters*, vol. 16, no. 10, pp. 81–93, May 2024, doi: 10.37934/CFDL.16.10.8193.
- [6] M. B. Shafii, H. Jafargholi, and M. Faegh, "Experimental investigation of heat recovery in a humidification-dehumidification desalination system via a heat pump," *Desalination*, vol. 437, pp. 81–88, Jul. 2018, doi: 10.1016/J.DESAL.2018.03.004.
- [7] A. Amarloo and M. B. Shafii, "Enhanced solar still condensation by using a radiative cooling system and phase change material," *Desalination*, vol. 467, pp. 43–50, Oct. 2019, doi: 10.1016/J.DESAL.2019.05.017.
- [8] M. Mohanraj, L. Karthick, and R. Dhivagar, "Performance and economic analysis of a heat pump water heater assisted regenerative solar still using latent heat storage," *Appl Therm Eng*, vol. 196, p. 117263, Sep. 2021, doi: 10.1016/J.APPLTHERMALENG.2021.117263.

- [9] A. Anand, B. Unnikrishnan, J. Y. Mao, H. J. Lin, and C. C. Huang, "Graphene-based nanofiltration membranes for improving salt rejection, water flux and antifouling—A review," *Desalination*, vol. 429, pp. 119–133, Mar. 2018, doi: 10.1016/J.DESAL.2017.12.012.
- [10] O. Rud, O. Borisov, and P. Košovan, "Thermodynamic model for a reversible desalination cycle using weak polyelectrolyte hydrogels," *Desalination*, vol. 442, pp. 32–43, Sep. 2018, doi: 10.1016/J.DESAL.2018.05.002.
- [11] O. Heriyani, D. Mugisidi, and Rifky, "CFD simulation for optimizing the evaporation process in seawater desalination using exhaust heat from AC and vortex generators," *Desalination Water Treat*, vol. 322, p. 101145, Apr. 2025, doi: 10.1016/J.DWT.2025.101145.
- [12] K. Portal-Porras, U. Fernandez-Gamiz, E. Zulueta, R. Garcia-Fernandez, and O. Irigaray, "Parametric study of vortex generators on a fin-and-tube heat exchanger," *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, vol. 45, no. 4, pp. 10051–10072, Oct. 2023, doi: 10.1080/15567036.2023.2242809.
- [13] T. M. Murugan, R. Kiruba Shankar, P. Shivkumar, S. Raja Kumar, K. Gayathri, and A. Jeyam, "Monitoring and controlling the desalination plant using IoT," *Measurement: Sensors*, vol. 27, p. 100720, Jun. 2023, doi: 10.1016/J.MEASEN.2023.100720.
- [14] O. Heriyani, D. Mugisidi, P. H. Gunawan, and D. Apriliana Putri, "The effect of vortex generator on the approach value on forced draft type cooling tower," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 909, no. 1, 2020, doi: 10.1088/1757-899X/909/1/012016.
- [15] D. Mugisidi, O. Heriyani, P. H. Gunawan, and D. Apriani, "Performance improvement of a forced draught cooling tower using a vortex generator," *CFD Letters*, vol. 13, no. 1, pp. 45–57, 2021, doi: <https://doi.org/10.37934/cfdl.13.1.4557>.
- [16] D. Mugisidi, A. Rahman, P. H. Gunawan, and O. Heriyani, "DETERMINATION OF THE CONVECTIVE HEAT TRANSFER CONSTANT (C AND N) IN A SOLAR STILL," *Teknosains*, vol. 11, no. 1, pp. 1–12, 2021, [Online]. Available: <https://jurnal.ugm.ac.id/teknosains>
- [17] D. Mugisidi, A. Fajar, and H. Oktarina, "Peningkatan Efisiensi Dan Efektivitas Kondensor Pada Solar Still," *Teknosains*, vol. 12, no. 1, pp. 19–31, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.22146/teknosains.70731>.
- [18] D. Mugisidi, B. Fajar, S. Syaiful, and T. Utomo, "Solar Still with an Integrated Conical Condenser," *CFD Letters*, vol. 15, no. 8, pp. 122–134, Jun. 2023, doi: 10.37934/cfdl.15.8.122134.
- [19] Ristanto Wirangga, Dan Mugisidi, Adi Tegar Sayuti, and Oktarina Heriyani, "The Impact of Wind Speed on the Rate of Water Evaporation in a Desalination Chamber," *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, vol. 106, no. 1, pp. 39–50, Jun. 2023, doi: <https://doi.org/10.37934/arfmts.106.1.3950>.

- [20] D. Mugisidi and O. Heriyani, "Improving the Performance of a Forced-flow Desalination Unit using a Vortex Generator," *CFD Letters*, vol. 16, no. 10, pp. 81–93, Oct. 2024, doi: 10.37934/cfdl.16.10.8193.
- [21] O. Heriyani, D. Mugisidi, and Rifky, "CFD simulation for optimizing the evaporation process in seawater desalination using exhaust heat from AC and vortex generators," *Desalination Water Treat.*, vol. 322, p. 101145, Apr. 2025, doi: 10.1016/J.DWT.2025.10114
- .

KETERLIBATAN MITRA

Pada tahun pertama, tim peneliti menjalin kerja sama dengan PT. Dwiputra Multigemilang sebagai mitra industri. Kontribusi yang diberikan berupa dukungan **in-kind**, antara lain penyediaan peralatan bengkel untuk proses perakitan prototipe, mencakup komponen mekanis, sistem perpipaan, dan material penunjang lainnya. Selain itu, mitra juga memberikan konsultasi teknis dalam perancangan serta integrasi sistem desalinasi dengan unit pendingin udara (AC), serta menyediakan akses fasilitas bengkel kerja yang digunakan dalam proses konstruksi awal prototipe. Dukungan tersebut sangat membantu dalam mempercepat tahapan teknis penelitian sekaligus memperkuat aspek implementatif prototipe yang dikembangkan. Kolaborasi ini mencerminkan komitmen nyata dari mitra industri dalam mendukung penelitian terapan yang berorientasi pada solusi teknologi tepat guna. Bukti dokumen realisasi kerja sama dengan PT. Dwiputra Multigemilang telah disiapkan dan akan diunggah melalui sistem BIMA sesuai ketentuan pelaporan.









PENGEMBANGAN PROTOTYPE UNIT DESALINASI BERBASIS PANAS BUANG PENDINGIN UDARA DENGAN VORTEX GENERATORS DAN INTERNET OF THINGS UNTUK PENYEDIAAN AIR BERSIH

Fakultas Teknologi Industri dan Informatika
Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA

Skema: Penelitian Terapan – Luaran Prototipe
Dana Penelitian: Rp361.110.000,00

Ketua:
Dan Mugisidi / 0301126901

Anggota :
Oktarina Heriyani / 0305067702
Rifky / 0305046501
Akhmad Rizal Dzkrillah / 0311128701

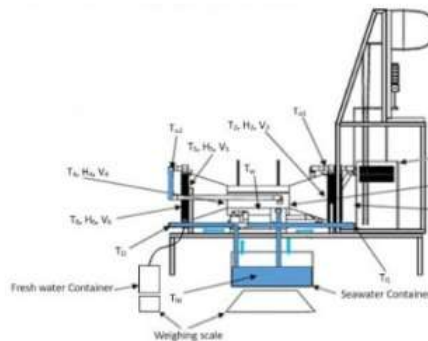
Kata Kunci: air_bersih; desalinasi; pendingin_udara; vortex_generators

RINGKASAN PENELITIAN

Ketersediaan air bersih masih menjadi permasalahan mendesak di wilayah pesisir Indonesia, di mana sebagian masyarakat bergantung pada air payau atau harus membeli air bersih dengan biaya tinggi. Di sisi lain, peningkatan suhu lingkungan mendorong penggunaan *air conditioner* (AC) rumah tangga secara masif, yang menghasilkan panas buang dan hingga kini belum dimanfaatkan secara optimal. Kondisi ini membuka peluang pemanfaatan panas buang AC sebagai sumber energi alternatif untuk desalinasi air laut.

Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan unit desalinasi air laut berbasis panas buang AC rumah tangga yang efisien, aplikatif, dan tidak mengganggu kinerja utama AC. Untuk meningkatkan performa desalinasi, sistem dilengkapi *vortex generators* guna memperkuat turbulensi aliran udara serta sistem pemantauan berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk monitoring kinerja secara *real-time*.

Metode penelitian dilakukan melalui eksperimen laboratorium dan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Pengujian dilakukan dengan variasi luas penampang saluran udara, baik dengan maupun tanpa *vortex generators*. Parameter yang dianalisis meliputi suhu, kelembapan relatif, laju penguapan air laut, serta kinerja AC yang dievaluasi menggunakan *Coefficient of Performance* (COP)



Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan panas buang AC mampu menurunkan suhu udara buang sebesar 6–11°C dan menghasilkan proses desalinasi yang stabil. Penerapan *vortex generators* meningkatkan laju penguapan air laut hingga lebih dari 50% dibandingkan sistem tanpa *vortex generators*. Kinerja AC tetap berada pada kondisi optimal dengan nilai COP berkisar 3–4. Validasi antara hasil eksperimen dan simulasi menunjukkan kesesuaian yang sangat baik dengan nilai $R^2 > 0,95$, menandakan sistem bekerja andal dan konsisten.

Luaran penelitian meliputi prototipe unit desalinasi air laut skala rumah tangga serta **kekayaan intelektual berupa paten berjudul "Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang *Air Conditioner* (AC)" yang telah diregistrasikan di DJKI dengan nomor permohonan P00202509515 pada tanggal 27 September 2025. Hasil ini menunjukkan bahwa teknologi yang dikembangkan layak dan berpotensi diterapkan sebagai solusi penyediaan air bersih berkelanjutan di wilayah pesisir.



Deskripsi

Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner (AC)

5

Bidang Teknik Invensi

Invensi ini berkaitan dengan unit desalinasi air laut berbasis panas buang *air conditioner* (AC), lebih khusus lagi invensi ini berhubungan dengan sistem desalinasi termal skala rumah tangga yang memanfaatkan panas buang dari *air conditioner* (AC) sebagai sumber energi utama dalam proses penguapan dan kondensasi untuk menghasilkan air tawar.

Latar Belakang Invensi

Invensi ini telah dikenal dan digunakan untuk menghasilkan air bersih melalui proses desalinasi air laut, baik dengan metode termal maupun membran. Sistem desalinasi termal seperti *Multi-Stage Flash* (MSF) dan *Multi-Effect Distillation* (MED) memanfaatkan energi panas untuk menguapkan air laut, sedangkan sistem desalinasi pasif, seperti *solar still* menggunakan radiasi matahari. Teknologi berbasis *membrane*, seperti *Reverse Osmosis* (RO) juga telah banyak digunakan secara global.

Invensi teknologi yang berkaitan dengan desalinasi yang telah diungkapkan sebagaimana terdapat pada paten CN104161290A dengan judul *sistem desalinasi yang memanfaatkan panas buang mesin diesel untuk pemanasan air laut*. Namun, invensi tersebut masih memiliki kekurangan berupa ketergantungan pada mesin pembakaran dan tidak sesuai untuk aplikasi skala kecil yang mandiri. Invensi lainnya sebagaimana diungkapkan pada paten US20140183184A1 dengan judul *sistem desalinasi yang menggabungkan energi surya dan panas buang* dimana diungkapkan pemanfaatan energi kombinasi untuk meningkatkan efisiensi evaporasi. Namun demikian, teknologi ini masih sangat tergantung pada intensitas cahaya matahari dan membutuhkan infrastruktur tambahan.

Namun demikian, invensi-invensi yang tersebut di atas masih mempunyai kelemahan-kelemahan dan keterbatasan, antara lain

konsumsi energi yang tinggi, biaya instalasi mahal, kebutuhan infrastruktur besar, serta kurang cocok untuk skala kecil, daerah terpencil, atau wilayah dengan keterbatasan pasokan listrik. Selanjutnya, invensi yang diajukan ini dimaksudkan untuk mengatasi permasalahan tersebut dengan cara menghadirkan "Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner", yaitu suatu sistem desalinasi yang memanfaatkan panas buang dari AC sebagai sumber energi utama. Unit ini dapat diterapkan tidak hanya di lingkungan rumah tangga, tetapi juga pada fasilitas skala kecil, komunitas, maupun daerah pesisir dengan keterbatasan sumber daya air tawar. Dengan demikian, invensi ini menawarkan solusi hemat energi, praktis, dan aplikatif untuk penyediaan air bersih yang lebih luas.

Uraian Singkat Invensi

Tujuan utama dari invensi ini adalah untuk mengatasi permasalahan yang telah ada sebelumnya, khususnya "Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner", dimana suatu Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner sesuai dengan invensi ini terdiri atas: a. saluran panas buang yang menyalurkan energi panas dari pendingin udara (air conditioner/AC) ke sistem desalinasi, b. ruang pemanas yang berfungsi untuk menguapkan air laut, c. sistem kondensasi yang berfungsi untuk mengubah uap air menjadi air tawar, d. vortex generator yang berfungsi untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas melalui pembentukan aliran turbulen, dan e. sistem kendali berbasis *Internet of Things (IoT)* yang dilengkapi sensor suhu, kelembapan, tekanan, dan volume air, yang dicirikan dengan kemampuan pemantauan serta pengendalian secara jarak jauh melalui perangkat elektronik.

Tujuan lain dari invensi ini adalah menyediakan solusi desalinasi yang hemat energi, ramah lingkungan, dan praktis, yang dapat diterapkan tidak hanya pada rumah tangga, tetapi juga pada fasilitas berskala kecil, komunitas, serta wilayah pesisir dengan keterbatasan sumber daya air tawar. Tujuan dan manfaat lain serta penjelasan yang lebih lengkap dari invensi ini sebagai perwujudan

yang lebih diutamakan akan dijelaskan dengan mengacu pada gambar-gambar yang menyertainya.

Uraian Singkat Gambar

5 Invensi ini dapat lebih mudah dipahami dengan merujuk pada gambar-gambar yang disertakan. **Gambar 1** menunjukkan tampilan isometrik dari *Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner (AC)* sesuai dengan invensi ini. **Gambar 2** memperlihatkan tampilan potongan melintang (*cross section*) dari
10 unit desalinasi tersebut, sedangkan **Gambar 3** menampilkan tampilan dari arah depan. Adapun **Gambar 4** menggambarkan tampilan dari arah samping.

Uraian Lengkap Invensi

 Invensi ini secara lengkap diuraikan dengan mengacu kepada
15 gambar-gambar yang menyertainya. Mengacu pada Gambar 1, yang memperlihatkan gambar detail secara lengkap Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air *Conditioner (AC)*, unit ini terdiri dari cover luar (penutup) yang berfungsi melindungi keseluruhan sistem dan memiliki bukaan horizontal untuk ventilasi serta
20 pelepasan panas. Di dalam cover terdapat komponen utama yaitu *heat exchanger*, ruang penguapan, *vortex generators*, kondensor, dan bak penampung air bersih. Selain itu juga terlihat integrasi sistem *Internet of Things (IoT)* yang dilengkapi sensor temperatur, sensor kelembaban, dan sensor ketinggian air laut untuk mengatur kinerja
25 sistem secara otomatis.

 Mengacu pada Gambar 2, yang memperlihatkan tampilan potongan melintang (*cross section*) dari unit desalinasi, ditunjukkan konfigurasi internal secara rinci. *Heat exchanger* terletak di sisi kiri dan kanan untuk menerima panas buang dari AC. Panas ini
30 ditransfer ke ruang penguapan yang terletak di bagian tengah, sehingga air laut menguap. *Vortex generators* yang dipasang di bawah *heat exchanger* menciptakan turbulensi untuk memperbesar efisiensi perpindahan panas. Uap yang terbentuk diarahkan ke kondensor yang terletak di sisi atas, di mana uap dikondensasikan menjadi air

tawar. Air hasil kondensasi dialirkan ke bak penampung yang terletak di bagian bawah unit.

Mengacu pada Gambar 3, yang memperlihatkan tampilan tampak depan dari unit desalinasi, terlihat tata letak saluran masuk (inlet) air laut, saluran keluar (outlet) air hasil kondensasi, serta susunan sensor. Sensor temperatur (berwarna ungu) dipasang di beberapa titik untuk memantau suhu pada area penguapan dan kondensasi, sensor kelembaban (berwarna biru tua) digunakan untuk mengukur kadar uap air di dalam ruang sistem, dan sensor air (berwarna biru muda) dipasang untuk mendeteksi volume air laut yang tersedia di ruang penguapan. Mengacu pada Gambar 4, yang memperlihatkan tampilan samping unit, terlihat susunan vertikal komponen utama dari atas ke bawah, yaitu kondensor, ruang penguapan, *vortex generators*, dan bak penampung air bersih. Tampilan ini juga memperlihatkan alur kerja sistem mulai dari pemanasan air laut oleh panas buang AC, proses penguapan, pengaliran uap ke kondensor, hingga penampungan air hasil kondensasi.

Mengacu pada Gambar 1 hingga Gambar 4, cara untuk melaksanakan invensi ini adalah dengan mengarahkan panas buang dari AC ke *heat exchanger*. Panas ini dipindahkan ke air laut dalam ruang penguapan sehingga air laut menguap. *Vortex generators* membantu mempercepat proses pemanasan dengan menciptakan aliran turbulen. Uap kemudian diarahkan ke kondensor, dikondensasikan menjadi air bersih, dan dialirkan ke bak penampung. Seluruh proses dikendalikan melalui sistem IoT yang terhubung dengan sensor, memungkinkan pemantauan kondisi sistem secara *real-time* melalui perangkat pengguna.

Dari uraian di atas jelas bahwa hasil dari invensi ini dapat memberi manfaat bagi penyediaan air bersih di wilayah dengan keterbatasan akses air tawar, khususnya pada skala rumah tangga dan daerah pesisir, karena secara praktis dan efisien memanfaatkan energi panas buang AC yang sebelumnya tidak dimanfaatkan. Invensi ini benar-benar menyajikan suatu penyempurnaan yang sangat praktis, khususnya pada sistem Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang *Air Conditioner* (AC).

Klaim

1. Suatu Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air
Conditioner (AC), yang terdiri dari: (1) *cover* luar dengan
bukaan ventilasi; (2) *heat exchanger* yang menerima panas buang
5 dari AC; (3) ruang penguapan (*evaporator chamber*); (4) *vortex*
generators di bawah *heat exchanger*; (5) kondensor untuk
mengubah uap menjadi air tawar; (6) bak penampung air bersih;
dan (7) sistem *Internet of Things* (IoT) dengan sensor
temperatur, sensor kelembaban, dan sensor ketinggian air laut,
10 yang dicirikan dengan konfigurasi tersebut terintegrasi dalam
satu unit untuk menghasilkan air tawar dengan memanfaatkan
panas buang AC.
2. Unit desalinasi sesuai dengan klaim 1, dimana *cover* luar
memiliki bukaan horizontal untuk ventilasi udara dan pelepasan
15 panas.
3. Unit desalinasi sesuai dengan klaim 1, dimana *heat exchanger*
ditempatkan di sisi kiri dan kanan unit.
4. Unit desalinasi sesuai dengan klaim 1, dimana *vortex generators*
menciptakan aliran turbulen untuk meningkatkan efisiensi
20 perpindahan panas.
5. Unit desalinasi sesuai dengan klaim 1, dimana kondensor
ditempatkan di sisi kanan dan kiri bagian atas unit.
6. Unit desalinasi sesuai dengan klaim 1, dimana bak penampung air
bersih ditempatkan di bagian bawah unit.
- 25 7. Unit desalinasi sesuai dengan klaim 1, dimana sistem IoT
mencakup: - sensor temperatur untuk memantau suhu, - sensor
kelembaban untuk mengukur kadar uap air, - sensor air untuk
mendeteksi volume air laut.
8. Unit desalinasi sesuai dengan klaim 1, dimana sistem IoT
30 terhubung ke perangkat pengguna melalui jaringan nirkabel untuk
pemantauan dan pengendalian *real time*.

Abstrak

Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang *Air Conditioner* (AC)

5

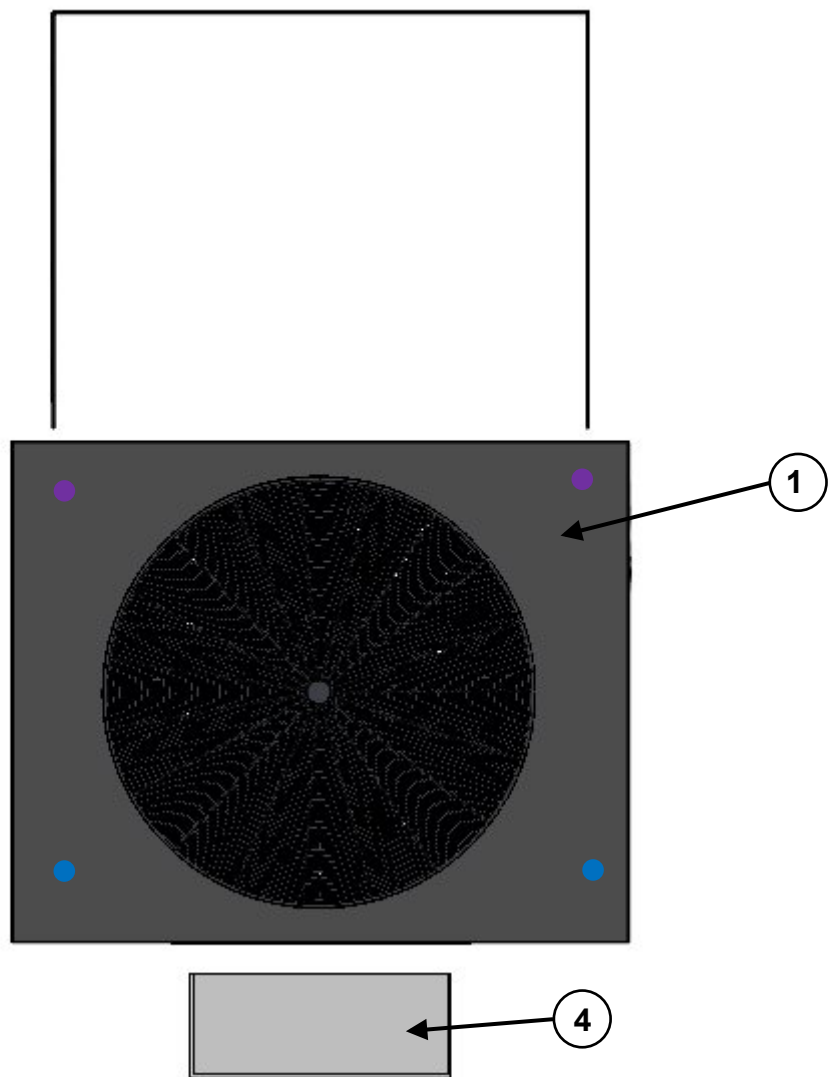
Invensi ini mengenai **Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang *Air Conditioner* (AC)**, yang termasuk dalam bidang teknik desalinasi termal skala kecil. Unit ini dirancang untuk memanfaatkan panas buang dari sistem pendingin udara (AC) sebagai sumber energi utama dalam proses penguapan dan kondensasi air laut guna menghasilkan air tawar. Sistem terdiri atas cover luar dengan bukaan ventilasi, *heat exchanger* yang menerima panas buang AC, ruang penguapan (*evaporator chamber*), *vortex generators* yang menciptakan aliran turbulen untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas, kondensor untuk mengubah uap menjadi air tawar, bak penampung air bersih, serta sistem kendali berbasis *Internet of Things* (IoT) yang dilengkapi sensor temperatur, kelembaban, dan ketinggian air laut. IoT memungkinkan pemantauan dan pengendalian *real time* melalui perangkat elektronik. Unit ini dicirikan dengan integrasi komponen dalam satu sistem terintegrasi, hemat energi, dan praktis untuk aplikasi rumah tangga, komunitas kecil, maupun daerah pesisir yang memiliki keterbatasan pasokan air bersih. Invensi ini memberikan penyempurnaan signifikan dibanding teknologi sebelumnya dengan memanfaatkan energi panas buang yang umumnya terbuang, sehingga mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan.

10

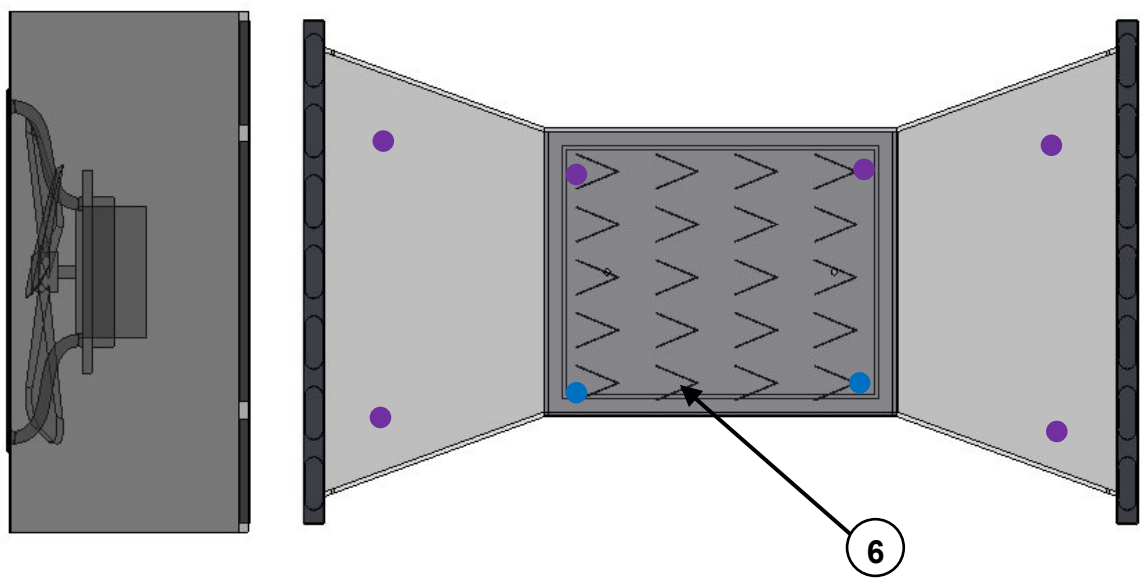
15

20

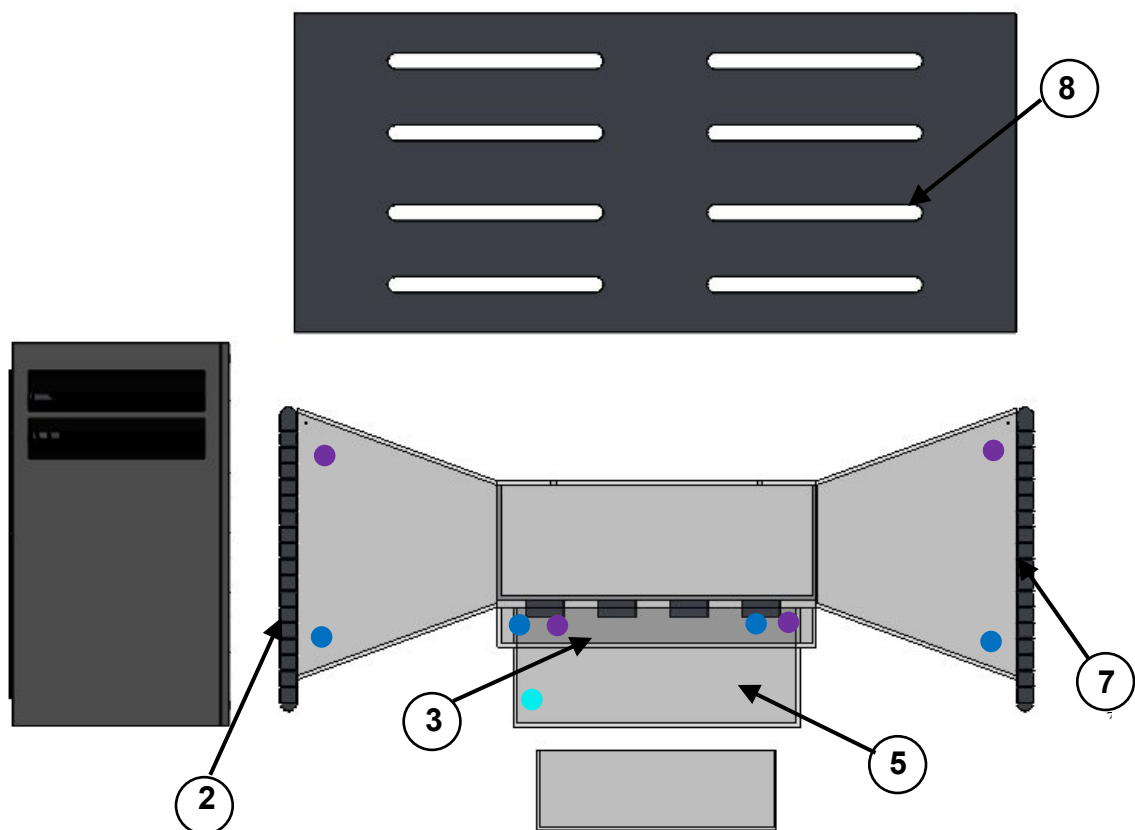
25



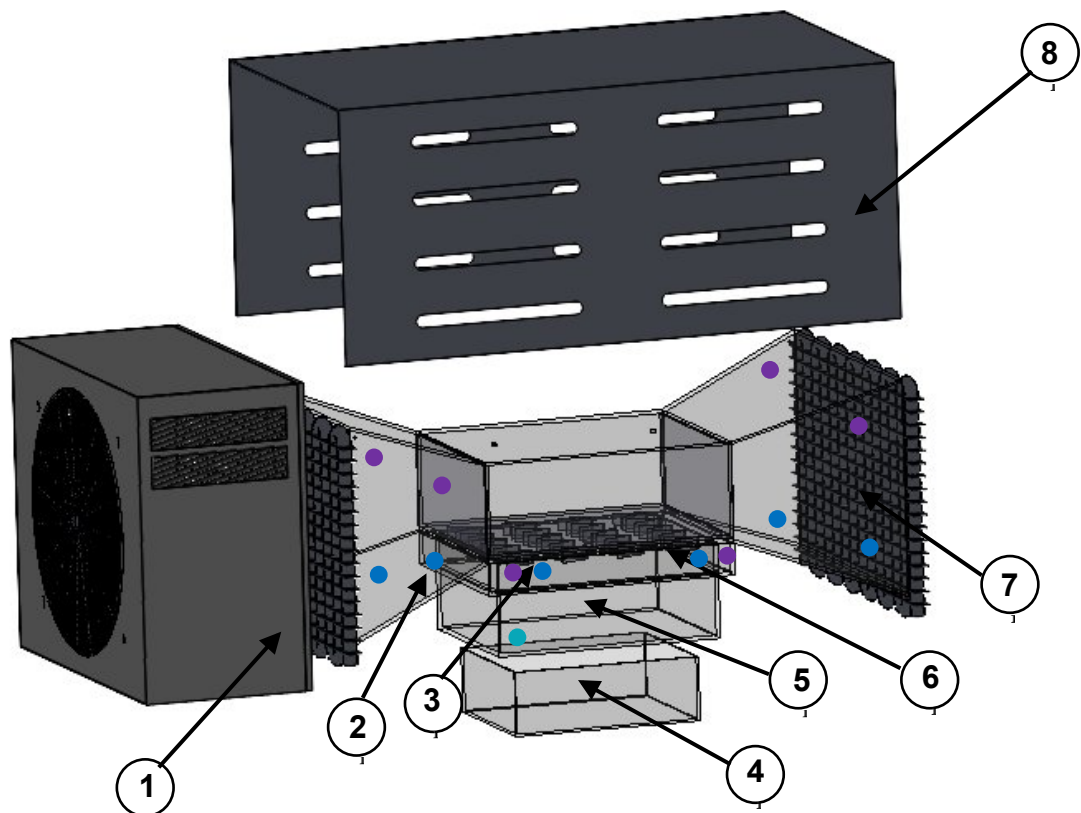
Gambar 1



Gambar 2



Gambar 3



Gambar 4

- Sensor temperatur
- Sensor humidity
- Sensor air

FORMULIR PERMOHONAN PENDAFTARAN PATEN INDONESIA

APPLICATION FORM OF PATENT REGISTRATION OF INDONESIA

Data Permohonan (Application)			
Nomor Permohonan Number of Application	: P00202509515	Tanggal Penerimaan Date of Submission	: 27 September 2025
Jenis Permohonan Type Of Application	: Paten	Jumlah Klaim Total Claim	: 8
		Jumlah Halaman Total Page	: 4
Judul Title	: Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner (AC)		
Abstrak Abstract	: Invensi ini mengenai Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner (AC), yang termasuk dalam bidang teknik desalinasi termal skala kecil. Unit ini dirancang untuk memanfaatkan panas buang dari sistem pendingin udara (AC) sebagai sumber energi utama dalam proses penguapan dan kondensasi air laut guna menghasilkan air tawar. Sistem terdiri atas cover luar dengan bukaan ventilasi, heat exchanger yang menerima panas buang AC, ruang penguapan (evaporator chamber), vortex generators yang menciptakan aliran turbulen untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas, kondensor untuk mengubah uap menjadi air tawar, bak penampung air bersih, serta sistem kendali berbasis Internet of Things (IoT) yang dilengkapi sensor temperatur, kelembaban, dan ketinggian air laut. IoT memungkinkan pemantauan dan pengendalian real time melalui perangkat elektronik. Unit ini dicirikan dengan integrasi komponen dalam satu sistem terintegrasi, hemat energi, dan praktis untuk aplikasi rumah tangga, komunitas kecil, maupun daerah pesisir yang memiliki keterbatasan pasokan air bersih. Invensi ini memberikan penyempurnaan signifikan dibanding teknologi sebelumnya dengan memanfaatkan energi panas buang yang umumnya terbuang, sehingga mendukung efisiensi energi dan keberlanjutan lingkungan		

Permohonan PCT (PCT Application)			
Nomor PCT PCT Number	:	Nomor Publikasi Publication Number	:
Tanggal PCT PCT Date	:	Tanggal Publikasi Publication Date	:

Pemohon (Applicant)		
Nama (Name)	Alamat (Address)	Surel/Telp (Email/Phone)
Universitas Muhammadiyah Prof Dr. Hamka	Jl. Raya Jakarta-Bogor No.KM.23 No.99, RT.4/RW.5, Rambutan, Kec. Ciracas, Kota Jakarta Timur, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 13830,ID	sentraki@uhamka.ac.id 082143195811

Penemu (Inventor)			
Nama (Name)	Warganegara (Nationality)	Alamat (Address)	Surel/Telp (Email/Phone)
Dan Mugisidi,	Indonesia	Jl. BB1 No. 11, RT 4/15, Cipinang Muara, Jatinegara, Jakarta Timur 13420, DKI Jakarta, Indonesia,ID	08161678953 dan.mugisidi@uhamka.ac.id
Oktarina Heriyani	Indonesia	Jl. Palapa Perumahan Serpong Green Park Blok N No. 2, Serua, Ciputat, Tangerang Selatan 15414, Banten, Indonesia,ID	0816610785 oktarina@uhamka.ac.id
Rifky	Indonesia	Jl. Angsana Batusari No. 42, RT 003/05, Kebon Jeruk, Jakarta Barat 11530, DKI Jakarta, Indonesia,ID	08151625297 rifky@uhamka.ac.id
Akhmad Rizal Dzikrillah	Indonesia	Jl. Buni GG Duren No. 55, RT 001/RW 008, Munjul, Cipayung, Jakarta Timur 13850, DKI Jakarta, Indonesia,ID	0895336917541 ahmad.rizal@uhamka.ac.id

Data Prioritas (Priority Data)		
Negara (Country)	Nomor (Number)	Tanggal (Date)

Korespondensi (Correspondence)		
Nama (Name)	Alamat (Address)	Surel/Telp (Email/Phone)
Universitas Muhammadiyah Prof Dr. Hamka	Jl. Raya Jakarta-Bogor No.KM.23 No.99, RT.4/RW.5, Rambutan, Kec. Ciracas, Kota Jakarta Timur, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 13830	sentraki@uhamka.ac.id 082143195811

Kuasa/Konsultan KI (Representative/ IP Consultan)		
Nama (Name)	Alamat (Address)	Surel/Telp (Email/Phone)

Lampiran (Attachment)
ABSTRAK
DESKRIPSI BAHASA INDONESIA
GAMBAR TEKNIK
KLAIM FILE BAHASA INDONESIA
SURAT PENGALIHAN INVENSI
SURAT PERNYATAAN KEPEMILIKAN INVENSI OLEH INVENTOR

Detail Pembayaran (Payment Detail)			
No	Nama Pembayaran	Sudah Bayar	Jumlah
1.	Pembayaran Permohonan Paten	☒	Rp. 350.000
2.	Pembayaran Kelebihan Deskripsi	☐	-
3.	Pembayaran Kelebihan Klaim	☐	-
4.	Pembayaran Pemeriksaan Substantif	☒	Rp. 3.500.000
5.	Pembayaran Percepatan Pengumuman	☒	Rp. 500.000

Jakarta, 27 September 2025

Pemohon / Kuasa

Applicant / Representative



Tanda Tangan / *Signature*
Nama Lengkap / *Fullname*

BUKTI PEMBAYARAN PEMERIKSAAN SUBSTANTIF PERMOHONAN
PATEN

Data Permohonan (Application)			
Nomor Permohonan Number of Application	: P00202509515	Tanggal Permohonan Date of Submission	: 27 September 2025
Nomor Registrasi Number of Registration	: -	Tanggal Registrasi Date of Registration	:
Nama Pemegang Paten Owner Name	: Universitas Muhammadiyah Prof Dr. Hamka		
Judul Title	: Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner (AC)		

No Billing : 820250927865281
Tanggal Pembayaran : 27 September 2025
Jumlah Pembayaran : Rp. 3.500.000

Jakarta, 27 September 2025
Pemohon / Kuasa
Applicant / Representative



Tanda Tangan / Signature
Nama Lengkap / Fullname

DIREKTORAT JENDERAL KEKAYAAN INTELEKTUAL

SURAT PERINTAH PEMBAYARAN

BIAYA (JASA) Pembayaran

NO. DRAFT PERMOHONAN : IPP0000245124
NAMA PEMOHON : Universitas Muhammadiyah Prof Dr. Hamka
ALAMAT : Jl. Raya Jakarta-Bogor No.KM.23 No.99, RT.4/RW.5, Rambutan, Kec. Ciracas, Kota J
akarta Timur, Daerah Khusus Ibukota Jakarta 13830
EMAIL : sentraki@uhamka.ac.id
NO. TELP : 082143195811

Jenis Pembayaran : Pembayaran Permohonan Paten
No. Pembayaran : 820250927865280
Tagihan : Rp.350.000
TGL EXPIRED : 27/09/2025 23:59:59

Jenis Pembayaran : Pemeriksaan Substantif
No. Pembayaran : 820250927865281
Tagihan : Rp.3.500.000
TGL EXPIRED : 27/09/2025 23:59:59

Jenis Pembayaran : Percepatan Pengumuman
No. Pembayaran : 820250927866111
Tagihan : Rp.500.000
TGL EXPIRED : 27/09/2025 23:59:59

Silahkan download dan print Surat Perintah Pembayaran, kemudian lanjutkan pembayaran pada Bank dengan membawa Surat Perintah Pembayaran yang dimaksud.



KEMENTERIAN HUKUM
REPUBLIK INDONESIA
DIREKTORAT JENDERAL KEKAYAAN INTELEKTUAL
Jl. H.R. Rasuna Said Kav 8-9, Kuningan, Jakarta Selatan, 12940
Telepon: (021) 57905611 Faksimili: (021) 57905611
Laman: <http://www.dgip.go.id> Surel: dopatent@dgip.go.id

Nomor : HKI.3-HI.05.01.02.P00202509515/2025
Lampiran : 1 (satu) berkas
Hal : Pemberitahuan Persyaratan Formalitas Telah Dipenuhi

30 September 2025

Yth. Universitas Muhammadiyah Prof Dr.
Hamka
Jl. Raya Jakarta-Bogor No.KM.23 No.99,
RT.4/RW.5, Rambutan, Kec. Ciracas,
Kota Jakarta Timur, Daerah Khusus Ibukota
Jakarta 13830, 13830, Kota Adm. Jakarta
Timur

Dengan ini diberitahukan bahwa Permohonan Paten:

Tanggal Pengajuan	: 27 September 2025
(21) Nomor Permohonan	: P00202509515
(71) Pemohon	: Universitas Muhammadiyah Prof Dr. Hamka
(54) Judul Invensi	: Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner (AC)
(30) Data Prioritas	: -
(74) Konsultan HKI	:
(22) Tanggal Penerimaan	: 27 September 2025

Telah melewati tahap pemeriksaan formalitas dan semua persyaratan formalitas telah dipenuhi. Untuk itu akan dilakukan:

1. Pengumuman, segera 7 (tujuh) hari setelah 18 (delapan belas) bulan sejak tanggal penerimaan atau tanggal prioritas dalam hal Paten Biasa (Pasal 46 UU No 13 Tahun 2016); atau segera paling lambat 14 (empat belas) hari sejak tanggal penerimaa, dalam hal Paten Sederhana (Pasal 107 UU No 11 Tahun 2020).
2. Pemeriksaan Substantif segera setelah masa publikasi selesai dan pemohon telah mengajukan permohonan pemeriksaan substantif (Pasal 51 UU No 13 Tahun 2016).

Selain itu hal-hal yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut:

1. Permohonan pemeriksaan substantif diajukan selambat-lambatnya 36 (tiga puluh enam) bulan sejak tanggal penerimaan untuk permohonan paten biasa, dengan disertai biaya sesuai yang tercantum pada PP No. 28 Tahun 2019.
2. Tidak diajukan permohonan pemeriksaan substantif dalam jangka waktu yang ditentukan tersebut akan mengakibatkan permohonan paten ini dianggap ditarik kembali.
3. Harap melakukan pembayaran kelebihan 0 buah klaim (@75.000) sebesar Rp. 0.
4. Pembayaran tambahan biaya akibat kelebihan jumlah klaim, dilakukan selambat-lambatnya pada saat pengajuan pemeriksaan substantif. Apabila tambahan biaya tidak dibayarkan dalam jangka waktu sebagaimana dimaksud maka kelebihan jumlah klaim dianggap ditarik kembali (Pasal 18 ayat 4 Permenkumham no 38 tahun 2018)
5. Jumlah halaman deskripsi yang terbayar halaman (Bila halaman deskripsi lebih dari 30).



00-2025-253324

a.n. Direktur Paten, Desain Tata Letak
Sirkuit Terpadu dan Rahasia Dagang
Kepala Subdirektorat Permohonan dan
Pelayanan Paten

Rifan Fikri, S.T., M.H.
NIP. 198001092009121005

Tembusan:
Direktur Jenderal Kekayaan Intelektual.

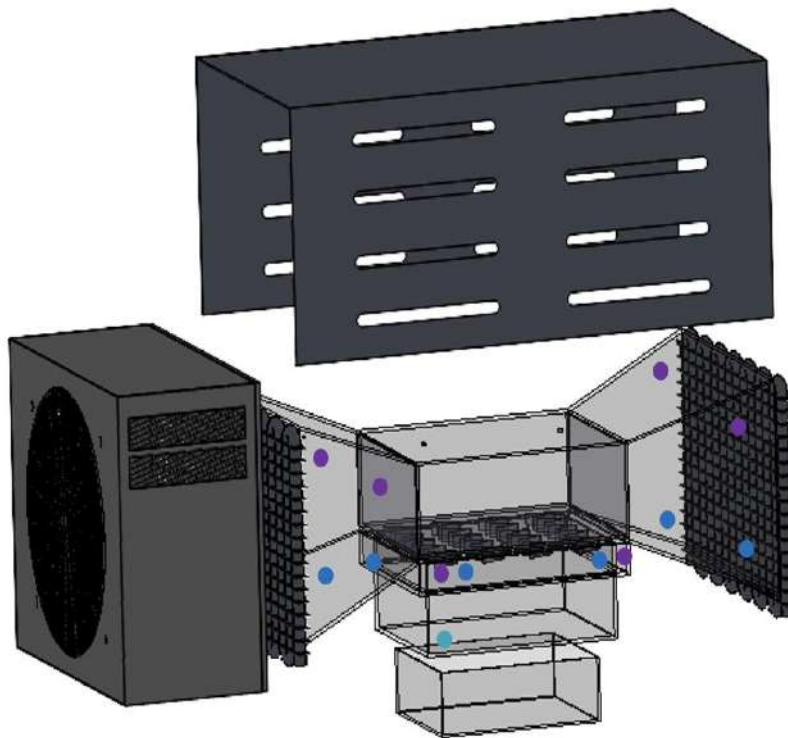


BIBLIOGRAFI DATA

- (54) Judul Invensi : Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Air Conditioner (AC)
- (51) Klasifikasi (IPC) : Int.Cl./undefined
- (21) Nomor Permohonan : P00202509515
- (22) Tanggal Penerimaan : 27 September 2025
- (71) Yang mengajukan : Universitas Muhammadiyah Prof Dr. Hamka
permohonan paten
- (72) Inventor : Dan Mugisidi,,
Oktarina Heriyani,
Rifky,
Akhmad Rizal Dzikrillah,
- (74) Konsultan HKI : .
- (30) Data Prioritas : -
Agar diumumkan setelah :
tanggal
- No. Gambar yang : -
menyertai abstrak pada
saat pengumuman

Deskripsi Alat

Purwarupa yang dikembangkan adalah Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Pendingin Udara (AC) dengan *Vortex Generators* dan *Internet of Things* (IoT). Prinsip kerja alat ini adalah memanfaatkan panas buang dari kondensor AC sebagai sumber energi untuk proses distilasi sederhana. Panas yang dilepaskan kondensor dialirkan ke evaporator untuk memanaskan air laut hingga menguap. Uap kemudian dikondensasikan kembali pada kondensor desalinasi sehingga menghasilkan air tawar yang ditampung pada bak air bersih, seperti terlihat pada gambar 1 berikut ini.



Gambar 1. Prototipe Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang AC

Untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas, sistem ini dilengkapi *vortex generators*, yaitu berupa plat pengarah aliran dengan sudut tertentu. *Vortex generators* menciptakan turbulensi aliran panas sehingga proses perpindahan kalor lebih optimal dan laju penguapan air laut meningkat.

Unit ini juga didukung oleh teknologi IoT (*Internet of Things*). Beberapa sensor dipasang pada titik strategis, antara lain:

- Sensor temperatur di evaporator, kondensor, dan outlet.
- Sensor kelembaban untuk lingkungan sekitar
- Sensor level air pada bak air laut (inlet) dan bak air bersih (outlet)

Desain alat ini dibuat modular, terdiri dari:

- Komponen mekanik → rangka, lorong, cover, dan bak bawah
- Sistem perpindahan panas → heat exchanger, evaporator, kondensor, dan jalur uap.
- Sistem kendali cerdas → sensor, mikrokontroler, dan dashboard IoT.

Dengan kapasitas produksi purwarupa sekitar 1–1,5 liter air bersih per jam, alat ini dapat menjadi solusi penyediaan air bersih skala kecil di daerah pesisir atau pulau kecil.

Spesifikasi Umum Alat

Nama Alat: Prototipe Unit Desalinasi Air Laut Berbasis Panas Buang Pendingin Udara dengan Vortex Generators dan IoT

Spesifikasi	Keterangan
Dimensi keseluruhan	$\pm 1770 \times 1500 \times 600$ mm
Rangka	Baja ringan / aluminium sheet (tebal 1–2 mm)
Bak air	Stainless steel 304 / Polypropylene (anti korosi)
Finishing	Cat epoxy anti karat, tepi diproses deburr
Kapasitas input air laut	± 5 –10 liter per siklus
Kapasitas produksi air bersih	± 1 – 1,5 liter/jam (skala purwarupa)
Sumber panas	Panas buang kondensor AC (± 45 –60 °C)
Proses	Distilasi termal (evaporasi – kondensasi)
Kualitas air hasil	TDS < 500 ppm (standar air minum WHO)
Evaporator	Stainless steel 304, tahan korosi
Kondensor	Fin-and-tube (pipa tembaga + sirip aluminium)
Jalur uap	Pipa tembaga
Vortex generators	Plat pengarah 30–45° untuk meningkatkan efisiensi panas
Sensor	Temperatur, kelembaban, level air, TDS/EC
Mikrokontroler	ESP32 / Arduino (koneksi WiFi)
Dashboard IoT	Aplikasi/web (Blynk, ThingsBoard)
Fungsi IoT	Monitoring real-time dan kontrol pompa/kipas otomatis
Tegangan kerja	220 VAC (pompa & kipas), 5–12 VDC (sensor & kontrol)
Mode operasi	Semi-otomatis berbasis IoT
Kondisi kerja optimal	Suhu 45–60 °C, kelembaban 30–80% RH

Pengujian Purwarupa



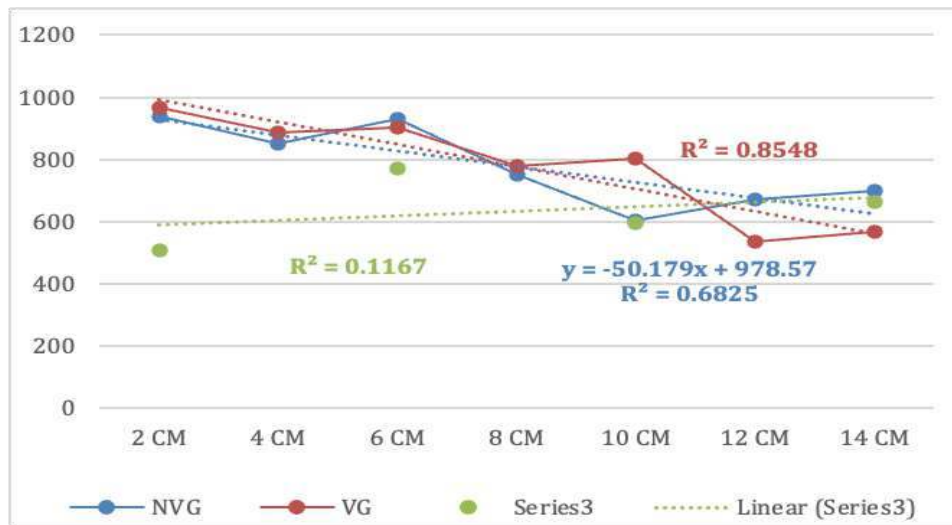


Pengujian Purwarupa

Tabel 1. Hasil Uji Coba Menggunakan Kondensor

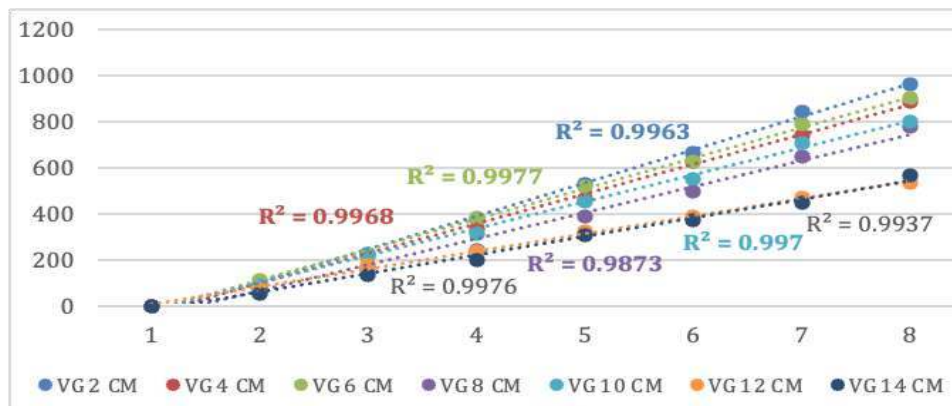
Parameter Uji	Kondensor Tanpa VGs	Kondensor Dengan VGs	Keterangan
Koefisien Performansi (CoP) AC	3,1 – 3,3	3,1 – 3,3	Stabil, tidak menurunkan kinerja AC
Suhu panas buang (°C)	42 – 46	42 – 46	Sesuai literatur (40–60 °C)
Laju evaporasi (ml/jam)	35 – 40	55 – 62	VG meningkatkan $\pm 57\%$
Produksi air bersih (liter/hari)	1,0 – 1,2	1,2 – 1,5	Sesuai target rumah tangga
Konduktivitas air ($\mu\text{S/cm}$)	170 – 200	150 – 180	$< 500 \mu\text{S/cm}$ (standar WHO)
Waktu start-up (menit)	± 45	± 45	Relatif lama

Tabel 1. hasil uji coba memperlihatkan secara kuantitatif kinerja sistem desalinasi berbasis panas buang AC baik tanpa *vortex generators* (VGs) maupun dengan penambahan VGs. Dari sisi koefisien performansi (CoP) AC, nilai tetap berada pada kisaran 3,1–3,3 untuk kedua kondisi, yang menandakan integrasi unit desalinasi tidak mengganggu kinerja utama AC. Suhu panas buang 42–46 °C sesuai dengan rentang optimal literatur (40–60 °C). Dari segi laju evaporasi, tanpa VGs hanya 35–40 ml/jam, sedangkan dengan VGs meningkat signifikan menjadi 55–62 ml/jam. Hal ini berdampak pada produksi air bersih yang naik dari 1,0–1,2 liter/hari menjadi 1,2–1,5 liter/hari. Kualitas air juga membaik, dengan konduktivitas turun dari 170–200 $\mu\text{S/cm}$ menjadi 150–180 $\mu\text{S/cm}$, jauh di bawah standar WHO ($< 500 \mu\text{S/cm}$). Namun, waktu start-up masih relatif lama yakni ± 45 menit pada kedua kondisi, sehingga perlu optimasi agar lebih cepat stabil.



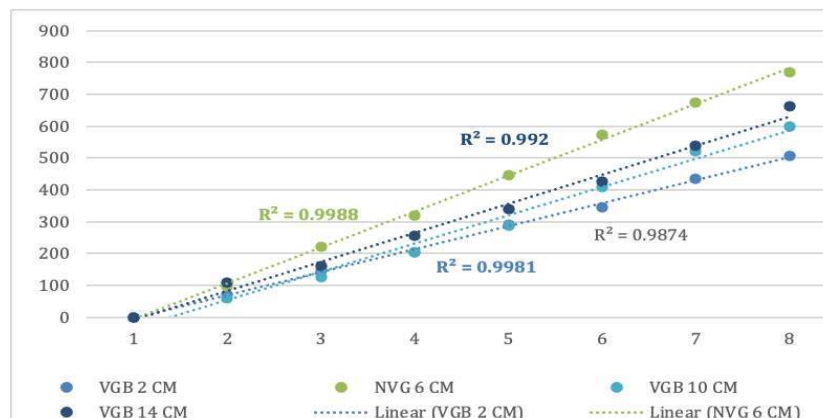
Gambar 1. Grafik Perbandingan NVG, VG, dan Series

Gambar 1 memperlihatkan perbandingan antara kondisi tanpa vortex generator (NVG), dengan vortex generator (VG), dan Series. Dari grafik terlihat bahwa tren NVG dan VG sama-sama mengalami penurunan seiring bertambahnya variasi (2–14 CM), namun penurunan pada kondisi VG cenderung lebih konsisten dengan nilai $R^2 = 0,8548$ yang lebih tinggi dibanding NVG ($R^2 = 0,6825$). Hal ini menunjukkan bahwa hubungan linear pada kondisi VG lebih kuat, sehingga kinerjanya lebih stabil meskipun menurun. Sementara itu, Series memperlihatkan tren sedikit meningkat dengan $R^2 = 0,1167$ yang rendah, artinya pola hubungan linear tidak signifikan. Kesimpulannya, baik NVG maupun VG memiliki tren penurunan performa, dengan titik optimum masih terlihat pada variasi kecil (2–4 CM).



Gambar 2. Grafik Peningkatan Penguapan Tiap Variasi VGs

Gambar 2 menampilkan tren pertumbuhan performa pada setiap variasi VG (2–14 CM). Semua variasi menunjukkan garis regresi linear dengan nilai R^2 sangat tinggi ($\geq 0,9873$), yang berarti hubungan data dengan model linear sangat kuat. Semakin besar variasi VG, garis tren cenderung bergeser ke bawah, menandakan penurunan performa pada variasi yang lebih besar. Namun, pada variasi kecil (VG 2 CM, VG 4 CM, dan VG 6 CM) terlihat posisi garis berada lebih tinggi, yang berarti hasil uji coba lebih optimal. Dengan kata lain, penambahan variasi VG di atas 8–10 CM tidak memberikan keuntungan signifikan dan bahkan menurunkan performa sistem.



Gambar 3. Grafik Perbandingan laju Penguapan Tiap Variasi VGs

Grafik ketiga memfokuskan perbandingan pada beberapa variasi terpilih: VGB 2 CM, NVG 6 CM, VGB 10 CM, dan VGB 14 CM. Hasilnya menunjukkan bahwa NVG 6 CM memiliki kinerja paling tinggi dengan tren linear $R^2 = 0,9988$, diikuti oleh VGB 2 CM ($R^2 = 0,9981$). Variasi dengan ukuran lebih besar seperti VGB 10 CM dan VGB 14 CM menunjukkan hasil lebih rendah dengan nilai $R^2 = 0,992$ dan $R^2 = 0,9874$. Hal ini menegaskan bahwa konfigurasi optimum berada pada variasi kecil hingga menengah, sementara variasi besar justru menyebabkan penurunan performa.

SURAT PERNYATAAN TANGGUNG JAWAB BELANJA

Yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Dr. Dr DAN MUGISIDI S.T, M.Si

Alamat : -

berdasarkan Surat Keputusan Nomor 0419/C3/DT.05.00/2025 dan Perjanjian / Kontrak Nomor 124/C3/DT.05.00/PL/2025; 0992/LL3/AL/2025; 280/F.03.07/2025 mendapatkan Anggaran Penelitian Pengembangan Prototipe Unit Desalinasi Berbasis Panas Buang Pendingin Udara dengan Vortex Generators dan Internet of Things untuk Penyediaan Air Bersih Sebesar Rp. 361.110.000

Dengan ini menyatakan bahwa :

1. Biaya kegiatan Penelitian di bawah ini meliputi :

No	Uraian	RAB 100%	Realisasi
1	Bahan AC, dudukan AC, cover AC, sensor tekanan, sensor temperatur, sensor ketinggian air, sensor kelembaban, bak penampung air laut, air laut, vortex generators, arkluk, saluran udara, saluran pendingin, kondensor, konektor, pipa pendingin, saluran udara, saluran pendingin, silang, saluran over flow, polivinil acetate sheet transparan, aluminium foil, mikrokontroler, termometer, hygrometer, triplek.	Rp. 271.260.000	Rp. 271.260.000
2	Pengumpulan Data transportasi, konsumsi,	Rp. 23.250.000	Rp. 23.250.000
3	Analisis Data transportasi lokasi, uji sistem	Rp. 45.600.000	Rp. 45.600.000
4	Sewa Peralatan kendaraan	Rp. 2.800.000	Rp. 2.800.000
5	Pelaporan Luaran Wajib registrasi paten dan dokumen SOP	Rp. 18.200.000	Rp. 18.200.000
6	Lain-lain -	Rp. 0	Rp. 0
Realisasi (100 %)			Rp. 361.110.000

2. Jumlah uang tersebut pada angka 1, benar-benar dikeluarkan untuk pelaksanaan kegiatan Penelitian dimaksud.

Demikian surat pernyataan ini dibuat dengan sebenarnya.



Jakarta, 15-12-2025, Ketua

Dr. Dr DAN MUGISIDI S.T, M.Si

NIP/NIPK 0301126901

**SURAT PERJANJIAN/KONTRAK KERJA PENELITIAN
DALAM RANGKA PELAKSANAAN PROGRAM PENELITIAN
HIBAH DPPM KEMDIKTISAINTEK TAHUN ANGGARAN 2025**

Nomor : 280/F.03.07/2025
Tanggal : 05 Juni 2025

*Bismillahirrahmanirrahim,
Assalamuallaikum Warrahmatullahi Wabarakatuh*

Pada hari ini **Kamis**, tanggal **lima** bulan **Juni**, tahun **Dua ribu dua puluh lima**, kami yang bertandatangan dibawah ini:

- 1. Prof. Herri Mulyono, Ph.D** : **Ketua Lembaga Penelitian, Pengabdian Masyarakat, dan Publikasi (LPPMP) UHAMKA**, bertindak atas nama Rektor **Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA** yang selanjutnya dalam Surat Perjanjian ini disebut sebagai **PIHAK PERTAMA**;
- 2. Dr. Dan Mugisidi, ST., M.Si** : Dosen Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA, dalam hal ini bertindak sebagai pengusul dan Ketua Pelaksana Penelitian Tahun Anggaran 2025 untuk selanjutnya disebut **PIHAK KEDUA**.

Perjanjian perjanjian ini berdasarkan pada Surat Perjanjian Pelaksanaan Hibah Penelitian bagi dosen perguruan tinggi Swasta Lembaga Layanan Pendidikan Tinggi Wilayah III Jakarta Tahun Anggaran 2025 tanggal 28 Mei 2025 Nomor: 124/C3/DT.05.00/PL/2025.

PIHAK PERTAMA dan **PIHAK KEDUA**, secara bersama-sama bersepakat mengikatkan diri dalam suatu Perjanjian Pelaksanaan Penugasan Penelitian Hibah dengan ketentuan dan syarat-syarat dalam pasal-pasal sebagai berikut:



Pasal 1

- (1) **PIHAK PERTAMA** memberi tugas kepada **PIHAK KEDUA**, dan **PIHAK KEDUA** menerima tugas tersebut untuk melaksanakan Kegiatan Penelitian Hibah tahun anggaran 2025 dengan judul **"PENGEMBANGAN PROTOTYPE UNIT DESALINASI BERBASIS PANAS BUANG PENDINGIN UDARA DENGAN VORTEX GENERATORS DAN INTERNET OF THINGS UNTUK PENYEDIAAN AIR BERSIH"**
- (2) **PIHAK KEDUA** bertanggung jawab penuh atas pelaksanaan administrasi dan keuangan atas pekerjaan sebagai mana dimaksud dan berkewajiban menyerahkan semua bukti-bukti pengeluaran serta dokumen pelaksanaan lainnya dalam bendel laporan yang tersusun secara sistematis kepada **PIHAK PERTAMA**.
- (3) Penugasan Pelaksanaan Penelitian Hibah Direktorat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (DPPM Kemdiktisaintek) tahun anggaran 2025.
- (4) Waktu Pelaksanaan penelitian 28 Mei 2025 s/d 16 Desember 2025

Pasal 2

PIHAK PERTAMA menyerahkan dana penelitian sebagaimana dimaksud dalam pasal 1 sebesar **"Rp 361.110.000"- (Tiga Ratus Enam Puluh Satu Juta Seratus Sepuluh Ribu Rupiah:)** yang berasal dari DPPM Kemdiktisaintek melalui Rekening Universitas Muhammadiyah Prof. DR. HAMKA. Pencairan dana:

- (1) Dana Penugasan Pelaksanaan sebagaimana dimaksud pada Pasal 1 dibayarkan oleh **PIHAK PERTAMA** kepada **PIHAK KEDUA** dengan 2 tahap, Tahap 1 sebesar 80% setelah dilakukan revisi proposal pada akun BIMA, Tahap 2 sebesar 20% setelah mengunggah Surat Pertanggung Jawab Belanja (SPTB), maksimal 16 Desember 2025.
- (2) Pekerjaan penelitian yang telah dilaksanakan **PIHAK PERTAMA** di unggah ke BIMA Kemdiktisaintek paling lambat tanggal 16 Desember 2025, meliputi;
 - Catatan harian pelaksanaan penelitian
 - Surat Pernyataan Tanggungjawab Belanja (SPTB) atas dana penelitian yang telah ditetapkan
 - Laporan kemajuan pelaksanaan penelitian
 - Laporan akhir penelitian
 - Luaran penelitian, dalam hal luaran publikasi ilmiah wajib mencantumkan ucapan terima kasih kepada pemberi dana penelitian DPPM kemdiktisaintek.





- (3) **PIHAK KEDUA** bertanggungjawab mutlak dalam pembelanjaan dana tersebut pada ayat (1) sesuai dengan proposal kegiatan yang telah disetujui dan berkewajiban untuk menyerahkan kepada **PIHAK PERTAMA** semua bukti-bukti pengeluaran sesuai dengan jumlah dana yang diberikan oleh **PIHAK PERTAMA**.
- (4) **PIHAK KEDUA** berkewajiban mengembalikan sisa dana yang tidak dibelanjakan kepada **PIHAK PERTAMA** untuk disetor ke Kas Negara.
- (5) **PIHAK KEDUA** berkewajiban menyampaikan salinan lembar keempat bukti pengembalian Dana ke Kas Negara yang telah divalidasi oleh KPPN setempat kepada **PIHAK PERTAMA**.

Pasal 3

- (1) Dana Penugasan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat 1 dibayarkan kepada **PIHAK KEDUA** melalui rekening yang diajukan dan atas nama **PIHAK KEDUA**.
- (2) **PIHAK PERTAMA** tidak bertanggung jawab atas keterlambatan dan/atau tidak terbayarnya sejumlah dana sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) yang disebabkan karena kesalahan **PIHAK KEDUA** dalam mengisi data lembaga, nama bank, nomor rekening, alamat dan persyaratan lainnya yang tidak sesuai dengan ketentuan.

Pasal 4

- (1) **PIHAK KEDUA** berkewajiban menindaklanjuti dan mengupayakan hasil Program Hibah Penelitian berupa hak kekayaan intelektual dan atau publikasi ilmiah sesuai dengan luaran yang dijanjikan pada Proposal.
- (2) Perolehan hasil sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dimanfaatkan sebesar-besarnya untuk pelaksanaan Catur Dharma Perguruan Tinggi Muhammadiyah (PTM).
- (3) **PIHAK KEDUA** berkewajiban untuk melaporkan perkembangan perolehan hasil sebagaimana dimaksud pada ayat (1) kepada **PIHAK PERTAMA** selambat-lambatnya pada tanggal 30 September 2025.

Pasal 5

- (1) **PIHAK KEDUA** berkewajiban mengunggah laporan pelaksanaan kegiatan ke BIMA Kemdiktisaintek paling lambat tanggal 16 Desember 2025 sesuai ketentuan pada Buku Panduan Program Hibah Penelitian Anggaran Tahun 2025.



- (2) **PIHAK PERTAMA** melakukan Monitoring dan Evaluasi internal terhadap kemajuan pelaksanaan Program Hibah Penelitian tahun Anggaran 2025 sebelum pelaksanaan monitoring dan evaluasi eksternal oleh DPPM Kemdiktisaintek.
- (3) **PIHAK KEDUA** menanggung biaya pelaksanaan penelitian meliputi; Monev laporan kemajuan, laporan akhir dan administrasi kegiatan Hibah Penelitian DPPM tahun Anggaran 2025.

Pasal 6

- (1) **PIHAK KEDUA** harus menyampaikan Surat Pernyataan telah menyelesaikan seluruh pekerjaan yang dibuktikan dengan pengunggahan pada SIBIMA Kemdiktisaintek:
 - a) Catatan harian dan laporan komprehensif pelaksanaan penelitian, pada tanggal 16 Desember 2025,
 - b) Laporan akhir, capaian hasil, video, poster, artikel ilmiah dan profil, pada tanggal 16 Desember 2025.
- (2) Apabila sampai dengan batas waktu yang telah ditetapkan untuk melaksanakan Hibah Penelitian telah berakhir, **PIHAK KEDUA** belum menyelesaikan tugasnya dan/atau terlambat mengirim laporan Kemajuan dan/atau terlambat mengirim laporan akhir, maka **PIHAK KEDUA** dikenakan sanksi denda sebesar 1% (satu persen) setiap hari keterlambatan sampai dengan setinggi-tingginya 5% (lima persen), terhitung dari tanggal jatuh tempo sebagaimana tersebut pada ayat (1), (2) dan (3), yang terdapat dalam Surat Perjanjian Penugasan Pelaksanaan Hibah Penelitian bagi dosen Perguruan Tinggi Swasta Tahun Anggaran 2025.
- (3) Peneliti/Pelaksana Hibah Penelitian yang tidak hadir dalam kegiatan Monitoring dan Evaluasi serta Seminar Hasil Penelitian Tahun pertama, tanpa pemberitahuan sebelumnya ke DPPM, maka Pelaksana Hibah tidak berhak mendapatkan dana penelitian untuk pendanaan tahun-tahun berikutnya. **PIHAK KEDUA** harus mengembalikan dana penugasan tahun-tahun berikutnya yang telah diterima ke Kas Negara disertai dengan surat pemberitahuan pengembalian dana.
- (4) **PIHAK PERTAMA** berkewajiban menyampaikan salinan lembar keempat bukti pengembalian Dana ke Kas Negara yang telah divalidasi oleh KPPN setempat kepada **PIHAK KEDUA**.



Pasal 7

- (1) Laporan hasil Hibah Penelitian sebagaimana tersebut dalam pasal 6 ayat (1) harus memenuhi ketentuan sebagai berikut:
1. Bentuk/ukuran kertas A4;
 2. Warna cover berwarna putih;
 3. Di bawah bagian kulit ditulis :

Dibiayai oleh

**Direktorat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (DPPM)
Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia
Sesuai dengan Surat Perjanjian Penugasan Pelaksanaan Hibah Penelitian
Nomor : 0992/LL3/AL.04/2025, Tanggal 04 Juni 2025**

- (2) Soft copy Laporan Hasil Hibah Penelitian sebagaimana tersebut pada ayat (1) harus diunggah ke BIMA Kemdiktisaintek sedangkan hardcopy wajib disampaikan kepada **PIHAK PERTAMA** dan disimpan oleh **PIHAK KEDUA**.

Pasal 8

- (1) Apabila **PIHAK KEDUA** berhenti dari jabatannya, sebelum pelaksanaan perjanjian ini selesai, maka **PIHAK KEDUA** wajib menyerahterimakan tanggung jawabnya kepada pejabat baru yang menggantikannya.
- (2) Apabila **PIHAK KEDUA** tidak bisa melaksanakan penelitian ini, maka **PIHAK KEDUA** wajib menunjuk penggantinya, yang merupakan salah satu anggota tim setelah mendapat persetujuan dari **Direktur Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (DPPM)**
- (3) Apabila **PIHAK KEDUA** tidak bisa melaksanakan tugas sebagaimana dimaksud dalam Pasal 1, maka harus mengembalikan dana yang telah diterimanya ke Kas Negara disertai dengan surat pemberitahuan pengembalian dana.
- (4) Apabila dikemudian hari judul Penelitian Hibah sebagaimana dimaksud pada Pasal 1 ditemukan adanya duplikasi dengan Penelitian lain dan/atau ditemukan adanya ketidak-jujuran/itikad kurang baik yang tidak sesuai dengan kaidah ilmiah, maka kegiatan Penelitian tersebut dinyatakan batal dan **PIHAK KEDUA** wajib mengembalikan dana Penelitian Hibah yang telah diterima kepada **PIHAK PERTAMA** yang selanjutnya disetor ke Kas Negara.



Pasal 9

PIHAK KEDUA berkewajiban memungut dan menyetor pajak ke kantor pelayanan setempat yang berkenaan dengan kewajiban pajak berupa:

1. Pembelian barang dan jasa dikenai PPN sebesar 10% dan PPh 22 sebesar 1,5%;
2. Belanja honorarium dikenai PPh Pasal 21 dengan ketentuan:
 - a. 5% bagi yang memiliki NPWP untuk golongan III, serta 6% bagi yang tidak memiliki NPWP.
 - b. Untuk golongan IV sebesar 15%; dan
3. Pajak-pajak lain sesuai ketentuan yang berlaku.

Pasal 10

- (1) Hak atas kekayaan intelektual yang dihasilkan dari pelaksanaan Program Hibah Penelitian diatur dan dikelola sesuai dengan peraturan dan perundang-undangan yang berlaku.
- (2) Hasil Penelitian berupa peralatan dan/atau alat yang dibeli dari kegiatan ini adalah milik negara yang dapat dihibahkan kepada institusi/ lembaga/ masyarakat melalui Surat Keterangan Hibah.

Pasal 11

- (1) Apabila terjadi perselisihan antara **PIHAK PERTAMA** dan **PIHAK KEDUA** dalam pelaksanaan perjanjian ini akan dilakukan penyelesaian secara musyawarah dan mufakat, dan apabila tidak tercapai penyelesaian secara musyawarah dan mufakat maka penyelesaian dilakukan melalui proses hukum yang berlaku dengan memilih domisili Hukum di Pengadilan DKI Jakarta.
- (2) Hal-hal yang belum diatur dalam perjanjian ini diatur kemudian oleh kedua belah pihak.





Pasal 12

Surat Perjanjian Penugasan Pelaksanaan Program Hibah Penelitian ini dibuat rangkap 3 (tiga) bermaterai cukup sesuai dengan ketentuan yang berlaku dan biaya materai dibebankan kepada **PIHAK KEDUA**.

PIHAK PERTAMA
Lembaga Penelitian, Pengabdian Masyarakat
dan Publikasi
Ketua;

PIHAK KEDUA
Dosen yang bersangkutan



Prof. Herri Mulyono, Ph.D.
NIDN 0305108003



Dr. Dan Mugisidi, ST., M.Si
NIDN. 0301126901

Mengetahui;
Wakil Rektor II,



Dr. Desvian Bandarsyah, M.Pd
NIDN. 0317126903



ORIGINAL RESEARCH

Sustainable Energy

ENVIRONMENTAL PROGRESS
& SUSTAINABLE ENERGY

Airflow-enhanced evaporation–condensation seawater desalination using residential air conditioner waste heat

Dan Mugisidi¹  | Oktarina Heriyani¹ | Rifky¹ | Widodo² |
Ahmed Rahmani³  | Amir Khalid⁴ 

¹Department of Mechanical Engineering,
Faculty of Industrial and Informatics
Technology, Universitas Muhammadiyah Prof.
Dr. Hamka, Jakarta, Indonesia

²Department of Mechanical Engineering,
Politeknik Enjinering Indorama, Purwakarta,
Indonesia

³Sustainable Development and Environmental
Protection Laboratory, Larbi Ben M'hidi
University, Oum El Bouaghi, Algeria

⁴Faculty of Mechanical and Manufacturing
Engineering, Universiti Tun Hussein Onn
Malaysia, Batu Pahat, Johor, Malaysia

Correspondence

Dan Mugisidi, Department of Mechanical
Engineering, Faculty of Industrial and
Informatics Technology, Universitas
Muhammadiyah Prof. Dr. Hamka, Jakarta,
Indonesia.

Email: dan.mugisidi@uhamka.ac.id

Funding information

DPPM Kemendiknasintek, Grant/Award
Numbers: 124/C3/DT.05.00/PL/2025, 0992/
LL3/AL.04/2025, 280/F.03.07/2025

Abstract

Water scarcity remains a major global challenge, particularly in developing countries with limited freshwater access. At the same time, the increasing use of residential air-conditioning (AC) systems generates substantial low-grade waste heat that is typically rejected into the environment. This study investigates a household-scale evaporation–condensation desalination system driven by waste heat recovered from a residential split-type AC unit. The proposed system integrates vortex-generator-assisted airflow enhancement within a compact evaporation channel to intensify heat using channels with different cross-sectional areas under vortex-generator (VG) and non-vortex-generator (NVG) configurations. Air temperature, relative humidity, evaporation rate, seawater salinity, and AC coefficient of performance (COP) were measured, while computational fluid dynamics (CFD) simulations were performed to analyze airflow and evaporation behavior. The results showed that vortex generators enhanced airflow mixing and evaporation performance. Maximum freshwater production of approximately 950–980 mL/h was achieved at channel cross-sectional areas of 0.015–0.025 m². Although COP decreased from 3.92 to approximately 3.02 under the most restrictive channel configuration, the values remained within the typical residential AC operating range. The CFD predictions showed strong agreement with experiments, with $R^2 > 0.95$ and average deviations below 10%. A preliminary economic analysis estimated the operational cost at approximately USD 0.017/L of freshwater produced. The proposed system demonstrates promising potential for decentralized and energy-efficient household freshwater production using readily available AC waste heat.

KEYWORDS

air conditioning, CFD simulation, desalination, vortex generator, waste heat

1 | INTRODUCTION

Although water is a basic need for human life, freshwater resources, which represent only about 2.8% of total global water resources, are limited.¹ Moreover, a 15% increase in population may result in a water shortage of up to 40% of total water demand.^{2,3} Water scarcity can trigger

humanitarian, political, and social conflicts.⁴ This challenge is particularly pronounced in many coastal and tropical developing regions, where limited freshwater resources and growing populations increase vulnerability to water shortages and present challenges in accessing clean water.^{5–7}

Global warming, another critical issue, has intensified the use of air conditioning (AC) units in tropical regions.^{8,9} During operation, AC

units reject low-grade heat (50–80°C) into the environment without recovery,¹⁰ thus constituting a widely available but underutilized thermal resource. In dense urban areas, the accumulation of waste heat from AC units can increase local ambient temperatures by up to 1°C,^{11,12} thereby exacerbating the urban heat island effect. Recovering this waste heat therefore offers a dual benefit: improving energy utilization and mitigating localized thermal accumulation.

One potential approach to utilizing this waste heat is evaporation–condensation desalination, whereby hot air is directed over seawater to generate vapor that is subsequently condensed into freshwater. The use of waste heat from AC units as a thermal source can drive the desalination process while simultaneously reducing environmental thermal discharge and producing freshwater as a valuable by-product. Airflow over water surfaces has been shown to significantly enhance evaporation by increasing convective heat and mass transfer at the air–water interface¹³ and influence distillation productivity in evaporation–condensation desalination systems.¹⁴

1.1 | Literature review of desalination using AC

Previous studies have investigated heat pumps, solar thermal systems, photovoltaic thermal (PV/T) systems, and AC-assisted desalination technologies, including multistage flash distillation (MSF), membrane distillation (MD), adsorption desalination (ADS), and humidification–dehumidification (HDH), to improve thermal efficiency and reduce energy consumption.^{15–20} Although hybrid desalination systems driven by low-grade thermal energy have shown promising capability for improving freshwater productivity and energy,^{21–23} many existing systems are designed for relatively large-scale applications and commonly require solar collectors, auxiliary heating systems, or complex thermal integration.

Recent studies have also explored the recovery of waste heat from residential AC systems for simultaneous cooling and freshwater production. Condenser waste heat from vapor–compression refrigeration systems has been reported to provide sufficient low-grade thermal energy for seawater heating and evaporation in HDH and membrane-based desalination systems.^{24–27} Nevertheless, many proposed systems still depend on solar-assisted heating, evaporative condensers, multistage humidification arrangements, or additional thermal components, all of which increase complexity and installation cost.

Evaporation enhancement remains a key factor governing freshwater productivity because thermal desalination strongly depends on heat and mass transfer at the air–water interface. Previous studies have shown that improving airflow characteristics, turbulence intensity, and boundary-layer disruption significantly enhances evaporation and vapor transport.^{28,29} Other enhancement techniques, including thin-film evaporation, wick structures, porous materials, and photo-thermal evaporation, have also demonstrated improved freshwater productivity.^{30,31} Previous investigations further reported that lowering pressure above the water surface increases the driving force of evaporation due to higher vapor pressure at the liquid surface.³²

Based on these considerations, the present study investigates a residential split-type AC waste-heat-driven desalination system

combined with vortex-generator-assisted airflow enhancement. In contrast to many previous solar-driven or multi-component HDH desalination systems, the proposed configuration focuses on a compact household-scale arrangement utilizing existing residential AC infrastructure. Hot air rejected from the condenser is directed through an evaporation channel above the brine surface, while vortex generators intensify airflow mixing and turbulence near the air–water interface. Combined experimental investigation and CFD analysis were performed to evaluate evaporation behavior, freshwater production, and AC operational performance, thereby contributing to decentralized and energy-efficient desalination technology development.

1.2 | Statement of industrial relevance and novelty

This study is relevant to applications in which energy efficiency and resource recovery are increasingly important, such as heating, ventilation, and air conditioning (HVAC), desalination, and sustainable residential building. Residential AC units continuously discharge low-grade waste heat that is generally released without productive utilization. The proposed system demonstrates how this waste heat can drive a compact evaporation–condensation desalination process capable of producing freshwater at the household scale, particularly for coastal housing, tourism facilities, and small-island infrastructure.

Our previous study demonstrated that vortex generators significantly enhanced evaporation in AC-assisted desalination systems,³³ but the work was limited to numerical analysis without experimental validation or evaluation of system-level performance.

The novelty of the present study lies in its integration of vortex-generator-assisted airflow enhancement with a compact household-scale desalination system driven by residential split-type AC waste heat. In contrast to previous AC-assisted desalination studies that focused mainly on thermodynamic cycle integration or HDH configuration, this work emphasizes airflow-driven evaporation intensification through channel geometry modification and turbulence enhancement. The study further evaluates the trade-off between evaporation enhancement and AC operational performance under different channel cross-sectional areas using combined CFD simulations and experimental validation.

This study therefore aims to design, analyze, and validate a household-scale desalination unit utilizing waste heat from a residential split-type AC system. The effects of channel geometry and vortex generators on airflow behavior, evaporation enhancement, air temperature reduction, and AC coefficient of performance (COP) were systematically evaluated using experimental measurements and CFD simulations.

2 | MATERIALS AND METHODS

2.1 | Description of the desalination unit

The desalination unit (DU) was integrated with a residential AC system to recover condenser waste heat for freshwater production through evaporation–condensation processes. In this system, saline

T denotes temperature, H represents humidity, and V indicates air velocity. The subscripts are defined as follows: a refers to the ambient condition, e to the air channel entering the condenser, $i1$ and $o1$ to the inlet and outlet of the heat exchanger (HE), respectively, and w to water. Similarly, $i2$ and $o2$ represent the inlet and outlet of the condenser in the desalination unit (DU). The subscripts fw and fd correspond to fresh water and feed water, respectively. The numerical positions 1 through 6 indicate sequential measurement points: before the HE, after the HE, before entering the air duct, after exiting the air duct, before the DU condenser, and after the DU condenser.

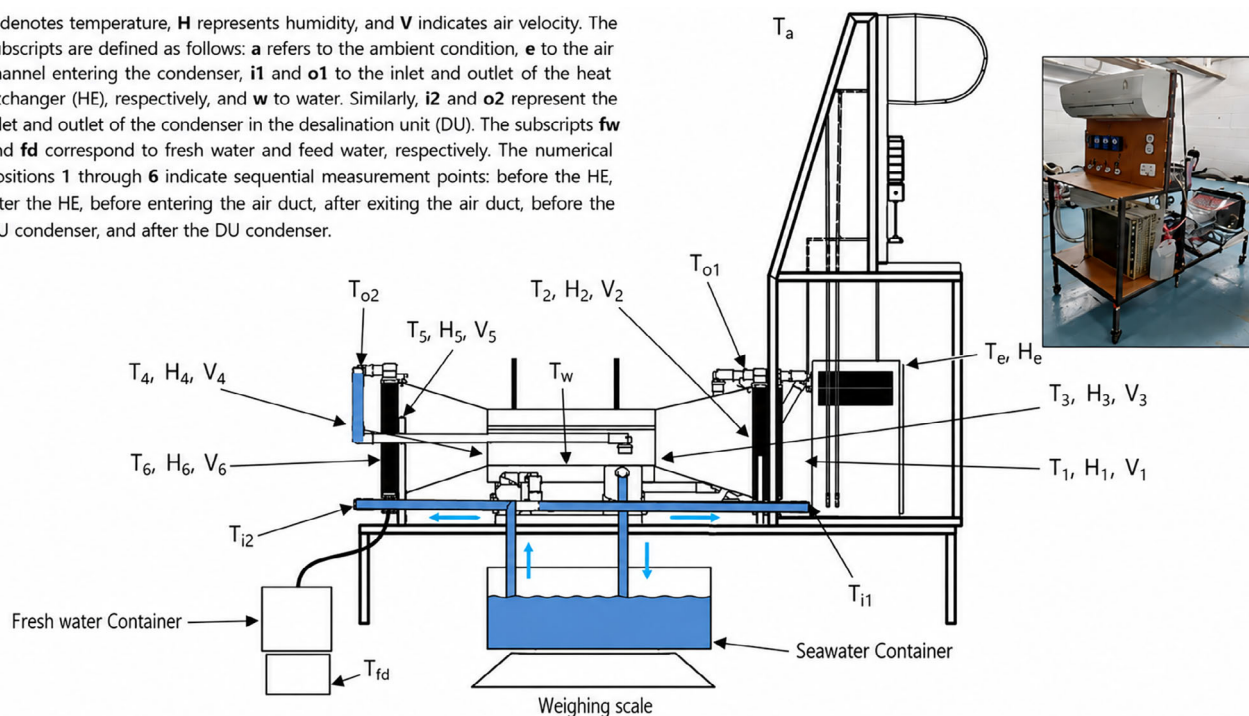


FIGURE 1 Experimental rig.

feedwater is heated using AC waste heat to generate water vapor, which is then condensed on a cooler surface to produce distilled water.

Natural seawater with an initial salinity of approximately 35 ppt was placed inside an evaporator chamber and heated indirectly by a heat exchanger containing freshwater circulated from the AC condenser waste heat loop. The increased seawater temperature promoted evaporation, and the generated vapor subsequently condensed on a cooler surface to produce freshwater. In addition, airflow from the AC condenser was directed through a channel above the water surface to enhance evaporation through forced convection by increasing airflow velocity, turbulence intensity, and vapor transport near the air–water interface. The airflow channel was configured with cross-sectional areas of 0.006, 0.012, 0.018, 0.024, 0.030, 0.036, and 0.042 m², each tested with and without vortex generators (VG and NVG). The vortex generators enhanced airflow mixing and boundary-layer disruption, thereby improving heat and mass transfer during evaporation. The experimental setup is shown in Figure 1.

2.2 | Experimental setup and procedures

The data in this study were obtained experimentally and compared using CFD simulation. The instruments used are presented in Table 1.

To enhance airflow mixing and evaporation performance inside the channel, a delta-wing vortex generator (Figure 2a) was selected because it efficiently directs airflow and generates strong vortices

TABLE 1 Experimental instruments.

Device	Range	Accuracy
Thermocouples PT100	−50–110°C	±0.1°C
Weighing scales	0–20 kg	±0.05%
Humidity meter	10%–99%	±1%
Anemometer GM-816	0–30 m/s	±5%
Pressure gauge class 1,6	0–550 psi	±1.6%
Pressure meter PCE-PDA 1L	±2 kPa	±0.5%
Salinity refractometer ATC	0–100 ppt	±1 ppt

with relatively low flow resistance.³⁴ The ratio of channel height to vortex generator height was set at 0.47 to balance vortex formation and flow obstruction, thereby enhancing mixing while limiting aerodynamic losses.^{35,36} In addition, a spacing-to-channel-length ratio of 0.18 was applied to sustain vortex interaction and turbulence,³⁷ while a 45° attack angle was selected to optimize vortex strength, flow attachment, and thermo-hydraulic performance.³⁸ The simulated evaporation region is indicated by the red arrows in Figure 2b, while areas outside this region were excluded from the model scope.

The results were validated using CFD simulations performed with Cradle CFD based on its continuity, momentum, and energy equations. Detailed governing equations and numerical settings are provided in Appendix S1.

An octagonal mesh was employed because it provides better grid quality and smoother element transition in complex geometries

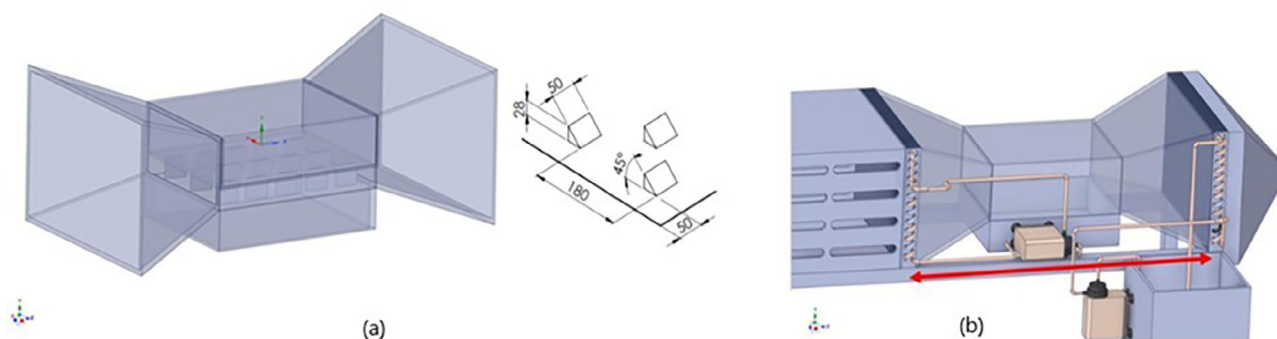


FIGURE 2 Vortex generator (a) and evaporation zone (b).

TABLE 2 Mesh independence study.

No.	No. of elements	Evaporation rate (kg/s m ³)	Difference (%)
1	141,567	0.003998	–
2	221,325	0.004489	0.12
3	532,624	0.004623	0.03
4	821,653	0.004623	0.00
5	1,036,877	0.004623	0.00

compared with conventional triangular or quadrilateral meshes, thereby improving numerical stability and simulation accuracy. A mesh size of 0.05 with a refined region of 0.02 was used, resulting in 532,624 elements based on the mesh independence study (see Table 2).

The mesh independence study was conducted using five mesh densities. The evaporation rate became constant beyond 532,624 elements, indicating that further refinement would have a negligible influence on the simulation results. A relative deviation below 10% was considered acceptable for establishing mesh independence.^{39–41}

The simulations focused on evaporation dynamics inside the airflow channel downstream of the AC condenser, where inlet air temperatures reached approximately 55°C. The channel cross-sectional area was varied from 0.042 to 0.006 m² to systematically evaluate the effect of airflow confinement on evaporation performance and AC operation. The maximum area of 0.042 m² was selected to represent a relatively low-confinement condition, corresponding to approximately two-thirds of the estimated effective condenser fan flow area. The area was then gradually reduced to 0.006 m² to increase airflow velocity over the seawater surface and intensify convective heat and mass transfer. However, reducing the channel area also increased pressure drop and airflow resistance, allowing the study to identify the trade-off between evaporation enhancement and AC COP reduction.

Because the desalination unit was directly integrated with the AC system, the operational parameters were selected to represent practical residential operating conditions while evaluating the

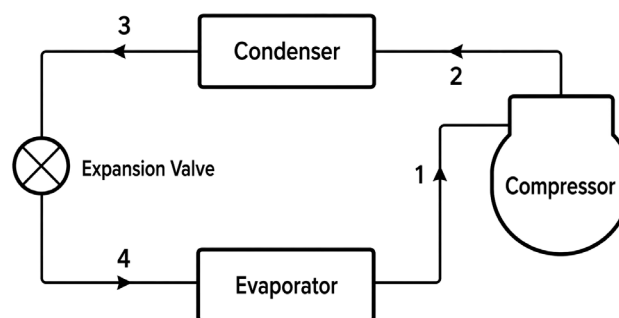


FIGURE 3 Schematic of the refrigeration loop.

trade-off between evaporation enhancement and AC performance. Smaller channel areas increased airflow velocity and evaporation intensity, but also increased pressure losses and reduced condenser heat rejection effectiveness, thereby lowering AC COP. Conversely, larger channel areas reduced pressure losses but weakened evaporation enhancement. The vortex generator geometry was adopted from previous thermo-fluid studies³³ to enhance airflow mixing and boundary-layer disruption with minimal aerodynamic penalty.

AC performance was evaluated by measuring refrigerant pressure and temperature at several points in the refrigeration loop, as illustrated in Figure 3. Since the residential split-type AC operated as a factory-integrated commercial unit, condenser fan current and standalone fan power were not measured separately. Therefore, the performance evaluation was based on overall system COP variation before and after integration with the desalination unit. The experiments employed a residential split-type AC unit (SHARP AH-A9BEY2, 1 PK), representing a typical household cooling system in tropical regions. The operating temperature range of 50–60°C corresponded to practical condenser waste heat conditions during normal AC operation while remaining sufficiently low to minimize severe scaling formation.

The following expressions were used to calculate the performance of the vapor compression refrigeration system,⁴² the process refers to Figure 3:

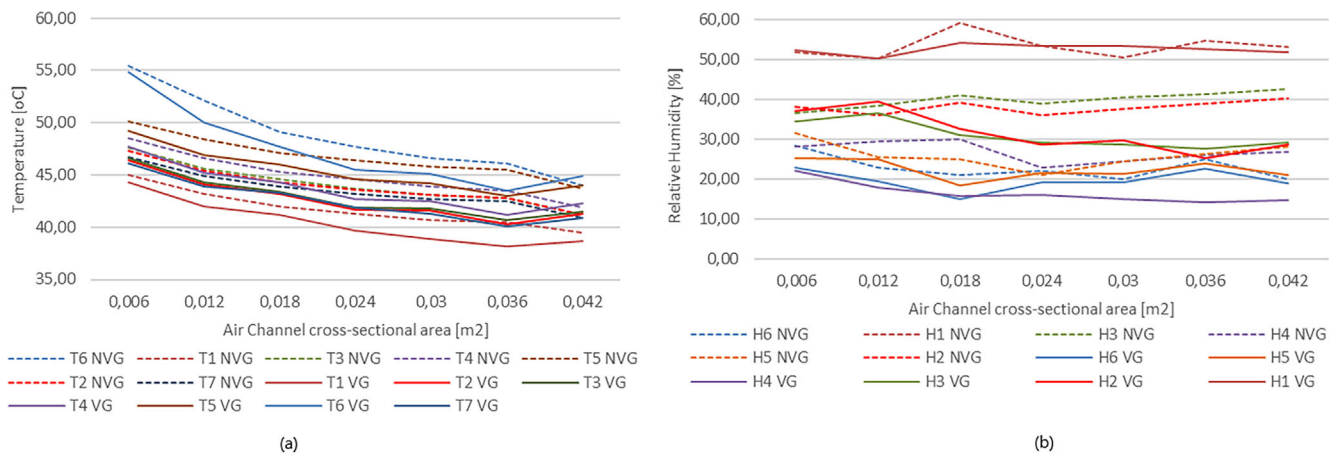


FIGURE 4 Desalination unit temperature (a) and relative humidity (b).

Compression process (processes 1–2):

$$W_c = (h_2 - h_1) \quad (1)$$

Heat rejection process (processes 2–3):

$$Q_c = (h_2 - h_3) \quad (2)$$

Throttling (processes 3–4):

$$h_3 = h_4 \quad (3)$$

Heat absorption (processes 1–4):

$$R_e = (h_1 - h_4) \quad (4)$$

Coefficient of performance (COP):

$$\text{COP} = \frac{R_e}{W_c} \quad (5)$$

3 | RESULTS AND DISCUSSION

The experiment evaluated evaporation and condensation behavior using temperature and relative humidity measurements. As shown in Figure 4a, the air temperature decreased for both NVG and VG configurations due to evaporative cooling, while Figure 4b shows that smaller channel cross-sectional areas produced larger humidity fluctuations because of stronger airflow interaction. The relative humidity distribution supports the temperature and evaporation trends. As hot air from the AC condenser passed over the seawater surface, additional water vapor was generated, increasing the local relative humidity. However, RH did not increase uniformly because it depends not only on the amount of vapor added but also on the local air temperature. Warmer air can hold more moisture,⁴³ therefore, some positions

near the condenser fan showed lower RH despite active evaporation. Smaller channel areas produced stronger airflow interaction and larger RH fluctuations, indicating more intensive vapor transport and mixing. In contrast, larger channel areas showed more uniform RH values because of lower airflow velocity and weaker local disturbance. The VG configuration further promoted local mixing, although the RH variation remained strongly governed by channel geometry and temperature distribution. The desalination unit reduced incoming hot-air temperature by approximately 6–11°C.

Although the experiments were conducted under controlled laboratory conditions, ambient temperature and humidity are expected to influence evaporation driving force and condenser heat rejection in practical tropical environments. Higher ambient temperatures may enhance evaporation but simultaneously reduce condenser cooling effectiveness and AC COP, particularly in smaller channel areas with higher airflow resistance. Conversely, high ambient humidity may reduce the vapor pressure gradient and shift the optimal operating condition towards slightly larger channel cross-sectional areas with lower pressure losses.

Consistent with the observed temperature and humidity distributions, Figure 5a shows that increasing the channel cross-sectional area consistently reduced evaporation for both NVG and VG configurations because larger areas decreased airflow velocity and convective heat and mass transfer.²⁸ Smaller areas generated higher airflow velocity and shear stress, thinning the boundary layer above the water surface and enhancing vapor diffusion. The VG configuration further increased evaporation by inducing longitudinal vortices that enhanced turbulence, airflow mixing, and boundary-layer disruption,^{44,45} although channel geometry remained the dominant factor.

A comparison between the experimental and CFD results demonstrated strong agreement, with coefficients of determination of $R^2 = 0.9643$ and $R^2 = 0.958$ for NVG and VG configurations (Figure 5b), respectively.^{46,47} Average deviations remained within the accepted validation threshold, reaching 10% for NVG and 6% for VG,^{48,49} confirming that the CFD model reliably predicts evaporation behavior across different channel geometries. The produced

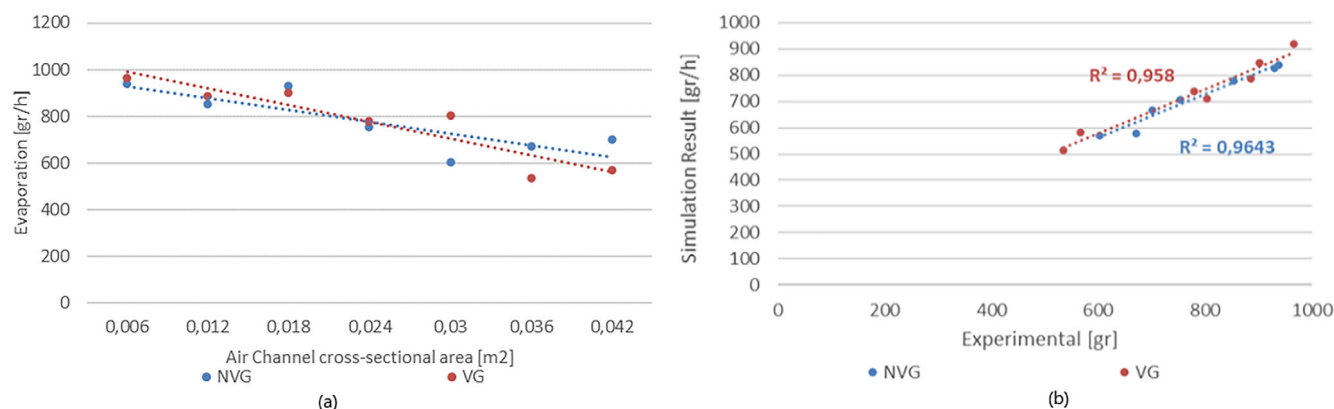


FIGURE 5 Evaporation results for each channel cross-sectional area (a) and comparison of the experimental and simulation results (b).

freshwater had a TDS of approximately 71 ppm and a pH of 6.5, which remain within the acceptable ranges specified by WHO⁵⁰ and the Indonesian Ministry of Health regulations for clean water quality.⁵¹ These results also indicate that seawater was not significantly carried over into the condensation section, since the seawater used in this study had a TDS of 31,710 ppm and a pH of 7.7, which are within the typical ranges for seawater, namely a TDS of approximately 29,000–39,000 ppm⁵² and a pH ranging from 7.5 to 8.4.⁵³

At the smallest channel cross-sectional area (0.006 m²), the increased flow confinement produced higher pressure losses and reduced condenser airflow effectiveness. Nevertheless, the condenser fan remained operational throughout the experiments without observable flow interruption or stall conditions. Although the fan power and electrical current were not monitored separately from the AC system, the reduction in the overall AC COP indirectly reflects the increased aerodynamic resistance experienced by the condenser airflow under smaller channel geometries.

During operation, continuous evaporation and the addition of make-up seawater gradually increased salinity from approximately 35 ppt to nearly 55 ppt after 8 h. The higher salinity reduced water activity and saturation vapor pressure, slightly decreasing the evaporation driving force. Nevertheless, severe scaling was not observed on the heat exchanger because evaporation mainly occurred in the evaporator basin rather than on the heating surface. Small salt deposits gradually accumulated at the bottom of the basin, while moderate operating temperatures (50–60°C), continuous circulation, and forced airflow helped suppress local supersaturation and scaling formation. However, long-term operation may still require periodic brine discharge or seawater replacement.

Since the residential split-type AC operated as a factory-integrated commercial system, the condenser fan current and standalone fan power were not monitored separately. AC operational performance was evaluated using the COP calculated from Equations (1)–(5). Conventional residential AC systems generally exhibit COP values between 3.02 and 4.04,^{54,55} while the baseline COP of the AC unit used in this study was 3.92. After integration with the desalination unit, smaller channel areas produced higher pressure losses, restricting condenser airflow and reducing heat rejection effectiveness, thereby lowering

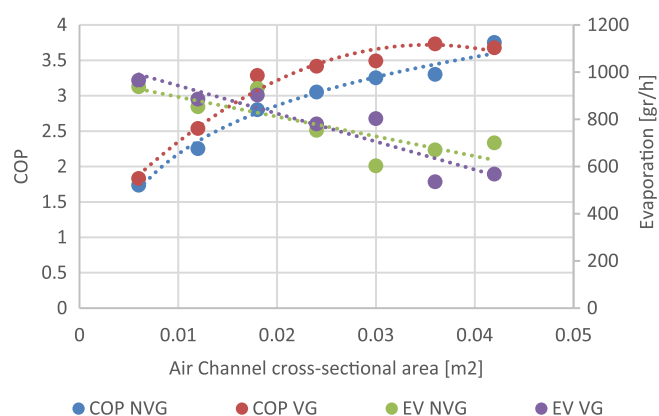


FIGURE 6 COP of split-type AC compared with evaporation for each cross-sectional area.

COP. Nevertheless, the condenser fan remained operational throughout the experiments without observable flow interruption or stall conditions.

As shown in Figure 6, COP increased progressively with increasing channel cross-sectional area because larger channels reduced airflow resistance and pressure drop. However, evaporation and COP did not exhibit a direct cause–effect relationship; both responded independently to airflow characteristics induced by channel geometry. Smaller channel areas increased airflow velocity and evaporation, while the associated pressure losses simultaneously reduced condenser performance and COP. Thus, the observed changes in evaporation and COP were primarily governed by airflow velocity and pressure-drop effects rather than by direct interaction between the two parameters.

A preliminary economic analysis showed that the system produced approximately 950–980 mL/h of freshwater (7.6–7.8 L during 8 h of operation). Based on the observed COP reduction from 3.92 to 3.02 and a cooling capacity of 2.64 kW, the additional electricity consumption was estimated at approximately 1.61 kWh per 8 h cycle, corresponding to an operational cost of about USD 0.13 or USD 0.017/L of freshwater produced. Although capital and maintenance costs were not included, the results indicate promising potential for

low-cost household-scale freshwater production using readily available AC waste heat.

4 | CONCLUSION

This study demonstrates that waste heat from residential split-type AC units can drive an evaporation–condensation desalination process. Increasing the channel cross-sectional area reduced air temperature by approximately 6–11°C and improved AC performance by lowering pressure drop and enhancing heat rejection, although freshwater production decreased accordingly. The system produced approximately 950–980 mL/h of freshwater, indicating the potential to satisfy basic household drinking water requirements. A preliminary economic analysis estimated the additional operational cost at approximately USD 0.017/L of freshwater produced. Experimental–CFD validation showed strong agreement ($R^2 > 0.95$), with deviations of 6%–10%, confirming the reliability of the numerical model. Smaller channel areas enhanced evaporation but reduced AC COP because of higher airflow resistance and pressure losses, whereas a channel area of 0.015–0.025 m² provided the best balance between freshwater production and AC efficiency.

Although the study was conducted under controlled conditions using a single AC configuration, the results demonstrate the feasibility of household-scale desalination using AC waste heat. Future work should investigate long-term operation, varying environmental conditions, and system scalability. While severe scaling was not observed on the heat exchanger surface, gradual salt accumulation occurred at the bottom of the evaporator basin during prolonged operation, indicating that periodic brine discharge, seawater replacement, or routine cleaning may be required for stable long-term performance.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

Dan Mugisidi: Conceptualization; writing – review and editing; investigation; methodology; writing – original draft; formal analysis; funding acquisition; supervision. **Oktarina Heriyani:** Conceptualization; investigation; software; data curation; project administration; supervision. Conceptualization; investigation; data curation; formal analysis; supervision. **Amir Khalid:** Writing – review and editing; visualization; conceptualization. Conceptualization; visualization; validation; software; writing – review and editing. **Ahmed Rahmani:** Writing – review and editing; validation; conceptualization.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge that this study builds upon prior work entitled *CFD Simulation for Optimizing the Evaporation Process in Seawater Desalination Using Exhaust Heat from AC and Vortex Generators*. This research was supported by a grant provided by the DPPM Kemendikisaintek based on Decree No: 124/C3/DT.05.00/PL/2025, 0992/LL3/AL.04/2025, 280/F.03.07/2025.

CONFLICT OF INTEREST STATEMENT

The authors declare no conflicts of interest.

DATA AVAILABILITY STATEMENT

The data that support the findings of this study are available on request from the corresponding author. The data are not publicly available due to privacy or ethical restrictions.

ORCID

Dan Mugisidi  <https://orcid.org/0000-0002-5165-3664>

Ahmed Rahmani  <https://orcid.org/0000-0002-4587-396X>

Amir Khalid  <https://orcid.org/0000-0002-0193-3027>

REFERENCES

- Petersen L, Heynen M, Pellicciotti F. Freshwater resources: past, present, future. *International Encyclopedia of Geography*. Wiley; 2019:1–12. doi:[10.1002/9781118786352.wbieg0712.pub2](https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0712.pub2)
- Schewe J, Heinke J, Gerten D, Haddeland I, Arnell NW. Multimodel assessment of water scarcity under climate change. *Proc Natl Acad Sci U S A*. 2014;111(9):3245–3250. doi:[10.1073/pnas.1222460110](https://doi.org/10.1073/pnas.1222460110)
- Belessiotis V, Kalogirou S, Delyannis E. In: Convey M, ed. *Thermal Solar Desalination – Methods and Systems*. 1st ed. Academic Press; 2016.
- Pauli BJ. The Flint water crisis. *Wiley Interdiscip Rev: Water*. 2020;7(3):1–14. doi:[10.1002/WAT2.1420](https://doi.org/10.1002/WAT2.1420)
- Hossain MJ, Chowdhury MA, Jahan S, Zzaman RU, Islam SLU. Drinking water insecurity in southwest coastal Bangladesh: how far to SDG 6.1? *Water (Switzerland)*. 2021;13(24):2–19. doi:[10.3390/w13243571](https://doi.org/10.3390/w13243571)
- Kamu A, Surianshah S, Tumiran SA, Ishak NI, Makmud MZH. Assessing household water insecurity and financial capacity for the cleaned water supply services in coastal fishing communities: a case study in Lok Dangkaan Village, Pitas, Sabah. *J Environ Microbiol Toxicol*. 2024;12(2):38–43. doi:[10.54987/jemat.v12i2.1018](https://doi.org/10.54987/jemat.v12i2.1018)
- Syarif Sukri A, Karama R, Talanipa R, Kadir A, Hasriani Aswad N. Utilization management to ensure clean water sources in coastal areas. *J Hum Earth Future*. 2023;4(1):23–35.
- Gargani J. The impact of climate change on energy consumption on small tropical Islands. *Climate*. 2024;12(12):227. doi:[10.3390/cli12120227](https://doi.org/10.3390/cli12120227)
- Falchetta G, de Cian E, Pavanello F, Wing IS. Inequalities in global residential cooling energy use to 2050. *Nat Commun*. 2024;15(1):1–13. doi:[10.1038/s41467-024-52028-8](https://doi.org/10.1038/s41467-024-52028-8)
- Hwang Y, Radermacher R, Kopko W. An experimental evaluation of a residential-sized evaporatively cooled condenser. *Int J Refrig*. 2001;24:238–249. doi:[10.1016/S0140-7007\(00\)00022-0](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(00)00022-0)
- De Munck C, Pigeon G, Masson V, et al. How much can air conditioning increase air temperatures for a city like Paris, France? *Int J Climatol*. 2013;33(1):210–227. doi:[10.1002/joc.3415](https://doi.org/10.1002/joc.3415)
- Jin L, Schubert S, Salim MH, Schneider C. Impact of air conditioning systems on the outdoor thermal environment during summer in Berlin, Germany. *Int J Environ Res Public Health*. 2020;17(13):1–21. doi:[10.3390/ijerph17134645](https://doi.org/10.3390/ijerph17134645)
- Wirangga R, Mugisidi D, Sayuti AT, Heriyani O. The impact of wind speed on the rate of water evaporation in a desalination chamber. *J Adv Res Fluid Mech Therm Sci*. 2023;106(1):39–50. doi:[10.37934/arfmts.106.1.3950](https://doi.org/10.37934/arfmts.106.1.3950)
- Rahmani A, Bouzid L, Chouaf F. Wind direction effect on the thermal performance of the single-slope solar still. *Environ Prog Sustain Energy*. 2026;45(ep.70382):1–11. doi:[10.1002/ep.70382](https://doi.org/10.1002/ep.70382)
- Yang J, Zhang C, Lin X, Zhang Z, Yang L. Wastewater desalination system utilizing a low-temperature heat pump. *Int J Energy Res*. 2018;42(3):1132–1138. doi:[10.1002/er.3909](https://doi.org/10.1002/er.3909)
- Dehghani S, Date A, Akbarzadeh A. Performance analysis of a heat pump driven humidification-dehumidification desalination system. *Desalination*. 2018;445:95–104. doi:[10.1016/j.desal.2018.07.033](https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.07.033)

17. Shafii MB, Jafarholi H, Faegh M. Experimental investigation of heat recovery in a humidification-dehumidification desalination system via a heat pump. *Desalination*. 2018;437:81-88. doi:[10.1016/j.desal.2018.03.004](https://doi.org/10.1016/j.desal.2018.03.004)
18. Shahzad MK, Ding Y, Zhang H, Dong Y, Jamil SR, Gillani SSJ. Energy efficiency analysis of novel combined open absorption multifunctional heat pump and FlashME desalination system with a compressed air dryer. *Desalination*. 2024;582:117662. doi:[10.1016/j.desal.2024.117662](https://doi.org/10.1016/j.desal.2024.117662)
19. Caballero-Talamantes FJ, Velázquez-Limón N, Aguilar-Jiménez JA, et al. A novel high vacuum MSF/MED hybrid desalination system for simultaneous production of water, cooling and electrical power, using two barometric ejector condensers. *Processes*. 2024;12(12):2927. doi:[10.3390/pr12122927](https://doi.org/10.3390/pr12122927)
20. Shahzad MK, Ding Y, Zhang H, Dong Y, Jamil SR, Adnan M. Performance analysis of a novel combined open absorption heat pump and FlashME seawater desalination system for flue gas heat and water recovery. *Energ Convers Manage*. 2024;301:117996. doi:[10.1016/j.enconman.2023.117996](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2023.117996)
21. Zayed ME, Ghazy M, Shboul B, et al. Enhanced performance of a hybrid adsorption desalination system integrated with solar PV/T collectors: experimental investigation and machine learning modeling coupled with manta ray foraging algorithm. *Appl Therm Eng*. 2024; 255:124023. doi:[10.1016/j.applthermaleng.2024.124023](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124023)
22. Ghazy M, Zayed ME, Rehman S, et al. Dynamic numerical modeling and performance assessment of a hybrid photovoltaic thermal collector adsorption desalination system for sustainable water-energy nexus. *Solar Energy*. 2025;292:113441. doi:[10.1016/j.solener.2025.113441](https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113441)
23. Aboelmaaref MM, Zayed ME, Li Y, et al. Performance assessment of hybrid adsorption/humidification-dehumidification desalination cycle powered by dish/stirling concentrated solar power system for sustainable freshwater production maximization. *Process Saf Environ Protection*. 2025;193:1094-1113. doi:[10.1016/j.psep.2024.11.109](https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.11.109)
24. Saxena A, Tangellapalli S. Performance evaluation of solar-activated integrated double-stage water desalination and air conditioning plant. *Int J Refrig*. 2024;160:119-128. doi:[10.1016/j.ijrefrig.2024.02.001](https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.02.001)
25. Rady M, Albatati F, Hegab A, Abuhabaya A, Attar A. Design and analysis of waste heat recovery from residential air conditioning units for cooling and pure water production. *Int J Low-Carbon Technol*. 2021; 16(3):1018-1032. doi:[10.1093/ijlct/ctab033](https://doi.org/10.1093/ijlct/ctab033)
26. Anand B, Murugavel S. Performance analysis of a novel augmented desalination and cooling system using modified vapor compression refrigeration integrated with humidification-dehumidification desalination. *J Clean Prod*. 2020;255:120224. doi:[10.1016/j.jclepro.2020.120224](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120224)
27. Santosh R, Kumaresan G, Selvaraj S, Arunkumar T, Velraj R. Investigation of humidification-dehumidification desalination system through waste heat recovery from household air conditioning unit. *Desalination*. 2019;467:1-11. doi:[10.1016/j.desal.2019.05.016](https://doi.org/10.1016/j.desal.2019.05.016)
28. Mugisidi D, Heriyani O. Improving the performance of a forced-flow desalination unit using a vortex generator. *CFD Lett*. 2024;16(10):81-93. doi:[10.37934/cfdl.16.10.8193](https://doi.org/10.37934/cfdl.16.10.8193)
29. Nurkholid MD, Widodo HO, Sulistiono I. Enhancing seawater desalination performance using a vortex generator in a modified window air conditioner. *Disseminat Information Res Mech Eng - J Polimesin*. 2025;23(1):38-42. <http://e-jurnal.pnl.ac.id/polimesin>
30. Sharshir SW, Rozza MA, Joseph A, et al. An augmented pyramid distiller combining thin-film evaporation, reflectors, water heater, and cover cooling: thermo-economic-environmental approach. *Solar Energy*. 2025;288:113321. doi:[10.1016/j.solener.2025.113321](https://doi.org/10.1016/j.solener.2025.113321)
31. Zhou W, Huang H, Wang Z, et al. Impact of functional groups on cellulose nanofibers on the state of water molecules, photocatalytic water splitting, and photothermal water evaporation. *J Mater Chem A Mater*. 2024;12(7):4046-4056. doi:[10.1039/d3ta06600b](https://doi.org/10.1039/d3ta06600b)
32. Mugisidi D, Fajar B, Syaiful S, et al. Iron sand as a heat absorber to enhance performance of a single-basin solar still. *J Adv Res Fluid Mech Therm Sci*. 2020;70(1):125-135. doi:[10.37934/arfmts.70.1.125135](https://doi.org/10.37934/arfmts.70.1.125135)
33. Heriyani O, Mugisidi D, Rifky. CFD simulation for optimizing the evaporation process in seawater desalination using exhaust heat from AC and vortex generators. *Desalination Water Treat*. 2025;22: 101145. doi:[10.1016/J.DWT.2025.101145](https://doi.org/10.1016/J.DWT.2025.101145)
34. Zhao Z, Luo L, Qiu D, Wang Z, Sundén B. On the solar air heater thermal enhancement and flow topology using differently shaped ribs combined with delta-winglet vortex generators. *Energy*. 2021;224: 1-17. doi:[10.1016/j.energy.2021.119944](https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.119944)
35. Sherza JS, Dhiab DA, Taher FA, Shari NQ, Hamad FA. Numerical investigation of the hydrothermal performance of rectangular and V-shape vortex generators in a square channel. *CFD Lett*. 2025;17(9): 104-126. doi:[10.37934/cfdl.17.9.104126](https://doi.org/10.37934/cfdl.17.9.104126)
36. Chen L, Zhang XR, Okajima J, Komiya A, Maruyama S. Numerical simulation of stability behaviors and heat transfer characteristics for near-critical fluid microchannel flows. *Energ Convers Manage*. 2016; 110:407-418. doi:[10.1016/j.enconman.2015.12.031](https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.12.031)
37. Dietz CF, Henze M, Neumann SO, Von Wolfersdorf J, Weigand B. The effects of vortex structures on heat transfer and flow field behind arrays of vortex generators. *J Enhanced Heat Transf*. 2009; 171-188. doi:[10.1615/JEnhHeatTransf.v16.i2.60](https://doi.org/10.1615/JEnhHeatTransf.v16.i2.60)
38. Min C, Qi C, Wang E, Tian L, Qin Y. Numerical investigation of turbulent flow and heat transfer in a channel with novel longitudinal vortex generators. *Int J Heat Mass Transf*. 2012;55(23-24):7268-7277. doi:[10.1016/j.jheatmasstransfer.2012.07.055](https://doi.org/10.1016/j.jheatmasstransfer.2012.07.055)
39. Fu H, Sun H, Yang L, Yan L, Luan Y, Magagnato F. Effects of the configuration of the delta winglet longitudinal vortex generators and channel height on flow and heat transfer in minichannels. *Appl Therm Eng*. 2023;227:120401. doi:[10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.120401](https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2023.120401)
40. Shoeibi S, Rahbar N, Esfahlani AA, Kargarsharifabad H. Energy matrices, exergoeconomic and enviroeconomic analysis of air-cooled and water-cooled solar still: experimental investigation and numerical simulation. *Renew Energy*. 2021;171:227-244. doi:[10.1016/j.renene.2021.02.081](https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.081)
41. Gnanavel C, Saravanan R, Chandrasekaran M. CFD analysis of solar still with PCM. *Mater Today Proc*. 2020;37(Part 2):694-700. doi:[10.1016/j.matpr.2020.05.638](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.05.638)
42. Widodo, Kiono BFT, Winoto SH, Utomo TS. Performance analysis of using hydrocarbon mixed refrigerant R32-R290 as an alternative to R410A in reducing the GWP value of household split air conditioners. *J Adv Res Fluid Mech Therm Sci*. 2023;107(2):103-116. doi:[10.37934/arfmts.107.2.103116](https://doi.org/10.37934/arfmts.107.2.103116)
43. Yan C, Na T, Zhen Q, Sun Y, Liu K. Prediction of air temperature and humidity in greenhouses via artificial neural network. *PLoS One*. 2025; 20:e0325650. doi:[10.1371/journal.pone.0325650](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0325650)
44. Raihan MFB, Al-Asadi MT, Thompson HM. Management of conjugate heat transfer using various arrangements of cylindrical vortex generators in micro-channels. *Appl Therm Eng*. 2021;182:116097. doi:[10.1016/j.applthermaleng.2020.116097](https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116097)
45. Luo Y, Li G, Bennett NS, Luo Z, Munir A, Islam MS. Heat transfer enhancement in heat exchangers by longitudinal vortex generators: a review of numerical and experimental approaches. *Energies (Basel)*. 2025;18(11):1-49. doi:[10.3390/en18112896](https://doi.org/10.3390/en18112896)
46. Di Buchianico A. Coefficient of determination (R²). *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability*. Wiley Online Library; 2008. doi:[10.1002/9780470061572.eqr173](https://doi.org/10.1002/9780470061572.eqr173)
47. Nagelkerke NJD. A note on a general definition of the coefficient of determination. *Biometrika*. 1991;78(3):691-692.
48. Akello POO, Saoko CO, Kamau JN, Ndeda JOH. Uncertainty analysis and experimental validation of solar parabolic trough collector simulation model. *Clean Energy*. 2025;9(2):161-176. doi:[10.1093/ce/zkae115](https://doi.org/10.1093/ce/zkae115)

49. Erfani N, Symons D, Fee C, Watson MJ. Validation of continuous conjugate heat transfer model through experimental data. *Heat Transf Eng*. 2025;46(11):919-927. doi:[10.1080/01457632.2024.2355835](https://doi.org/10.1080/01457632.2024.2355835)
50. World Health Organization. *Guidelines for Drinking-Water Quality*. World Health Organization; 2017.
51. Kemenkes. *Peraturan Menteri Kesehatan Republik Indonesia 2 Tahun 2023*. Berita Negara Republik Indonesia; 2023.
52. Rusydi AF. Correlation between conductivity and total dissolved solid in various type of water: a review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Vol 118. Institute of Physics Publishing; 2018. doi:[10.1088/1755-1315/118/1/012019](https://doi.org/10.1088/1755-1315/118/1/012019)
53. Srinivasan G, Marcus PN, Sivakumar P, et al. Ocean acidification impact on haematological and serum biochemical parameters in Lates calcarifer. *Front Mar Sci*. 2022;9:9. doi:[10.3389/fmars.2022.940573](https://doi.org/10.3389/fmars.2022.940573)
54. Alghamdi F, Krarti M. Review analysis for the energy performance of integrated air-conditioning systems. *Energies (Basel)*. 2025;18(7):1-35. doi:[10.3390/en18071611](https://doi.org/10.3390/en18071611)
55. Atmaca İ, Şenol A, Çağlar A. Performance testing and optimization of a split-type air conditioner with evaporatively-cooled condenser. *Eng Sci Technol Int J*. 2022;32:101064. doi:[10.1016/j.jestech.2021.09.010](https://doi.org/10.1016/j.jestech.2021.09.010)

SUPPORTING INFORMATION

Additional supporting information can be found online in the Supporting Information section at the end of this article.

How to cite this article: Mugisidi D, Heriyani O, Rifky, Widodo, Rahmani A, Khalid A. Airflow-enhanced evaporation–condensation seawater desalination using residential air conditioner waste heat. *Environ Prog Sustainable Energy*. 2026; e70555. doi:[10.1002/ep.70555](https://doi.org/10.1002/ep.70555)