EMPD 5 (2) Nopember 2026, 433-442 ISSN 2964-6987
Energy, Materials and Product Design
https://journal.unram.ac.id/index.php/empd

KINERJA MESIN PEMANEN AIR DARI UDARA PADA BERBAGAI POSISI EVAPORATOR KOIL DENGAN SISTEM KONVEKSI ALAMI

PERFORMANCE OF AN ATMOSPHERIC WATER HARVESTER UNDER DIFFERENT COIL EVAPORATOR POSITIONS WITH NATURAL CONVECTION

Mirmanto Mirmanto*, Ida Bagus Alit, Muhammad Ramli, Arif Mulyanto, Yesung Allo Padang

Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, Jl. Majapahit no. 62 Mataram, Mataram, NTB, 83125, Indonesia. WA 082111738971
**Corresponding author*
*E-mail addresses:*mmirmanto@gmail.com
https://doi.org/10.29303/empd.v5n2.433-442
Received 27 July 2026; Received in revised form 24 August 2026; Accepted 25 August 2026

ABSTRACT

Atmospheric water harvesting (AWH) offers a promising approach for freshwater production by extracting moisture from ambient air through condensation. However, previous AWH studies have primarily focused on system operating parameters and evaporator configurations, while the specific influence of evaporator orientation under natural convection conditions remains insufficiently investigated. This study addresses this gap by experimentally evaluating the effect of evaporator position on the performance of an AWH system using three coil orientations: horizontal, 45° inclined, and vertical. The novelty of this study lies in the systematic comparison of evaporator orientation under identical natural-convection operating conditions, with performance evaluated based on freshwater production, coefficient of performance (COP), heat absorption rate, and evaporator efficiency. The results showed that the horizontal configuration produced the highest freshwater yield of 0.511 kg during 7 h of operation, followed by the inclined configuration (0.494 kg) and vertical configuration (0.476 kg). The horizontal orientation also achieved the highest COP of 5.18, indicating superior system performance under the tested conditions. The improved performance is associated with more effective condensate drainage and utilization of the evaporator surface for moisture condensation. These findings demonstrate that evaporator orientation is an important design parameter for natural-convection AWH systems. The study contributes experimentally based guidance for optimizing evaporator placement as a simple design strategy to improve freshwater production and thermodynamic performance.

Keywords: *Atmospheric water harvesting, Evaporator orientation, Natural convection, Condensation, Freshwater production, Coefficient of performance*

1. Pendahuluan

Ketersediaan air bersih merupakan salah satu tantangan global yang semakin meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk, perubahan iklim, urbanisasi, dan eksploitasi sumber daya air yang berlebihan [1, 2, 3]. Peningkatan jumlah penduduk menyebabkan kebutuhan air bersih terus meningkat untuk keperluan rumah tangga, pertanian, industri, dan berbagai aktivitas lainnya. Di sisi lain, perubahan iklim dapat memengaruhi pola curah hujan, meningkatkan frekuensi kekeringan, dan mengurangi ketersediaan sumber air tawar di berbagai wilayah [1, 2]. Kondisi tersebut semakin kompleks akibat pencemaran sungai, danau, dan air tanah oleh aktivitas domestik maupun industri. Permasalahan ketersediaan dan kualitas air tersebut terutama menjadi tantangan di daerah kering, wilayah pesisir, pulau-pulau kecil, dan daerah terpencil yang memiliki keterbatasan sumber air permukaan maupun air

tanah [1, 2]. Oleh karena itu, diperlukan teknologi alternatif yang mampu menyediakan air secara mandiri, efisien, dan berkelanjutan. Salah satu teknologi yang berpotensi dikembangkan adalah *Atmospheric Water Harvester* (AWH), yaitu teknologi yang menghasilkan air dengan memanfaatkan uap air yang terdapat di atmosfer [4, 5, 6].

Salah satu pendekatan AWH adalah menggunakan sistem refrigerasi berbasis siklus kompresi uap. Sistem ini bekerja dengan mendinginkan udara lembap hingga temperatur permukaan evaporator berada di bawah temperatur titik embun (*dew point*), sehingga uap air dalam udara mengalami kondensasi pada permukaan evaporator dan selanjutnya dikumpulkan sebagai air [7, 8, 9]. Sistem AWH berbasis refrigerasi memiliki keunggulan berupa kemampuan menghasilkan air secara kontinu dan relatif tidak bergantung pada keberadaan sumber air permukaan maupun air tanah [5, 10]. Selain itu, sistem tersebut berpotensi diintegrasikan dengan sumber energi terbarukan, seperti fotovoltaik, sehingga dapat diterapkan pada wilayah yang memiliki keterbatasan infrastruktur air. Namun, konsumsi energi dan rendahnya produktivitas air pada kondisi lingkungan tertentu masih menjadi tantangan utama. Oleh karena itu, peningkatan perpindahan panas dan massa pada evaporator menjadi salah satu aspek penting dalam pengembangan sistem AWH yang lebih efektif dan efisien [8, 10].

Kinerja AWH dipengaruhi oleh kondisi lingkungan dan karakteristik sistem. Temperatur udara, kelembapan relatif, tekanan atmosfer, serta kondisi aliran udara menentukan jumlah uap air yang tersedia dan kemampuan udara memasok uap air ke permukaan evaporator [8, 11, 12, 13]. Kelembapan relatif yang lebih tinggi umumnya meningkatkan potensi kondensasi karena kandungan uap air dalam udara lebih besar [11, 12]. Selain kondisi lingkungan, karakteristik evaporator juga berperan penting karena evaporator merupakan komponen utama tempat terjadinya pelepasan kalor dari udara dan proses kondensasi. Luas permukaan perpindahan panas, diameter pipa, konfigurasi koil, jarak antarpipa, material, serta distribusi temperatur permukaan evaporator dapat memengaruhi perpindahan panas dan massa serta produktivitas air [8, 11, 12, 13]. Dengan demikian, optimasi konfigurasi evaporator merupakan salah satu pendekatan penting untuk meningkatkan kinerja AWH tanpa harus meningkatkan konsumsi energi secara signifikan.

Sejumlah penelitian sebelumnya telah mengkaji pengaruh kondisi operasi dan desain evaporator terhadap kinerja AWH. Peningkatan kelembapan relatif diketahui dapat meningkatkan laju kondensasi dan produktivitas air [14, 15]. Kecepatan aliran udara juga memengaruhi proses perpindahan panas dan massa pada evaporator [16, 17]. Selain parameter operasi, penelitian terdahulu telah mengembangkan berbagai konfigurasi evaporator, seperti *finned evaporator*, *microchannel evaporator*, dan evaporator berbentuk koil untuk meningkatkan luas permukaan perpindahan panas dan distribusi temperatur [18, 19, 20]. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa karakteristik dan konfigurasi evaporator memiliki pengaruh terhadap produktivitas air dan efisiensi sistem. Namun, sebagian besar kajian lebih berfokus pada geometri evaporator, luas permukaan, dan kondisi aliran udara, sedangkan pengaruh orientasi atau posisi evaporator terhadap proses kondensasi pada kondisi *natural convection* masih belum banyak dikaji secara sistematis.

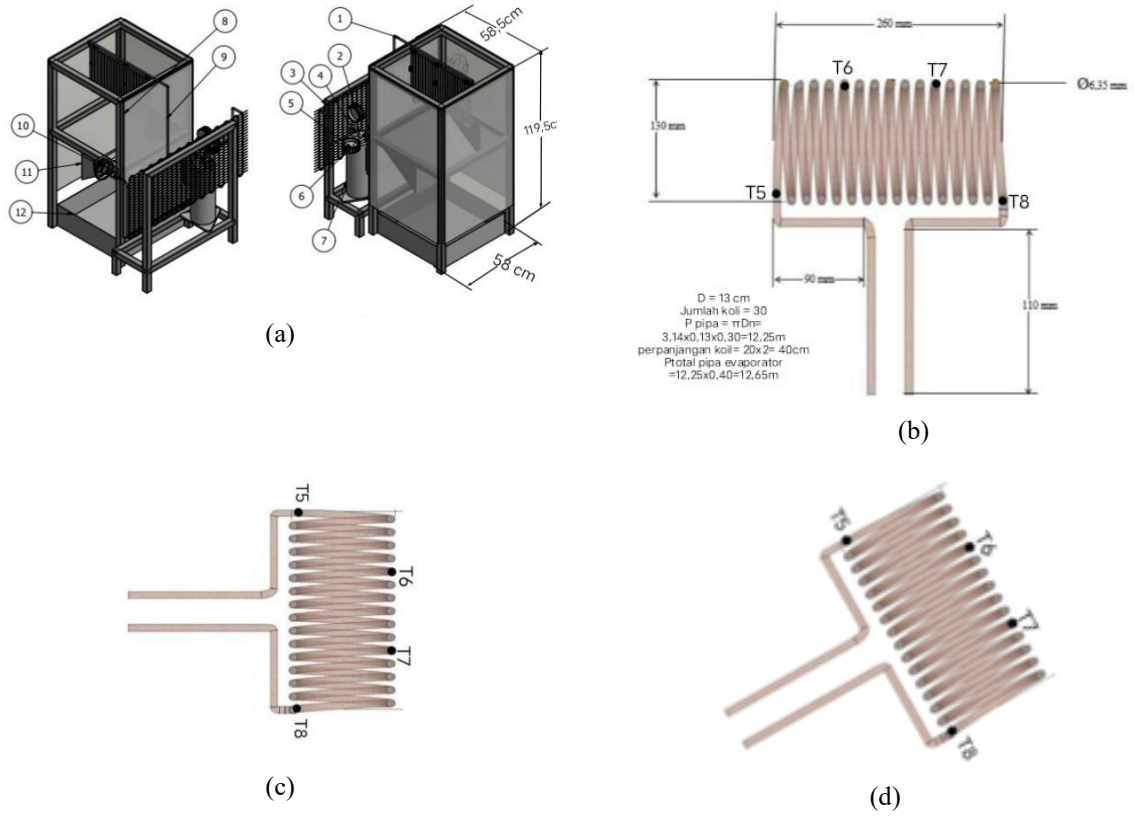
Orientasi evaporator berpotensi memengaruhi mekanisme perpindahan panas dan massa serta proses pengumpulan kondensat. Pada kondisi *natural convection*, perubahan posisi evaporator dapat memengaruhi pola aliran udara di sekitar permukaan pendingin, distribusi temperatur, kontak antara udara lembap dan permukaan evaporator, serta kemampuan kondensat untuk mengalir dan meninggalkan permukaan evaporator. Kondensat yang tidak segera terdrainase dapat menutupi sebagian permukaan perpindahan panas dan berpotensi mengurangi luas permukaan efektif untuk proses kondensasi. Oleh karena itu, kajian mengenai orientasi evaporator menjadi penting untuk memahami hubungan antara konfigurasi fisik evaporator, proses kondensasi, dan produktivitas air pada sistem AWH.

Berdasarkan uraian tersebut, terdapat *research gap* berupa terbatasnya kajian eksperimental yang secara khusus membandingkan pengaruh orientasi evaporator terhadap kinerja AWH berbasis refrigerasi pada kondisi *natural convection* dan kondisi operasi yang sama. Penelitian ini mengisi kesenjangan tersebut dengan mengevaluasi tiga orientasi evaporator, yaitu *horizontal*, miring 45°, dan vertikal. *Novelty* penelitian terletak pada evaluasi komparatif pengaruh orientasi evaporator terhadap produktivitas air dan parameter kinerja termodinamika AWH tanpa mengubah komponen utama sistem dan tanpa menggunakan bantuan aliran udara paksa. Penelitian ini bertujuan untuk menentukan orientasi evaporator yang memberikan kinerja terbaik berdasarkan produktivitas air, COP, laju penyerapan kalor,

dan efisiensi evaporator. Hasil penelitian diharapkan memberikan kontribusi praktis berupa dasar pemilihan orientasi evaporator yang sederhana dan ekonomis untuk meningkatkan kinerja sistem AWH, khususnya pada aplikasi dengan kondisi konveksi alami.

2. Bahan dan Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk mengevaluasi pengaruh posisi evaporator koil terhadap kinerja *air-water harvester* (AWH) berbasis siklus kompresi uap. Sistem terdiri atas kompresor rotary ½ PK, kondensor, pipa kapiler, dan evaporator koil yang dibuat dari pipa kondensor kulkas 12U seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Refrigeran yang digunakan adalah R-134a, sedangkan udara lingkungan digunakan sebagai sumber uap air. Pengujian dilakukan di dalam ruangan tertutup pada kondisi konveksi alami.



1. Evaporator, 2. *Pressure gauge outlet* ke kompresor, 3. Kondensor, 4. Pipa outlet kompresor ke kondensor, 5. *Inlet* p*ressure gauge* ke kompresor, 6. Pipa *inlet* ke kompresor dari evaporator, 7. Kompresor, 8. Dinding isolator, 9. Pipa dari evaporator ke kompresor, 10. Pipa kapiler dari kondensor ke evaporator, 11. Tempat mengalir embun yang menetes menuju bak penampung, 12. Bak penampung air.
Gambar 1 Skema alat percobaan; (a) tampak isometrik alat penelitian, (b) posisi evaporator *horizontal*, (c) posisi evaporator *vertical* dan (d) posisi evaporator miring 45°

Variabel bebas adalah posisi evaporator, yaitu vertikal, miring 45**°,** dan *horizontal*. Variabel terikat meliputi massa air hasil kondensasi, laju perpindahan panas total evaporator, dan *coefficient of performance* (COP). Jenis refrigeran, kapasitas kompresor, konfigurasi sistem, panjang pipa kapiler, waktu pengujian, dan kondisi ruang dijaga tetap. Temperatur udara dan refrigeran diukur menggunakan termokopel tipe-K yang terhubung dengan *data logger Applent* AT4532, dengan resolusi 0,1 °C dan akurasi ±0,5 °C. Kelembapan relatif diukur menggunakan *hygrometer* dengan resolusi 0,1% RH dan akurasi ±2% RH. Tekanan refrigeran diukur menggunakan *manifold gauge* dengan resolusi 1 psi dan ketidakpastian ±1 psi. Konsumsi daya diukur menggunakan *power meter* dengan resolusi 1 W dan

akurasi ±1%, sedangkan massa air diukur menggunakan timbangan digital dengan resolusi dan akurasi ±1 g. Kecepatan udara diukur menggunakan anemometer untuk memastikan kondisi konveksi alami. Instrumen diperiksa atau dikalibrasi sebelum digunakan.

Sebelum pengujian, sistem divakum menggunakan *vacuum pump* dan diisi refrigeran R-134a. Setelah mencapai kondisi tunak (*steady state*), pengujian dilakukan selama 7 jam untuk setiap posisi evaporator. Temperatur, kelembapan relatif, tekanan refrigeran, dan daya listrik dicatat selama pengujian, sedangkan air hasil kondensasi ditampung dan ditimbang pada akhir pengujian. Setiap variasi dilakukan sebanyak tiga kali, kemudian nilai rata-ratanya digunakan untuk analisis. Data dianalisis menggunakan pendekatan psikrometrik dan siklus kompresi uap. Analisis psikrometrik digunakan untuk menentukan kelembapan spesifik, laju kondensasi, serta perpindahan panas sensibel dan laten. Analisis siklus refrigerasi digunakan untuk menentukan kalor yang diserap evaporator, kerja kompresor, dan COP berdasarkan data temperatur dan tekanan refrigeran. Persamaan yang digunakan mengacu pada Mirmanto dkk. [19] dan Ramli [21]. Ketidakpastian hasil perhitungan ditentukan berdasarkan ketidakpastian instrumen dan propagasi ketidakpastian atau *analysis uncertainty* menggunakan persamaan yang diambil dari [22]. Hasil akhir dibandingkan untuk mengetahui pengaruh posisi evaporator terhadap produksi air, perpindahan panas, dan COP. Intrumen pengukuran dan ketidakpastian disajikan pada Tabel 1, dan kondisi eksperimen disajikan pada Tabel 2.

Tabel 1 Instrumen pengukuran yang digunakan

Instrumen	Parameter yang diukur	Resolusi	Akurasi / *Uncertainty*
Data logger Applent AT4532 + Termokcopel Type-K	Temperatur	0,1 °C	±0,5 °C
Digital hygrometer	Relative humidity	0,1 %RH	±2 %RH
Manifold gauge	Tekanan refrigeran	1 psi	±1 psi
Timbangan digital	Massa air	1 g	±1 g
Power meter	Daya listrik	1 W	±1 % reading
Anemometer digital	Kecepatan udara	0,01 m/s	±0,03 m/s atau ±3% reading*

Tabel 2 Kondisi eksperimen dan dimensi evaporator koil

Orientasi evaporator	*Horizontal*	45°	Vertikal
Temperatur udara masuk, Tin (°C)	26,9-31,2	26,6-30,4	26,4-29,6
RH udara masuk (%RH)	69-84	70-85	71-84
Temperatur udara keluar, Tout (°C)	21-23,2	21-24,4	22,5-24,8
RH udara keluar (%RH)	78-98	81-98	79-94
Kondisi aliran udara	*Natural convection*	*Natural convection*	*Natural convection*
Refrigeran	R-134a	R-134a	R-134a
Kompresor	*Rotary* ½ PK	*Rotary* ½ PK	*Rotary* ½ PK
Waktu pengujian (jam)	7	7	7
Pengulangan	3	3	3
Kondisi pengujian	Transien	Transien	Transien
Bentuk dan dimensi evaporator	Koil (spiral) dengan diameter koil 130 mm, diameter luar pipa 6,35 mm, dan panjang total pipa 12,65 m.	Koil (spiral) dengan diameter koil 130 mm, diameter luar pipa 6,35 mm, dan panjang total pipa 12,65 m.	Koil (spiral) dengan diameter koil 130 mm, diameter luar pipa 6,35 mm, dan panjang total pipa 12,65 m.

Persamaan untuk menghitung laju aliran massa embun atau air, perpindahan panas, dan COP adalah Persamaan 1-6.

$$\dot{m}_w = \frac{m_w}{t} \quad (1)$$

m_w adalah massa air yang dihasilkan (kg), $\dot{m}_w$ adalah laju aliran massa air (kg/s) dan t adalah lama waktu percobaan (s). Dengan laju aliran massa air ini maka dapat diprediksi laju aliran massa uap dan udara kering yang mana selanjutnya semua laju aliran massa dipergunakan untuk menhitung perpindahan panas dari udara ke dinding evaporator. Berikutnya adalah persamaan untuk menentukan perpindahan panas total dari udara ke dinding evaporator.

$$Q_l = \dot{m}_w h_{fg} \tag{2}$$

Q_l adalah laju perpindahan panas laten (W), sedangkan h_{fg} adalah entalpi pengembunan air (J/kg) yang diperoleh dari tabel saturasi air berdasarkan suhu rerata udara masuk dan keluar evaporator. Panas sensibel yang menjadi salah satu pembentuk panas total adalah dinyatakan dalam Persamaan 3.

$$Q_s = \dot{m}_d(h_{in} - h_{out}) \tag{3}$$

Q_s adalah laju perpindahan panas sensibel (W), $\dot{m}_d$ adalah laju aliran massa udara (kg/s), dan h_{in} and h_{out} menyatakan entalpi udara pada sisi masuk dan keluar dari evaporator, (J/kg). Dengan demikain laju aliran panas total, Q_t, adalah penjumlahan dari laju aliran panas laten dan sensibel dan dinyatakan seperti Persamaan 4.

$$Q_t = Q_l + Q_s \tag{4}$$

Sementara itu untuk menghitung COP dperlukan entalpi refrigeran pada beberapa titik yaitu titik inlet kompresor, titik outlet kompresor, dan titik inlet evaporator. Oleh sebab itu persamaan COP dinyatakan pada Persamaan 5.

$$COP = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \tag{5}$$

Dengan menggunakan tabel refrigeran R134a dan berdasarkan suhu dan tekanan, maka didapatlah semua entalpi tersebut. Untuk menghitung analisis ketidakpastian, persamaan dari Kline, F.A. McClintock [22] diaplikasikan.

$$\frac{U_R}{R} = \sqrt{\left(\frac{U_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{U_y}{y}\right)^2 + \left(\frac{U_z}{z}\right)^2} \tag{6}$$

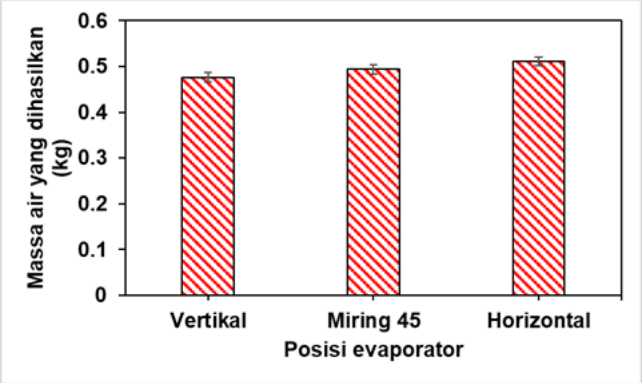
R adalah fungsi x, y dan z, U_R adalah *propagation uncertainty*, U_x, U_y dan U_z adalah *uncertainty* masing-masing variable penyusun fungsi R. Sedangkan untuk mengetahui pengaruh signifikan atau tidak digunakan analisis ANOVA satu arah.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian menunjukkan bahwa orientasi evaporator memengaruhi produksi air pada sistem *atmospheric water harvesting* (AWH). Berdasarkan Gambar 2, evaporator *horizontal* menghasilkan massa air tertinggi sebesar 0,511 kg, diikuti posisi 45° sebesar 0,494 kg, sedangkan posisi vertikal sebesar 0,476 kg. Perubahan orientasi dari vertikal menjadi horizontal meningkatkan produksi air sekitar 7,35%. Analisis ANOVA satu arah menunjukkan bahwa orientasi evaporator berpengaruh signifikan terhadap produksi air ($F(2,6) = 17{,}451$; $p = 0{,}003$), sehingga terdapat perbedaan produksi air yang signifikan antar konfigurasi.

Pada konfigurasi *horizontal*, distribusi kondensat yang lebih merata cenderung mempertahankan area efektif perpindahan panas dan mendukung perpindahan kalor sensibel serta laten. Kondisi tersebut juga membantu mempertahankan perbedaan temperatur antara udara dan permukaan evaporator sehingga proses kondensasi lebih efektif. Secara teoritis, laju kondensasi dipengaruhi oleh perbedaan

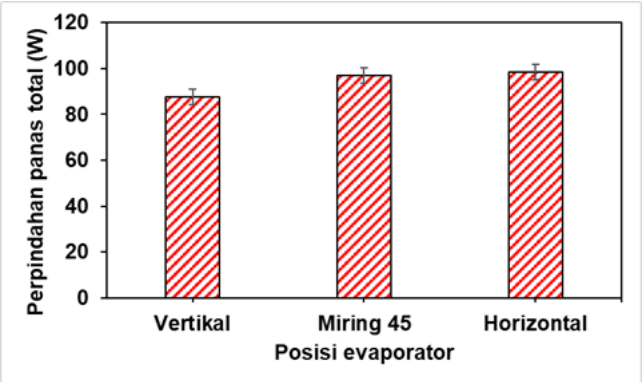
temperatur, luas permukaan efektif, koefisien perpindahan panas, dan karakteristik permukaan [23, 24]. Sebaliknya, pada posisi vertikal, kondensat lebih cepat mengalir ke bawah akibat gravitasi sehingga distribusi kondensat dan efektivitas perpindahan panas cenderung kurang seragam. Lapisan kondensat dapat meningkatkan resistansi termal dan menurunkan perpindahan panas, sesuai teori kondensasi film Nusselt [23, 24]. Posisi 45° menghasilkan kinerja menengah karena memberikan keseimbangan antara pembentukan dan drainase kondensat.



Gambar 2 Pengaruh orientasi evaporator terhadap produksi air hasil kondensasi pada sistem *atmospheric water harvesting*.

Hasil ini sejalan dengan Wang dkk. [26], Tu dkk. [27], dan Mirmanto dkk. [28] yang menunjukkan pentingnya karakteristik drainase dan konfigurasi evaporator terhadap produktivitas AWH. Namun, produktivitas juga dipengaruhi temperatur evaporator, kelembapan relatif, temperatur udara, kecepatan aliran udara, dan luas perpindahan panas. Dengan demikian, orientasi *horizontal* merupakan konfigurasi paling menguntungkan pada kondisi pengujian ini**.**

Hasil pengujian pada Gambar 3 menunjukkan bahwa orientasi evaporator menghasilkan perbedaan nilai perpindahan panas total (*total heat transfer*) selama proses kondensasi. Konfigurasi horizontal menghasilkan nilai tertinggi sebesar 98,50 ± 6,01 W, diikuti posisi 45° sebesar 96,85 ± 8,31 W, sedangkan vertikal sebesar 87,64 ± 12,29 W. Secara deskriptif, konfigurasi horizontal menghasilkan perpindahan panas sekitar 12,6% lebih tinggi dibandingkan posisi vertikal. Namun, hasil ANOVA satu arah menunjukkan bahwa perbedaan tersebut tidak signifikan secara statistik pada taraf 5%, dengan $F(2,6) = 1{,}204$ dan $p = 0{,}363$. Dengan demikian, orientasi evaporator menunjukkan kecenderungan meningkatkan perpindahan panas total, tetapi belum dapat dinyatakan memberikan pengaruh signifikan.

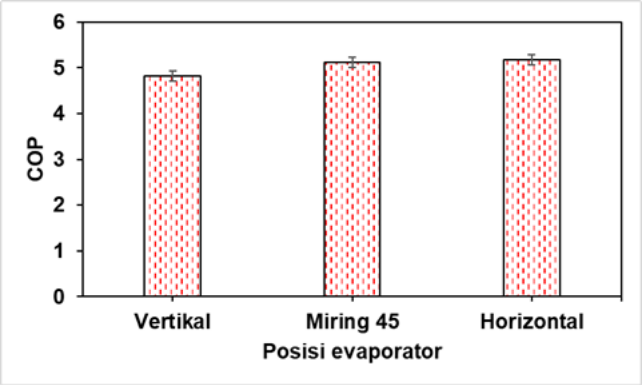


Gambar 3 Pengaruh posisi evaporator terhadap perpindahan panas total (Q_t) selama proses *atmospheric water harvesting*.

Perpindahan panas total merupakan akumulasi kalor sensibel udara kering, kalor sensibel uap air, dan kalor laten akibat kondensasi. Kalor laten menjadi komponen dominan karena energi yang dilepaskan selama perubahan fase relatif besar. Oleh karena itu, peningkatan perpindahan panas total

berkaitan dengan meningkatnya jumlah uap air yang terkondensasi [23, 24]. Nilai rata-rata tertinggi pada konfigurasi *horizontal* diduga berkaitan dengan distribusi udara dan temperatur yang lebih merata sehingga kondisi perpindahan kalor sensibel dan laten dapat berlangsung lebih efektif [23, 24]. Sebaliknya, pada orientasi vertikal, kondensat cenderung mengalir ke bagian bawah akibat gravitasi sehingga distribusi kondensat dan efektivitas permukaan perpindahan panas dapat kurang seragam. Posisi 45° menunjukkan karakteristik menengah karena memberikan keseimbangan antara pembentukan dan drainase kondensat. Fenomena tersebut sesuai dengan teori *film condensation* Nusselt [25], yang menyatakan bahwa karakteristik lapisan kondensat memengaruhi tahanan termal dan koefisien perpindahan panas. Hasil ini juga sejalan dengan Liu dkk. [28], Nikkah dkk. [29], dan Mirmanto dkk. [28] mengenai pengaruh konfigurasi evaporator terhadap perpindahan panas dan produksi air AWH. Meskipun demikian, perbedaan antarorientasi sekitar 2-13% menunjukkan bahwa orientasi lebih tepat dipandang sebagai parameter optimasi, sedangkan temperatur evaporator, kelembapan relatif, temperatur udara, kecepatan aliran udara, luas perpindahan panas, dan laju aliran refrigeran tetap berperan penting [23, 31].

Hasil pengujian pada Gambar 4 menunjukkan bahwa orientasi evaporator memberikan kecenderungan peningkatan *Coefficient of Performance* (COP) sistem *atmospheric water harvesting* (AWH). Konfigurasi *horizontal* menghasilkan COP rata-rata tertinggi sebesar 5,171 ± 0,180, diikuti posisi 45° sebesar 5,123 ± 0,085, sedangkan vertikal sebesar 4,819 ± 0,163. COP merupakan perbandingan antara kalor yang diserap evaporator (*refrigeration effect*) dan kerja kompresor; peningkatan kalor yang diserap tanpa peningkatan daya kompresor yang berarti akan meningkatkan efisiensi energi sistem [23, 24, 31]. Namun, analisis ANOVA satu arah menunjukkan bahwa perbedaan COP antarorientasi tidak signifikan secara statistik pada taraf 5% ($F(2,6) = 4{,}957$; $p = 0{,}054$). Dengan demikian, orientasi evaporator menunjukkan kecenderungan peningkatan COP, tetapi belum dapat dinyatakan berpengaruh signifikan.



Gambar 4 Pengaruh orientasi evaporator terhadap *Coefficient of Performance* (COP) sistem *atmospheric water harvesting*.

COP yang lebih tinggi pada konfigurasi horizontal berkaitan dengan kondisi perpindahan panas dan drainase kondensat yang lebih efektif. Kondisi tersebut memungkinkan evaporator menyerap kalor sensibel dan laten secara lebih optimal sehingga *refrigeration effect* meningkat, sementara konsumsi daya kompresor relatif tetap [23, 24]. Hal ini konsisten dengan produksi air dan perpindahan panas yang lebih tinggi pada konfigurasi *horizontal*. Sebaliknya, pada orientasi vertikal, drainase kondensat akibat gravitasi dan distribusi perpindahan panas yang kurang merata dapat menurunkan efektivitas evaporator. Posisi 45° menunjukkan kinerja menengah. Fenomena ini sesuai dengan teori siklus kompresi uap [31, 32] dan hasil Mirmanto dkk. [28]. Peningkatan COP sekitar 6-8% menunjukkan bahwa orientasi lebih tepat diposisikan sebagai parameter optimasi, yang perlu dikombinasikan dengan optimasi kondisi operasi dan karakteristik perpindahan panas.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengevaluasi pengaruh orientasi evaporator terhadap kinerja *atmospheric water harvesting* (AWH) berbasis siklus kompresi uap pada kondisi konveksi alami. Hasil menunjukkan bahwa evaporator *horizontal* memberikan kinerja terbaik secara deskriptif, dengan produksi air sebesar 0,511 kg/7 jam, perpindahan panas total 98,50 ± 6,01 W, dan COP 5,171 ± 0,180. Dibandingkan orientasi vertikal, konfigurasi *horizontal* meningkatkan produksi air sekitar 7,35%, perpindahan panas total sekitar 12,6%, dan COP sekitar 7,3%. Namun, hasil ANOVA menunjukkan bahwa pengaruh orientasi signifikan terhadap produksi air ($F(2,6) = 17,451$; $p = 0,003$), tetapi tidak signifikan terhadap perpindahan panas total ($F(2,6) = 1,204$; $p = 0,363$) dan COP ($F(2,6) = 4,957$; $p = 0,054$). *Novelty* penelitian ini terletak pada evaluasi eksperimental komparatif tiga orientasi evaporator *horizontal*, 45°, dan vertikal pada kondisi konveksi alami dan kondisi operasi yang sama, tanpa mengubah komponen utama sistem**.** Temuan baru menunjukkan bahwa perubahan orientasi terutama memberikan keuntungan nyata pada produktivitas air, sementara peningkatan perpindahan panas dan COP masih berupa kecenderungan dan belum signifikan secara statistik. Hal ini mengindikasikan bahwa orientasi evaporator merupakan parameter desain sederhana dan parameter optimasi, bukan faktor dominan tunggal. Penelitian selanjutnya direkomendasikan untuk mengoptimalkan kombinasi orientasi dengan temperatur evaporator, kondisi psikrometrik**,** kecepatan aliran udara, dan geometri evaporator guna meningkatkan produktivitas air sekaligus efisiensi energi.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Mataram, yang telah menyediakan fasilitas laboratorium dan sarana penelitian sehingga penelitian ini dapat terlaksana dengan baik. Penghargaan juga disampaikan kepada seluruh dosen, tenaga kependidikan, laboran, teknisi, mahasiswa, serta semua pihak yang telah memberikan bantuan teknis, masukan ilmiah, dan dukungan selama pelaksanaan penelitian hingga penyelesaian naskah ini.

Daftar Pustaka

[1] Y. Zhong, L. Zhang, X. Li, B. El Fil, C.D. Díaz-Marín, A.C. Li, X. Liu, A. LaPotin, E.N. Wang, Bridging materials innovations to sorption-based atmospheric water harvesting devices, Nature Reviews Materials, 9 (2024) 681-698.

[2] J. Wang, Z. Yang, Z. Li, H. Fu, J. Chen, Comprehensive review on atmospheric water harvesting technologies, Journal of Water Process Engineering, 64 (2024) 106836.

[3] M. Wang, E. Liu, T. Jin, S.-U. Zafar, X. Mei, M.-L. Fauconnier, C. De Clerck, Towards a better understanding of atmospheric water harvesting technology, Water Research, 250 (2023) 121052.

[4] T. Xiang, S. Xie, G. Chen, C. Zhang, Z. Guo, Recent Advances in Atmospheric Water Harvesting Technology and Its Development**,** Materials Horizons, 12 (4) (2025) 1084-1105.

[5] C. Lei, W. Guan, Y. Zhao, G. Yu, Chemistries and materials for atmospheric water harvesting, Chemical Society Reviews, 53 (2024) 7328-7362.

[6] W. Chu, J. Ding, C. Peng, Z. Xu, Advancements in atmospheric water harvesting: toward continuous operation through mass transfer optimization, Communications Engineering, 3 (2024) 180.

[7] H. Shan, P. Poredoš, Z. Chen, X. Yang, Z. Ye, Z. Hu, R. Wang, S.C. Tan, Hygroscopic salt-embedded composite materials for sorption-based atmospheric water harvesting, Nature Reviews Materials, 9 (2024) 699-721.

[8] W. Zeng, T. You, W. Wu, Passive atmospheric water harvesting: Materials, devices, and perspectives, Nano Energy, 125 (2024) 109572.

[9] N. Beithou, M.B. Khalid, S. As'ad, S. Alsaqoor, G. Borowski, N. Alshabatat, A. Andruszkiewicz, Atmospheric water harvesting technology: review and future prospects, Journal of Ecological Engineering, 25 (3) (2024) 291-302.
[10] E.B. Agyekum, F. Odoi-Yorke, W.F. Mbasso, R.O. Darko, O.R. Adegboye, A.A. Abbey, Towards a comprehensive understanding of atmospheric water harvesting technologies: A systematic and bibliometric review, Energy Reports, 12 (2024) 3795-3811.
[11] J. Mrihardjono, D. Ariwibowo, Sutrisno, D.Y. Tadeus, Efek penambahan evaporator pada atmosphere water harvester **(**AWH**)** terhadap performa system, Gema Teknologi, 21 (2) (2021).
[12] I. Al Keyyam, M. Al-Nimr, S. Khashan, A. Keewan, A new solar atmospheric water harvesting integrated system using CPV/T–Stirling engine–absorption cooling cycle and vapor compression refrigeration cycle**,** International Journal of Energy Research, 45 (11) (2021) 16400-16417.
[13] T.M. Thomas, P.S. Mahapatra, R. Ganguly, M.K. Tiwari, Atmospheric water vapor condensation on engineered interfaces: Busting the myths**,** arXiv preprint arXiv, (2022) 2210.08301.
[14] Y. Gao, A. Eason, S. Ricoy, A. Cobb, R. Phung, A. Kashani, M.R. Mata, A. Sahm, N. Ortiz, S. Rao, H.J. Cho, High-yield atmospheric water capture via bioinspired material segregation**,** Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*,* 121 (4) (2024) 2321429121.
[15] M. Wang, E. Liu, T. Jin, S.-U. Zafar, X. Mei, M.-L. Fauconnier, C. De Clerck, Towards a Better Understanding of Atmospheric Water Harvesting (AWH) Technology**,** Water Research, 250 (2024) 121052.
[16] M.A. Ahmed, R.B. Mansour, M.R. Shakeel, S.M. Zubair, Efficient atmospheric water generation using mechanical vapor compression: An improved system for sustainable freshwater production**,** Thermal Science and Engineering Progress, 62 (2025) 103637.
[17] S. Mandal, S. Raheem, S. Mitra, Thermodynamic assessment of vapor compression refrigeration driven atmospheric water harvesting technologies, Thermal Science and Engineering Progress, (2025) 104383.
[18] A. Cendoya, D. Sacasas, M. Pezo, C. Cuevas, E. Wagemann, Critical analysis of the design of atmospheric water generators based on vapour compression refrigeration cycle: a numerical study, International Journal of Refrigeration, 180 (2025) 467-484.
[19] M. Mirmanto, M. Mara, R. Gapmela, Effect of air velocity on the performance of a four-coil evaporator atmospheric water harvester: an experimental study on water production, energy consumption, and system efficiency at varying air velocities, International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT), 2 (5) (2026).
[20] A.Y. Alshoubaki, Harnessing vapor compression refrigeration systems to capture atmospheric water as a sustainable water source in response to climate change and water scarcity, Journal of Environmental Chemical Engineering, 13 (5) (2025) 118056.
[21] M. Ramli, "Pengaruh posisi evaporator koil terhadap massa air yang dihasilkan pada mesin *air-water harvester* sistem konveksi alami" (skripsi), Mataram: Universitas Mataram, 2023.
[22] S.J. Kline, F.A. McClintock, Describing uncertainties in single-sample experiments, Mechanical Engineering, 75 (1) (1953) 3-8.
[23] F.P. Incropera, D.P. DeWitt, T.L. Bergman, A.S. Lavine, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 8th ed. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2017.
[24] Y.A. Çengel, A.J. Ghajar, Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications, 6th ed. McGraw-Hill Education, New York, USA, 2020.
[25] W. Nusselt, Die Oberflächenkondensation des Wasserdampfes, Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure, 60 (27) (1916) 541-546.
[26] J. Wang, L. Hua, C. Li, R. Wang, Atmospheric water harvesting: Critical metrics and challenges, Energy & Environmental Science, 15 (2022) 4540-4556.
[27] Y. Tu, R. Wang, Y. Zhang, J. Wang, Progress and expectation of atmospheric water harvesting, Joule, 2 (8) (2018) 1452-1475.
[28] M. Mirmanto, M. Wirawan, A. Mulyanto, I.W. Joniarta, A. Najib, D.D. Lestari, L.A. Winata, A. Faroni, A. Azari, Mesin air-water harvester menggunakan sistem refrigerasi, Pustaka Bangsa, 1 (2024) 1-266.

[29] Z. Liu, H. Song, D. Ji, C. Li, A. Cheney, Y. Liu, N. Zhang, X. Zeng, B. Chen, J. Gao, Y. Li, X. Liu, D. Aga, S. Jiang, Z. Yu, Q. Gan, Recent advances in atmosphere water harvesting: Design principle, materials, devices, and applications, Nano Today, 40 (2021) 101283.

[30] H. Nikkhah, W.M.B.W. Azmi, A. Nikkhah, A.M. Najafi, M.M. Babaei, C.S. Fen, A. Nouri, A.W. Mohammad, A.W. Lun, N.L. Yong, E. Mahmoudi, A comprehensive review on atmospheric water harvesting technologies: From thermodynamic concepts to mechanism and process development, Journal of Water Process Engineering, 53 (2023) 103728.

[31] ASHRAE, Handbook—Fundamentals (SI Edition), American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Peachtree Corners, GA, USA, 2021. ISBN: 978-1-947192-90-4.

[32] I. Dincer, M. Kanoglu, Refrigeration Systems and Applications, 2nd ed. John Wiley & Sons, Chichester, U.K., 2010.