SINERGI *Polmed*: JURNAL ILMIAH TEKNIK MESIN
Homepage jurnal: http://ojs.polmed.ac.id/index.php/Sinergi/index

KINERJA SIKLUS REFRIGERASI DAN KONSUMSI LISTRIK AC SPLIT HIBRIDA TERMAL SURYA DENGAN PEMULIHAN PANAS

Yudhy Kurniawan[a*], Wardika[a], Ahmad Maulana Kartika[a], Faisal Yusuf Fadhilah[a]

[a]Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Indramayu, Jl. Lohbener Lama No. 8, Ds.Legok, Kec. Lohbener, Kab. Indramayu, Jawa Barat, Indonesia, 45252

**Penulis korespondensi: yudhy@polindra.ac.id; yudhykurniawan77@gmail.com, (Y. Kurniawan), Tel.: +6218-133-0069393*

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diajukan pada 12 Juli 2026
Direvisi pada 23 September 2026
Disetujui pada 12 Oktober 2026
Tersedia daring pada 31 Oktober 2026

Kata kunci:
AC split; termal surya; pemulihan panas; COP siklus; konsumsi listrik.

Keywords:
Split air conditioning; solar thermal; heat recovery; cycle COP; electricity consumption.

ABSTRAK

Penggunaan pendingin udara meningkatkan kebutuhan energi listrik bangunan, sementara panas buang refrigeran berpotensi dimanfaatkan kembali. Penelitian ini membandingkan kinerja siklus refrigerasi dan konsumsi listrik AC *split* konvensional dengan konfigurasi hibrida termal surya yang mengintegrasikan kolektor surya, tangki air panas, serta dua penukar kalor berbentuk heliks. Kedua konfigurasi menggunakan unit 2 PK dengan refrigeran R32 dan diuji selama dua jam pada hari yang berbeda, dengan 24 pengamatan setiap lima menit per konfigurasi. Parameter yang dianalisis meliputi kerja kompresi, efek pendinginan, kalor pelepasan spesifik, koefisien kinerja (COP) siklus, efisiensi refrigerasi, dan estimasi konsumsi listrik. Hasil menunjukkan bahwa COP siklus meningkat dari 4,9 menjadi 6,5 (32,7%), kerja kompresi spesifik menurun dari 52,6 menjadi 47,5 kJ/kg, dan efek pendinginan spesifik meningkat dari 257,3 menjadi 307,0 kJ/kg. Efisiensi refrigerasi terhitung sebesar 77,9% pada sistem konvensional dan 89,7% pada sistem hibrida. Namun, energi listrik yang diperkirakan selama dua jam lebih tinggi pada sistem hibrida (2,29 kWh) dibandingkan sistem konvensional (1,97 kWh). Hasil ini menunjukkan potensi peningkatan kinerja siklus, tetapi belum membuktikan penghematan listrik atau besarnya manfaat pemanasan air. Pengujian berulang dan neraca energi menyeluruh diperlukan untuk menilai keuntungan sistem secara lebih andal.

ABSTRACT

Air-conditioning systems contribute substantially to building electricity demand, while heat rejected by the refrigerant offers an opportunity for heat recovery. This study compares the refrigeration-cycle performance and estimated electricity consumption of a conventional split air conditioner with a solar-thermal hybrid configuration incorporating a solar collector, a hot-water storage tank, and two helical heat exchangers. The same 2-HP unit using R32 refrigerant was tested under each configuration for two hours on separate days, with 24 observations recorded at five-minute intervals per configuration. Specific compressor work, cooling effect, high-side heat rejection, cycle coefficient of performance (COP), refrigeration efficiency, and estimated electricity use were evaluated. The cycle COP increased from 4.9 to 6.5 (32.7%), specific compressor work decreased from 52.6 to 47.5 kJ/kg, and the specific cooling effect increased from 257.3 to 307.0 kJ/kg. Calculated refrigeration efficiency was 77.9% for the conventional configuration and 89.7% for the hybrid configuration. Nevertheless, estimated electricity use over two hours was higher for the hybrid system (2.29 kWh) than for the conventional system (1.97 kWh). The results indicate improved cycle performance under the tested conditions but do not demonstrate electricity savings or quantify the useful hot-water output. Replicated testing and a complete energy balance are required before overall system benefits can be established.

1. PENGANTAR

Sistem pendingin udara merupakan salah satu penyumbang konsumsi listrik bangunan, terutama pada wilayah beriklim panas. Kebutuhan pendinginan yang meningkat mendorong pengembangan teknologi yang mampu memanfaatkan energi secara lebih efektif tanpa mengurangi kenyamanan penghuni. Salah satu pendekatannya adalah integrasi energi termal surya dengan sistem pendingin berbasis kompresi uap. Kolektor surya dan penyimpanan energi termal berpotensi mendukung pemanfaatan panas dalam bangunan, sementara penggunaan kembali panas buang refrigeran dapat mengurangi energi yang terlepas tanpa dimanfaatkan (Al–Okbi dkk., 2021; Sutriyatna, 2022). Namun, manfaat integrasi ini perlu dibuktikan melalui pengukuran kinerja termodinamika dan konsumsi listrik, bukan hanya berdasarkan perubahan temperatur sistem.

Pada sistem AC *split*, refrigeran yang keluar dari kompresor membawa kalor yang lazimnya dibuang ke lingkungan melalui kondensor. Sebagian kalor tersebut dapat dialihkan ke air melalui penukar kalor pada jalur keluaran kompresor (*discharge line*). Di sisi lain, kolektor surya dapat memasok kalor ke tangki penyimpan air melalui sirkulasi fluida terpisah. Konfigurasi ini membuka peluang penyediaan pendinginan ruangan dan air panas dalam satu instalasi (Kurniawan dkk., 2020; Gunarto dkk., 2023). Meskipun demikian, penambahan pompa sirkulasi, kerugian perpindahan panas, dan variasi cuaca dapat memengaruhi kinerja keseluruhan. Karena itu, penilaian sistem perlu membedakan koefisien kinerja siklus refrigerasi dari konsumsi energi listrik seluruh peralatan.

Teknologi *solar thermal air conditioning* (STAC) mencakup beragam pendekatan, seperti pendinginan absorpsi, adsorpsi, dan sistem yang memadukan energi termal surya dengan kompresi uap. Kajian Al Khiro dan Boukhanouf (2024) serta Rashid dkk. (2023) menunjukkan bahwa manfaatnya bergantung pada konfigurasi, penyimpanan energi, dan kondisi operasi. Sebagian penelitian berfokus pada sistem pendinginan terpusat atau sistem yang memanfaatkan energi surya untuk suplai listrik, sedangkan kajian pada AC *split* rumah tangga yang dipadukan dengan pemulihan panas untuk pemanas air masih memerlukan evaluasi eksperimen lebih lanjut (Kaidir dkk., 2018; Kurniawan dkk., 2020). Oleh sebab itu, hasil pengujian pada konfigurasi kompresi uap tertentu tidak dapat secara langsung disamakan dengan kinerja teknologi pendingin surya lainnya.

Penelitian terdahulu melaporkan beberapa manfaat integrasi energi terbarukan pada sistem tata udara, terutama dalam pengurangan konsumsi energi atau peningkatan kinerja pendinginan pada kondisi yang diuji (Nwasuka & Nwaiwu, 2021; Al–Okbi dkk., 2021). Namun, konfigurasi dan metode pengukurannya berbeda sehingga perbandingan angka peningkatan perlu dilakukan secara hati-hati. Pengujian komparatif yang mencatat temperatur, tekanan, serta parameter kelistrikan pada unit yang sama dapat memberikan gambaran yang lebih langsung mengenai perubahan siklus refrigerasi setelah penambahan penukar kalor pemulihan panas.

Sistem pemanas air yang memanfaatkan panas buang AC telah dikembangkan untuk meningkatkan pemanfaatan energi bangunan. Kajian Kaidir dkk. (2018) dan Gunarto dkk. (2023) menunjukkan bahwa panas refrigeran dapat digunakan untuk memanaskan air. Integrasi kolektor surya menambahkan jalur pasokan kalor bagi tangki penyimpanan, tetapi manfaat terhadap kinerja pendinginan harus dibedakan dari manfaat pemanasan air. Agar kedua fungsi dapat dinilai dengan baik, diperlukan pelaporan kondisi operasi siklus kompresi uap, kebutuhan listrik pompa, dan hasil pemanasan air secara terpisah.

Pada wilayah tropis, perubahan radiasi matahari, temperatur luar, dan kelembapan udara memengaruhi beban pendinginan serta kinerja kolektor surya. Literatur menunjukkan peluang penerapan sistem hibrida, tetapi sebagian studi menggunakan rancangan, refrigeran, dan prosedur pengujian yang tidak sama (Noor dkk., 2018; She dkk., 2018; Abdelgaied dkk., 2023). Oleh karena itu, penelitian ini diposisikan sebagai evaluasi komparatif jangka pendek terhadap satu konfigurasi AC *split* 2 PK yang ditambah penukar kalor ganda, tangki penyimpanan air panas, dan kolektor surya. Hasilnya tidak dimaksudkan untuk mewakili seluruh kondisi tahunan atau membuktikan penghematan energi bangunan tanpa pengukuran lebih lanjut.

Konfigurasi yang diteliti menggunakan dua pipa penukar kalor berbentuk heliks di dalam tangki penyimpanan air panas. Penukar kalor pertama terhubung ke jalur refrigeran keluar kompresor, sedangkan penukar kalor kedua menerima air yang dipanaskan kolektor surya. Kedua jalur dirancang terpisah agar perpindahan kalor berlangsung melalui dinding pipa tanpa pencampuran fluida.

Penggunaan pipa baja tahan karat SS316 dan dua jalur perpindahan kalor tersebut memungkinkan pengujian fungsi pemulihan panas bersama pemanfaatan energi termal surya. Namun, pengaruh masing-masing jalur belum dapat dipisahkan tanpa konfigurasi kontrol tambahan. Untuk menempatkan penelitian ini di antara kajian terdahulu, Tabel 1 merangkum perbedaan desain, metode, dan hasil yang dilaporkan pada beberapa studi relevan.

Tabel 1: Pemetaan Posisi Penelitian Terhadap Studi Terkini Sistem Pendingin Udara Hibrid Berbasis Energi Surya

Penulis & Tahun	Sistem / Skema	Skala & Iklim	Metode	Temuan Kunci Teknis	Keterbatasan / Gap
(Nwasuka & Nwaiwu, 2021)	*Solar hybrid air-conditioner* dengan refrigeran R410A dan kolektor surya; perbandingan dengan AC split konvensional	Iklim panas-lembab (Nigeria), skala ruangan	Eksperimen performa sistem hibrid vs konvensional	Penurunan temperatur ruang dan penghematan energi hingga ~29% pada siang hari; kenyamanan termal lebih baik dan beban puncak jaringan menurun	Tidak fokus pada detail termodinamika (COP dan efisiensi); tidak ada integrasi tangki penyimpan air panas
(Kaidir dkk., 2018)	AC split dikombinasikan dengan kolektor surya dan *water heater* untuk pemanas air domestik	Skala rumah tinggal, iklim tropis/lembab	Eksperimen sistem AC + *water heating*	Panas buang kondensor bisa dimanfaatkan untuk pemanas air, efisiensi pemanfaatan energi meningkat	Fokus pada pemanas air, bukan peningkatan COP siklus pendinginan secara rinci
(Al–Okbi dkk., 2021)	Sistem hibrid *air conditioner* yang memanfaatkan energi surya untuk mendukung kompresor / suplai listrik AC	Iklim panas, studi kasus bangunan	Analisis performa energi, simulasi + eksperimen	Potensi pengurangan konsumsi listrik kompresor 30-40% dan peningkatan COP dari 2,85 menjadi 4,04	Skema dominan pada sisi daya listrik (PV/*solar electric*), bukan integrasi *heat recovery* dan tangki air panas
(Al Khiro & Boukhanouf, 2024)	*Solar-assisted hybrid cooling system* dengan dua tahap kompresi, kolektor surya dan *thermal store*	Bangunan, simulasi untuk berbagai kondisi iklim	Analisis energi & eksergi, simulasi numerik multi-skenario	Pemanfaatan energi surya dapat mengurangi kerja mekanis kompresor dan meningkatkan efisiensi eksergi	Sistem kompleks (*multi-stage*) dan konseptual/simulatif; belum ada data eksperimen lapangan di iklim tropis
(Noor dkk., 2018)	Sistem hibrid *solar air conditioning* dengan	Iklim tropis; bangunan di	Analisis lingkungan dan energi	*Hybrid solar* AC + TES dapat mengurangi emisi dan	Fokus pada aspek lingkungan dan TES,

Penulis & Tahun	Sistem / Skema	Skala & Iklim	Metode	Temuan Kunci Teknis	Keterbatasan / Gap
	integrasi *thermal energy storage* **(TES)**	kawasan panas-lembab	(LCA/*energy assessment*)	konsumsi energi sistem pendingin secara signifikan	bukan detail performa AC split dan *heat recovery*
(Kabeel dkk., 2017)	Sistem *solar-assisted hybrid AC + humidification-dehumidification (HDH) desalination*	Iklim kering/panas; aplikasi gabungan	Simulasi numerik dan analisis energi	Peningkatan COP sistem dan produksi air tawar melalui integrasi desalinasi	Konfigurasi spesifik (AC + desalination), tidak relevan langsung ke integrasi tangki air panas domestik
(Abdelgaied dkk., 2023)	*Solar-assisted* AC dengan konfigurasi inovatif *desiccant dehumidifier + thermal recovery unit*	Aplikasi bangunan, iklim panas	Simulasi dan eksperimen; analisis energi & kenyamanan	Integrasi unit *desiccant* dan *thermal recovery* meningkatkan COP dan kualitas udara dalam ruangan	Fokus pada pengolahan udara (*desiccant*), bukan integrasi *heat recovery* dari kondensor ke *water storage*
(Uchechukwu dkk., 2023)	Pengembangan *solar hybrid air conditioner* untuk mengurangi biaya operasi dan emisi CO2	Prototipe sistem, iklim panas	Pengembangan desain + uji performa	Sistem hibrid menurunkan konsumsi energi dan emisi dibanding AC konvensional	Tidak memberikan analisis termodinamika sedetail studi ini; tidak spesifik iklim tropis lembab

Sebagaimana dirangkum dalam Tabel 1, penelitian sebelumnya mencakup sistem AC berbantuan energi surya, pemanfaatan panas buang untuk pemanas air, dan sistem hibrida pendinginan berskala lebih besar. Perbedaan skema, kondisi lingkungan, serta parameter evaluasi menunjukkan perlunya penyajian hasil yang berfokus pada konfigurasi yang benar-benar diuji. Kontribusi penelitian ini adalah pengamatan komparatif parameter termodinamika siklus pada unit AC *split* 2 PK dengan dan tanpa jalur pemulihan panas serta sirkulasi kolektor surya.

Celah penelitian yang menjadi fokus bukanlah pembuktian bahwa konfigurasi serupa belum pernah dikaji, melainkan keterbatasan data komparatif jangka pendek yang secara bersamaan melaporkan kerja kompresi spesifik, efek pendinginan, kalor yang dilepas pada sisi tekanan tinggi, COP berbasis entalpi, dan konsumsi listrik. Pengukuran tersebut diperlukan untuk menilai apakah peningkatan COP siklus juga diikuti penurunan pemakaian listrik keseluruhan; keduanya merupakan indikator berbeda.

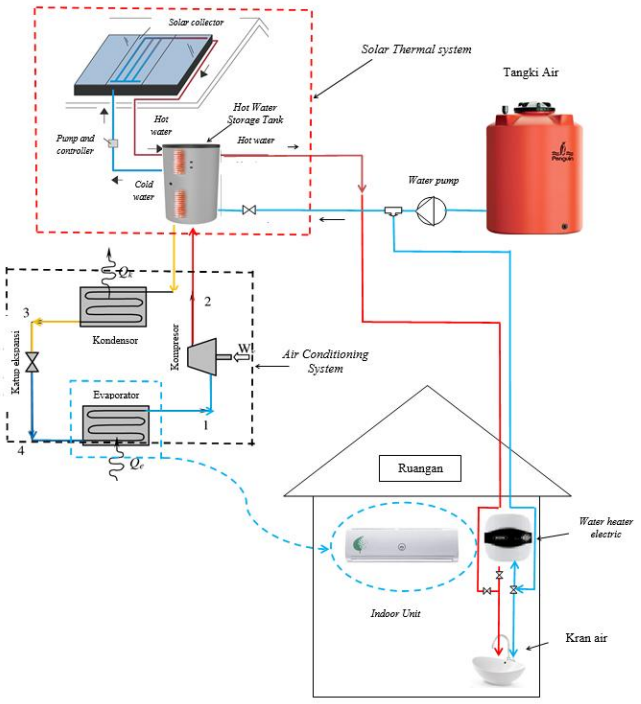
Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja termodinamika dan konsumsi listrik AC *split* hibrida termal surya dengan konfigurasi AC *split* konvensional pada unit berkapasitas 2 PK menggunakan refrigeran R32. Parameter yang dievaluasi meliputi kerja kompresi dan efek pendinginan spesifik, kalor pelepasan, COP siklus, efisiensi relatif terhadap siklus *Carnot*, serta energi listrik selama dua jam pengujian. Temperatur air tangki dan radiasi matahari diperlukan untuk pengukuran manfaat termal total, tetapi tidak disajikan secara kuantitatif dalam hasil utama.

Melalui pengujian dua konfigurasi pada lingkungan laboratorium, penelitian ini menyediakan dasar evaluasi awal terhadap potensi penerapan integrasi kolektor surya dan pemulihan panas pada bangunan beriklim tropis. Penilaian penghematan energi tahunan, keekonomian, dan kontribusi terhadap bangunan energi neto nol memerlukan pengukuran tambahan dengan durasi dan cakupan operasi yang lebih luas.

2. METODE

Penelitian dilaksanakan melalui pengujian eksperimen pada sebuah unit AC *split* berkapasitas nominal 2 PK yang menggunakan refrigeran R32. Unit tersebut dioperasikan dalam dua konfigurasi, yaitu (i) sistem hibrida termal surya dengan pemulihan panas atau STAC dan (ii) AC *split* konvensional sebagai pembanding. Sistem STAC menggabungkan kolektor surya, tangki air panas berkapasitas 70 L, dan dua penukar kalor berbentuk heliks. Susunan sistem ditunjukkan pada Gambar 1, sedangkan spesifikasi komponen utamanya dirangkum dalam Tabel 2. Nilai kinerja refrigerasi dihitung berdasarkan sifat termodinamika refrigeran pada empat titik pengukuran, bukan melalui pengukuran laju aliran massa refrigeran.

Penukar kalor pertama (HE 1) dipasang pada jalur keluaran kompresor sebelum kondensor. Pada bagian ini, refrigeran panas lanjut menyerahkan sebagian kalor ke air tangki melalui dinding pipa heliks. Penukar kalor kedua (HE 2) terhubung dengan sirkuit air kolektor surya yang digerakkan pompa; air dari kolektor mengalir di dalam pipa heliks dan mentransfer kalor ke air dalam tangki. Kedua fluida tidak bercampur secara langsung. Dengan demikian, tangki berfungsi sebagai media penyimpanan sekaligus tempat berlangsungnya pertukaran kalor dari dua jalur yang berbeda. Skema dan dokumentasi instalasi disajikan pada Gambar 1 dan Gambar 2.



Gambar 1: Skema instalasi sistem hibrida *solar thermal air conditioning* (STAC); angka 1–4 menunjukkan titik pengukuran temperatur refrigeran; HE 1 dan HE 2 berada di dalam tangki penyimpan air panas

Pengujian dilakukan pada dua tahap. Pada konfigurasi STAC, parameter yang diamati mencakup temperatur dan tekanan refrigeran, temperatur air, tegangan, serta arus listrik. Pada konfigurasi AC *split* konvensional, pengukuran difokuskan pada temperatur dan tekanan refrigeran serta parameter kelistrikan. Masing-masing konfigurasi dioperasikan selama dua jam pada periode siang, dengan pencatatan setiap lima menit sehingga diperoleh 24 titik pengamatan berurutan per konfigurasi. Titik-titik pengamatan tersebut merupakan data runtun waktu dari satu pengujian, bukan 24 pengulangan eksperimen independen.

Kedua pengujian menggunakan unit AC, ruangan, setelan termostat (18 °C), serta muatan refrigeran yang sama. Konfigurasi konvensional diperoleh dengan mengatur katup agar refrigeran melewati jalur tanpa HE 1 dan menonaktifkan pompa sirkulasi kolektor surya. Pengujian STAC dilaksanakan pada 2 Desember 2025, sedangkan konfigurasi konvensional diuji pada 3 Desember 2025, masing-masing pukul 11.00-13.00 WIB. Temperatur lingkungan tercatat 32-33 °C saat STAC diuji dan 31-33 °C pada pengujian konvensional, dengan kelembapan relatif sekitar 68-70% dan cuaca cerah hingga berawan. Walaupun prosedur operasi dibuat serupa, kedua pengujian berlangsung pada hari berbeda sehingga kesetaraan kondisi beban dan radiasi tidak dapat dipastikan sepenuhnya.

Temperatur refrigeran diukur pada empat titik, yaitu (1) keluar evaporator/masuk kompresor, (2) keluar kompresor, (3) keluar kondensor, dan (4) masuk evaporator. Tekanan diukur pada sisi hisap serta sisi tekan kompresor. Instrumen meliputi termokopel tipe K dengan akurasi yang dilaporkan ±2 °C untuk pengukuran di bawah 100 °C dan ±1 °C di atas 100 °C, pengukur tekanan analog dengan kelas akurasi 1,0-1,6%, serta *clamp meter* DT200 dengan akurasi yang dilaporkan pada rentang ±0,8-2,0%. Masing-masing konfigurasi hanya diuji satu kali. Nilai yang disajikan pada Tabel 3 merupakan ringkasan dari 24 pengamatan runtun waktu selama periode pengujian.

Tabel 2: Spesifikasi Komponen Utama Sistem Hibrid STAC

Komponen	Spesifikasi
AC split	Kapasitas pendinginan 18.000 BTU/h, refrigeran R32, daya input 1450 W, tegangan 220-240 V~, frekuensi 50 Hz
Tangki penyimpan air panas	Kapasitas tangki 70 L, panjang pipa HE 1 dan HE 2 masing-masing 6 m, diameter pipa 3/8", material SS316, berat tangki 16 kg, dimensi 930 mm × 425 mm × 420 mm
Kolektor surya	Panjang 1,58 m, lebar 0,95 m, diameter *inlet*/*outlet* 3/8"
Pompa air	Daya 0,09 kW, kecepatan 2900 rpm, Q_{max} 18 L/menit, arus listrik 0,45 A, H_{max} 12 m

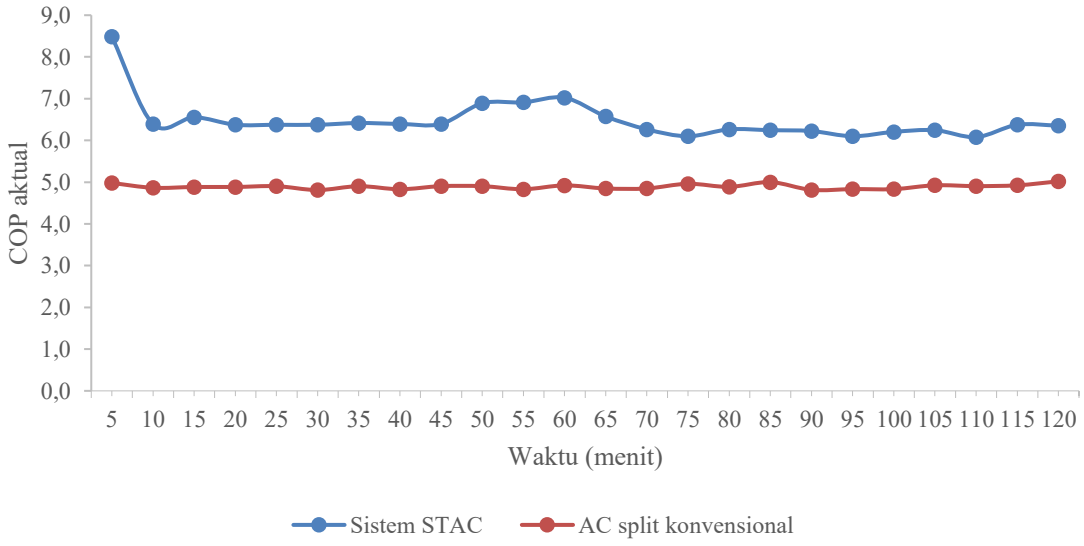


(a) (b)

Gambar 2: Dokumentasi instalasi sistem hibrida *Solar Thermal Air Conditioning* (STAC); (a) Foto Instalasi Kolektor Surya Tipe Paralel dengan Sudut Kemiringan 20°; (b) Foto Instalasi Unit Outdoor AC *Split* (no. 1) dan Tangki Penyimpan Air Panas yang juga Berfungsi sebagai Penukar Kalor (no. 2)

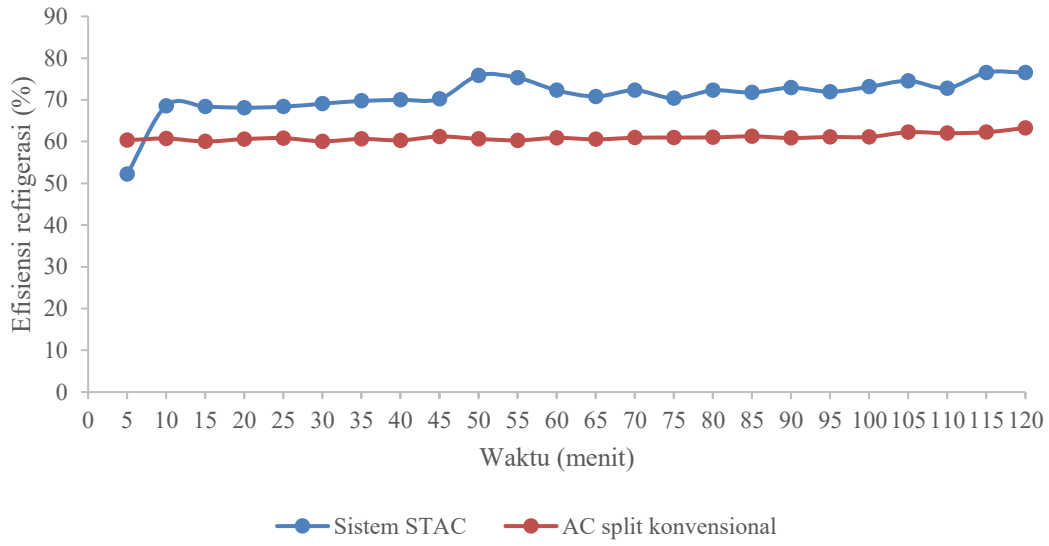
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian dianalisis untuk membandingkan COP siklus, efisiensi refrigerasi relatif terhadap batas Carnot, kerja kompresi spesifik, perpindahan kalor spesifik, dan konsumsi listrik kedua konfigurasi. Tren COP dan efisiensi refrigerasi selama pengamatan disajikan pada Gambar 3 dan Gambar 4, sedangkan ringkasan hasil perhitungan disajikan pada Tabel 3. Perbandingan dilakukan dengan mempertimbangkan keterbatasan pengujian jangka pendek dan kondisi lingkungan yang tidak sepenuhnya identik.



Gambar 3: Perbandingan COP siklus berbasis entalpi selama pengujian dua jam

Gambar 3 memperlihatkan bahwa COP siklus berbasis selisih entalpi pada konfigurasi STAC berada di atas konfigurasi konvensional selama sebagian besar periode pengamatan. Setelah lima menit awal, rentang nilai STAC sekitar 6,1-7,0, sedangkan konfigurasi konvensional sekitar 4,8–5,0. Perbedaan tersebut berkaitan dengan kombinasi kerja kompresi spesifik yang lebih rendah dan efek pendinginan spesifik yang lebih besar pada STAC. Nilai COP ini tidak boleh langsung ditafsirkan sebagai penurunan konsumsi daya listrik seluruh sistem.



Gambar 4: Perbandingan efisiensi refrigerasi terhitung selama pengujian dua jam

Berdasarkan Gambar 4, nilai efisiensi refrigerasi yang dihitung sebagai rasio COP siklus terhadap COP *Carnot* cenderung lebih tinggi pada STAC dibandingkan sistem konvensional. Namun, interpretasi selisihnya perlu memperhitungkan ketidakpastian pengukuran yang dirangkum pada Tabel 4. Hasil ini menggambarkan perbedaan kinerja termodinamika selama dua periode pengujian, bukan bukti kinerja sepanjang tahun.

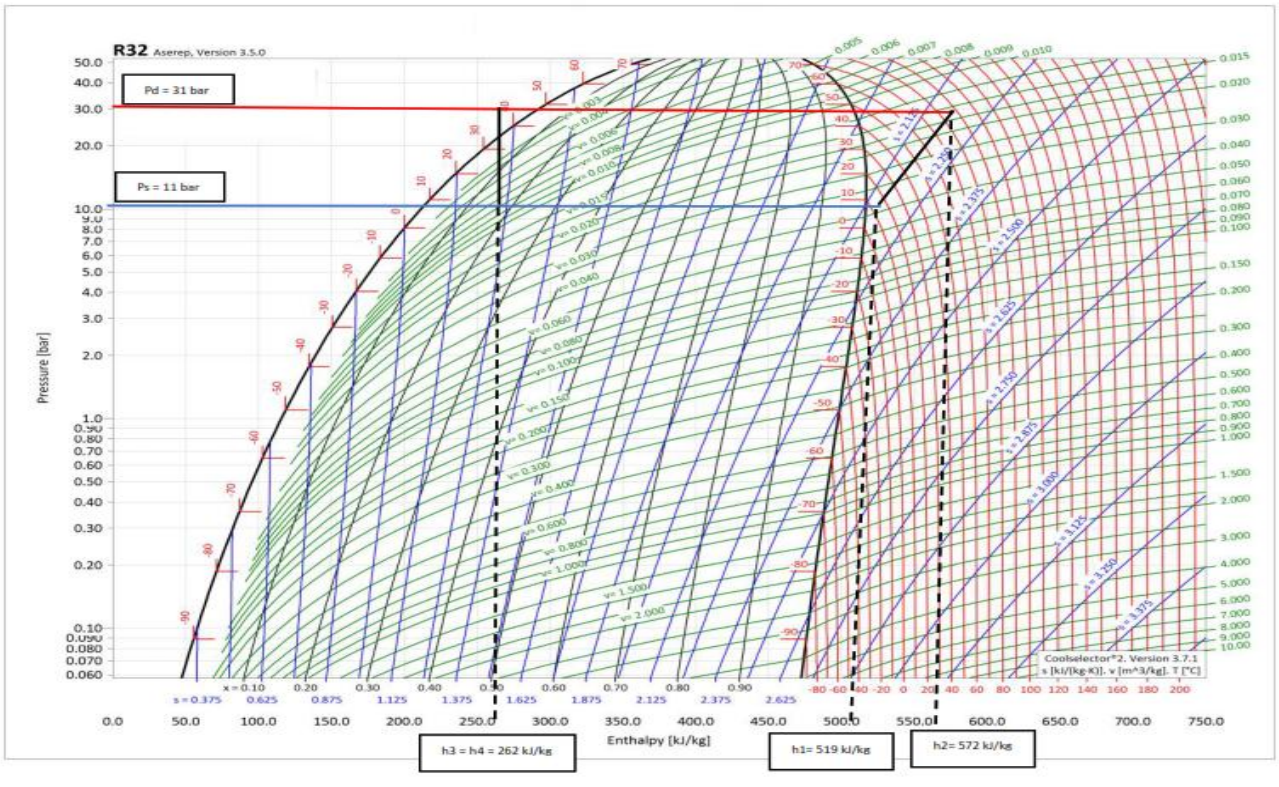
Analisis kinerja dilakukan dengan membaca sifat refrigeran R32 pada diagram tekanan–entalpi (p–h) menggunakan Coolselector®2. Temperatur dan tekanan yang diukur pada titik 1-4 digunakan untuk memperkirakan entalpi spesifik, kemudian menghitung kerja kompresi (w_k), kalor yang diserap evaporator (q_e), dan kalor yang dilepas pada sisi tekanan tinggi (q_h) dalam kJ/kg. Nilai COP siklus diperoleh dari q_e/w_k. Karena laju aliran massa refrigeran tidak diukur, besaran yang dapat disimpulkan adalah perpindahan kalor spesifik dan COP siklus, bukan kapasitas pendinginan aktual dalam kW. Konsumsi energi listrik dianalisis terpisah dari nilai arus, tegangan, asumsi faktor daya, dan waktu operasi.

3.1 Kinerja AC Split Konvensional

Contoh perhitungan pada salah satu titik pengamatan disajikan sebagai berikut.

Temperatur acuan sisi kondensasi (T^c) dari pengukuran = 59,9 °C.

Temperatur acuan sisi evaporasi (T^e) dari pengukuran = 13,6 °C.



Gambar 5: Diagram tekanan–entalpi (p–h) R32 pada AC *split* konvensional (Contoh Satu Titik Data; Pd = Tekanan Discharge, Ps = Tekanan Suction)

Pembacaan diagram p–h pada Gambar 5 memberikan contoh entalpi spesifik h_1 = 519 kJ/kg, h_2 = 572 kJ/kg, dan $h_3 = h_4$ = 262 kJ/kg untuk salah satu kondisi operasi. Nilai tersebut digunakan sebagai ilustrasi tahapan perhitungan; nilai yang dilaporkan pada Tabel 3 merupakan ringkasan 24 titik pengamatan.

Berdasarkan hasil pembacaan diagram p–h, persamaan 1-6 digunakan untuk menghitung kerja kompresi spesifik, kalor yang dilepaskan, efek pendinginan, COP siklus, COP *Carnot*, dan efisiensi refrigerasi.

a. Menghitung kerja kompresi (W_k) menggunakan Persamaan 1 (Kurniawan dkk., 2021).

$$W_k = h_2 - h_1 = 53 \text{ kJ/kg} \quad (1)$$

b. Menghitung kalor yang dilepas (q_c) menggunakan Persamaan 2.

$$q_c = h_2 - h_3 = 310 \text{ kJ/kg} \quad (2)$$

c. Menghitung efek pendinginan (q_e) menggunakan Persamaan 3.

$$q_e = h_1 - h_4 = 257 \text{ kJ/kg} \quad (3)$$

d. COP siklus dan COP *Carnot* dihitung menggunakan Persamaan (4) dan (5).

$$COP_{aktual} = \frac{q_e}{W_k} = \frac{257}{53} = 4{,}9 \quad (4)$$

$$COP_{carnot} = \frac{T_e}{(T_c - T_e)} = 286{,}6/(332{,}2 - 286{,}6) = 6{,}29 \quad (5)$$

e. Menghitung nilai efisiensi refrigerasi (η_r) dengan Persamaan 6.

$$\eta_r = \frac{COP_{aktual}}{COP_{carnot}} \times 100\% = (4{,}9/6{,}29) \times 100\% = 77{,}9\% \quad (6)$$

Konsumsi listrik selama pengujian diperkirakan dari tegangan (V), arus (I), waktu (t), dan faktor daya (cos φ) pada persamaan 7. Karena faktor daya tidak diukur, perhitungan menggunakan asumsi cos φ = 0,8 untuk kedua konfigurasi sesuai rentang yang dibahas Temaja dkk. (2018). Oleh karena itu, energi listrik yang dilaporkan merupakan estimasi, bukan hasil pembacaan langsung dari meter energi. Penggunaan faktor daya yang sama tidak menjamin ketepatan selisih energi apabila faktor daya sesungguhnya berbeda antar-konfigurasi. Diketahui: Tegangan = 220 V; Arus = 5,6 A.

$$\text{Daya } (P) = V \times I \times \cos\varphi = 220 \text{ V} \times 5{,}6 \text{ A} \times 0{,}8 = 985{,}6 \text{ W} \quad (7)$$

Energi listrik selama dua jam diperkirakan menggunakan Persamaan 8.

$$E = \left(\frac{P}{1000}\right) \times \text{waktu pemakaian} = \left(\frac{985{,}6}{1000}\right) \times 2 \text{ jam} = 1{,}971 \text{ kWh} \quad (8)$$

3.2 Kinerja AC Split Hibrida Termal Surya

Perhitungan untuk sistem STAC mengikuti prosedur penentuan entalpi dan persamaan yang sama seperti pada konfigurasi konvensional. Contoh data termodinamika yang digunakan adalah:

a. temperatur refrigeran masuk kondensor (T_c) = 326,9 K (53,9 °C);
b. temperatur refrigeran masuk evaporator (T_e) = 287,2 K (14,2 °C);

Diperoleh nilai COP aktual = q_e/W_k = 307,0/47,5 = 6,5 dan COP *Carnot* = $T_e/(T_c - T_e)$ = 287,2/(326,9 − 287,2) = 7,24, sehingga efisiensi refrigerasi η_r = (6,5/7,24) × 100% = 89,7%.

Estimasi konsumsi energi listrik STAC dihitung menggunakan Persamaan (7) dan (8) dengan asumsi faktor daya yang sama.

Diketahui: tegangan (V) = 220 V, arus (I) = 6,5 A, cos φ = 0,8, sehingga daya (P) = 1,144 kW.

Konsumsi energi listrik selama 2 jam (E) = 2,288 kWh.

Tabel 3: Rata-Rata Parameter Siklus dan Estimasi Konsumsi Listrik Kedua Konfigurasi (24 Pengamatan Runtun Waktu Per Konfigurasi)

Parameter	Sistem STAC	AC Split Konvensional
Kerja kompresi, W_k (kJ/kg)	47,5	52,6
Kalor yang dilepas pada sisi tekanan tinggi, q_c (kJ/kg)	354,5	309,8
Kalor yang diserap evaporator, q_e (kJ/kg)	307,0	257,3
COP_{aktual}	6,5	4,9
COP_{carnot}	7,24	6,29
Efisiensi refrigerasi η_r (%)	89,7	77,9
Konsumsi listrik selama 2 jam (kWh)	2,29	1,97

3.3 Gambaran Umum Kinerja Sistem

Secara keseluruhan, konfigurasi STAC menunjukkan COP siklus yang lebih tinggi dan kerja kompresi spesifik yang lebih rendah daripada AC *split* konvensional. Namun, peningkatan kinerja siklus tersebut tidak diikuti penurunan energi listrik terhitung selama pengujian dua jam. Karena sistem STAC juga menggunakan pompa sirkulasi dan menyediakan jalur pemanfaatan panas, evaluasi kinerjanya perlu memisahkan keluaran pendinginan, keluaran panas air, dan kebutuhan energi listrik.

3.4 Pengaruh Pemulihan Panas terhadap Kerja Kompresi

Pada Tabel 3, kerja kompresi spesifik STAC adalah 47,5 kJ/kg, sedangkan sistem konvensional 52,6 kJ/kg. Penurunan ini konsisten dengan perbedaan kondisi entalpi refrigeran pada titik masuk dan keluar kompresor. Walaupun fungsi pemulihan panas dapat memengaruhi tekanan kondensasi, data yang tersedia belum cukup untuk memisahkan pengaruh penukar kalor, kolektor surya, perubahan beban pendinginan, dan variasi lingkungan terhadap hasil tersebut.

HE 1 berfungsi sebagai *desuperheater* pada jalur keluaran kompresor dengan memindahkan sebagian kalor refrigeran panas lanjut ke air tangki. Temperatur refrigeran yang dilaporkan pada sisi masuk kondensor adalah 53,9 °C untuk STAC dan 59,9 °C untuk konfigurasi konvensional. Perbedaan ini mendukung dugaan perubahan kondisi termal setelah penambahan jalur pemulihan panas, tetapi hubungan sebab-akibat dengan penurunan rasio kompresi masih memerlukan data tekanan pada setiap titik operasi kontrol beban yang lebih ketat.

3.5 Efek Pendinginan dan Kalor yang Dilepaskan

Efek pendinginan spesifik pada STAC tercatat 307,0 kJ/kg, lebih tinggi daripada konfigurasi konvensional sebesar 257,3 kJ/kg. Sementara itu, total kalor spesifik yang dilepaskan pada sisi tekanan tinggi meningkat dari 309,8 menjadi 354,5 kJ/kg. Pada STAC, nilai $q_h = h_2 - h_3$ perlu dipahami sebagai total kalor yang dilepaskan refrigeran melalui HE 1 dan kondensor, bukan kalor pada kondensor saja. Data memenuhi neraca energi spesifik siklus: 307,0 + 47,5 = 354,5 kJ/kg pada STAC dan 257,3 + 52,6 = 309,9 kJ/kg pada konfigurasi konvensional; selisih 0,1 kJ/kg dari angka tabel dapat disebabkan pembulatan. Tanpa pengukuran laju massa refrigeran atau laju alir serta perubahan temperatur air, manfaat panas total belum dapat dinyatakan dalam kW atau kWh.

Peningkatan kalor spesifik yang dilepaskan pada sisi tekanan tinggi menunjukkan potensi pemanfaatan energi untuk air panas. Namun, laju produksi air panas, perubahan temperatur tangki, dan jumlah energi yang dipulihkan tidak dilaporkan secara kuantitatif. Oleh karena itu, manfaat praktis pemanasan air masih perlu dievaluasi melalui neraca energi tangki dan pengukuran aliran fluida.

3.6 COP Siklus dan Efisiensi Refrigerasi

Perbandingan pada Tabel 3 menunjukkan COP siklus berbasis entalpi sebesar 6,5 untuk STAC dan 4,9 untuk AC *split* konvensional, atau berbeda sekitar 32,7% berdasarkan nilai yang dibulatkan. COP *Carnot* yang dilaporkan masing-masing sebesar 7,24 dan 6,29, sedangkan efisiensi refrigerasi relatif terhadap siklus *Carnot* tercatat 89,7% dan 77,9%. Hasil tersebut menunjukkan perbedaan kondisi siklus selama pengujian, tetapi belum cukup untuk menyimpulkan penurunan irreversibilitas yang pasti atau penghematan listrik, terutama karena ketidakpastian perhitungan dan kondisi pengujian pada dua hari berbeda. Nilai COP *Carnot* juga perlu diperiksa kembali berdasarkan konversi temperatur ke kelvin yang benar.

3.7 Perbandingan Konsumsi Listrik

Selama dua jam pengujian, energi listrik yang diperkirakan untuk STAC sebesar 2,29 kWh, sedangkan AC *split* konvensional sebesar 1,97 kWh. Dengan demikian, konsumsi listrik STAC dalam pengujian ini sekitar 16,2% lebih tinggi, bukan lebih hemat. Kebutuhan listrik pompa sirkulasi dan perbedaan kondisi operasi dapat berkontribusi terhadap selisih tersebut, tetapi belum dapat dipisahkan secara pasti dari data yang tersedia. Nilai COP pada Tabel 3 merupakan COP siklus berbasis entalpi, sehingga tidak sama dengan COP sistem yang dihitung dari kapasitas pendinginan aktual dibagi daya listrik total. Keuntungan potensial STAC terletak pada kombinasi fungsi pendinginan dan pemanfaatan panas, yang besarnya belum dapat dihitung tanpa data produksi air panas dan kapasitas pendinginan aktual.

3.8 Perbandingan dengan Penelitian Terdahulu

Secara umum, temuan ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan perubahan kinerja siklus ketika panas buang refrigeran dimanfaatkan kembali (Kaidir dkk., 2018; Kurniawan dkk., 2020). Namun, angka peningkatan dari publikasi lain tidak dapat dibandingkan langsung karena konfigurasi, refrigeran, metode pengukuran, dan kondisi operasi berbeda. Selain itu, kajian yang menggunakan kolektor fotovoltaik untuk memasok listrik tidak identik dengan pemanfaatan kolektor termal sebagai sumber panas.

Kontribusi penelitian ini adalah perbandingan eksperimental jangka pendek pada satu unit AC *split* 2 PK dengan konfigurasi hibrida dan konvensional. Nilai tambah ilmiahnya terdapat pada pelaporan parameter siklus berbasis entalpi dan estimasi konsumsi listrik secara bersamaan. Akan tetapi, pemisahan pengaruh kolektor surya dan pemulihan panas, pengulangan antarhari, serta pengukuran energi air panas diperlukan agar keunggulan sistem secara keseluruhan dapat ditentukan secara lebih meyakinkan.

3.9 Implikasi Penerapan pada Bangunan Tropis

Sistem yang memadukan pendinginan ruangan dan penyediaan air panas berpotensi relevan untuk bangunan tropis dengan kebutuhan kedua layanan tersebut. Pada rancangan yang diuji, jalur pemulihan panas dan kolektor surya dapat menyediakan energi bagi air tangki, sedangkan perubahan parameter refrigerasi menunjukkan potensi peningkatan kinerja siklus. Namun, data dua jam belum cukup untuk menyimpulkan penghematan energi tahunan, kontribusi terhadap *Net Zero Energy Building*, maupun kelayakan ekonomi. Penilaian tersebut memerlukan neraca energi terintegrasi, pencatatan intensitas radiasi surya, pengukuran suhu air, serta profil beban pendinginan harian.

3.10 Ketidakpastian dan Keterbatasan Pengujian

Ketidakpastian hasil pengujian dianalisis menggunakan metode perambatan ketidakpastian (JCGM, 2023) dengan tingkat kepercayaan sekitar 95% (faktor cakupan $k = 2$). Ketidakpastian tipe A (u_A) dihitung dari sebaran 24 titik data selama pengujian menggunakan Persamaan (9), dengan s adalah simpangan baku dan n adalah jumlah titik data. Ketidakpastian tipe B dihitung dari batas akurasi instrumen (a_i) yang diasumsikan berdistribusi seragam, sehingga ketidakpastian standarnya adalah $a_i/\sqrt{3}$, kemudian dirambatkan ke setiap parameter hasil R melalui koefisien sensitivitas $\partial R/\partial x_i$ sesuai Persamaan (10). Batas akurasi yang digunakan adalah ±2 °C untuk termokopel tipe K, 1,6% dari nilai terbaca untuk *pressure gauge* (nilai konservatif dari rentang 1,0–1,6%), ±0,8% untuk tegangan dan ±2,0% untuk arus pada *clamp meter* DT200, serta ±2 kJ/kg untuk pembacaan entalpi pada diagram p-h. Ketidakpastian entalpi diturunkan dari ketidakpastian temperatur dan tekanan menggunakan kalor spesifik R32 pada kondisi operasi (sekitar 1,5 kJ/kg·K untuk uap sisi hisap, 2,2 kJ/kg·K untuk uap sisi tekan, dan 1,95 kJ/kg·K untuk cairan keluar kondensor), sehingga diperoleh $u(h_1) = 2{,}1$ kJ/kg, $u(h_2) = 3{,}0$ kJ/kg, dan $u(h_3 = h_4) = 2{,}5$ kJ/kg. Karena h_1 muncul pada q_e maupun W_k, ketidakpastian COP aktual dihitung langsung dari turunan parsialnya terhadap h_1, h_2, dan h_4. Ketidakpastian gabungan diperluas (U) dihitung dengan Persamaan (11).

$$u_A = \frac{s}{\sqrt{n}} \tag{9}$$

$$u_{B,R} = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial R}{\partial x_i} \cdot \frac{a_i}{\sqrt{3}} \right)^2} \tag{10}$$

$$U = k \cdot \sqrt{{u_A}^2 + {u_B}^2} \tag{11}$$

Tabel 4 merangkum estimasi ketidakpastian diperluas untuk kedua konfigurasi. Nilai ketidakpastian COP siklus adalah ±1,1 pada STAC dan ±0,7 pada konfigurasi konvensional, sedangkan ketidakpastian konsumsi listrik terhitung masing-masing ±0,06 dan ±0,05 kWh. Selisih hasil yang teramati perlu ditafsirkan dengan mempertimbangkan komponen galat, asumsi faktor daya, serta keterbatasan desain eksperimen. Khusus untuk efisiensi refrigerasi, perbedaan antara 89,7% dan 77,9% harus disampaikan secara hati-hati karena rentang

ketidakpastian relatif besar. Dengan hanya satu pengujian pada setiap konfigurasi, signifikansi statistik dan keterulangan antarhari belum dapat dipastikan.

Tabel 4: Estimasi Ketidakpastian Diperluas (K = 2) untuk Parameter Kinerja Kedua Konfigurasi

Parameter	Sistem STAC	AC Split Konvensional
Kerja kompresi, W_k (kJ/kg)	47,5 ± 7,3	52,6 ± 7,4
Efek pendinginan, q_e (kJ/kg)	307,0 ± 6,6	257,3 ± 6,6
COP siklus berbasis entalpi	6,5 ± 1,1 (±16,6%)	4,9 ± 0,7 (±15,1%)
COP *Carnot*	7,24 ± 0,64	6,29 ± 0,49
Efisiensi refrigerasi, η_r (%)	89,7 ± 16,8	77,9 ± 13,2
Konsumsi listrik selama 2 jam (kWh)	2,29 ± 0,06	1,97 ± 0,05

Penelitian ini terbatas pada satu pengujian selama dua jam untuk setiap konfigurasi, yang dilaksanakan pada dua hari berbeda. Meskipun terdapat 24 pengamatan berurutan per konfigurasi, data tersebut tidak mewakili ulangan eksperimen independen. Perbedaan kondisi cuaca dan beban selama pengujian masih dapat memengaruhi hasil. Pengujian jangka panjang perlu dilakukan dengan pengukuran irradiansi surya, temperatur dan laju alir air tangki, laju aliran massa refrigeran, daya listrik kompresor dan pompa secara terpisah, serta pengulangan pada berbagai kondisi operasi. Dengan data tersebut, COP sistem berbasis daya listrik dan potensi penghematan energi total dapat dihitung lebih andal.

4. KESIMPULAN

Pengujian komparatif pada unit AC *split* 2 PK menggunakan refrigeran R32 memperlihatkan bahwa konfigurasi hibrida termal surya dengan pemulihan panas memiliki COP siklus berbasis entalpi rata-rata 6,5, sedangkan konfigurasi konvensional 4,9, atau lebih tinggi sekitar 32,7% pada kondisi pengamatan. Kerja kompresi spesifik turun dari 52,6 menjadi 47,5 kJ/kg, sementara efek pendinginan spesifik meningkat dari 257,3 menjadi 307,0 kJ/kg. Efisiensi refrigerasi yang dihitung relatif terhadap COP *Carnot* tercatat 89,7% pada STAC dan 77,9% pada konfigurasi konvensional; besarnya selisih ini perlu ditafsirkan bersama ketidakpastian pengukuran. Sebaliknya, energi listrik selama dua jam diperkirakan lebih tinggi pada STAC, yaitu 2,29 kWh dibandingkan 1,97 kWh, sehingga peningkatan COP siklus tidak menunjukkan penghematan listrik. Konfigurasi hibrida berpotensi memberi manfaat tambahan melalui pemanasan air, tetapi besarnya energi termal yang dimanfaatkan belum diukur. Temuan ini merupakan evaluasi awal pada kondisi pengujian terbatas. Pengulangan eksperimen, pengukuran radiasi surya dan energi air panas, serta evaluasi listrik dan kapasitas pendinginan aktual diperlukan sebelum manfaat energi total atau keekonomian sistem dapat disimpulkan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Politeknik Negeri Indramayu atas dukungan fasilitas laboratorium serta kepada Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi atas dukungan pendanaan yang dilaporkan melalui DIPA POLINDRA. Dengan rincian nomor pendanaan yang tertuang dalam no. Kontrak: 009/DST/PL42/AL.04.03/SIPASTI/2026.

KONFLIK KEPENTINGAN

Para penulis menyatakan bahwa tidak terdapat konflik kepentingan finansial maupun hubungan pribadi yang dapat dianggap memengaruhi hasil atau pembahasan dalam artikel ini.

PERNYATAAN PENGGUNAAN KECERDASAN BUATAN

Dalam penyusunan manuskrip, penulis menggunakan teknologi kecerdasan buatan atau berbantuan kecerdasan buatan untuk membantu penyuntingan bahasa dan keterbacaan serta penelusuran awal referensi. Seluruh keluaran telah ditinjau dan disunting oleh penulis. Penulis bertanggung jawab penuh atas ketepatan sitasi, interpretasi ilmiah, dan isi akhir artikel.

KONTRIBUSI PENULIS

Yudhy Kurniawan : Konseptualisasi, Metodologi, Kurasi Data, Perolehan Pendanaan.
Wardika : Metodologi, Validasi, Penyediaan Sumber Daya, Supervisi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan.
Ahmad Maulana Kartika : Konseptualisasi
Faisal Yusuf Fadhilah : Supervisi, Administrasi Proyek, Validasi, Penulisan - Tinjauan dan Penyuntingan, Perolehan Pendanaan
Seluruh penulis telah memberikan kontribusi yang signifikan terhadap pelaksanaan penelitian, penyusunan naskah, serta telah membaca, meninjau, dan menyetujui versi akhir naskah untuk dipublikasikan.

DAFTAR PUSTAKA

Abdelgaied, M., Saber, M. A., Bassuoni, M. M., & Khaira, A. M. (2023). Performance improvement of solar-assisted air-conditioning systems by using an innovative configuration of a desiccant dehumidifier and thermal recovery unit. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *148*(14), 7003–7018.

Al Khiro, H. A., & Boukhanouf, R. (2024). Energy and Exergy Performance Analysis of Solar-Assisted Thermo-Mechanical Vapor Compression Cooling System. *Sustainability*, *16*(19), 8625.

Al–Okbi, A., Vankov, Y., & Kadhim, H. (2021). Improving performance of direct expansion air conditioning systems while reducing electricity consumption through using hybrid energy. *E3S Web of Conferences*, *289*, 01014.

Gunarto, G., Julianto, E., Iwan, M., & Sarwono, E. (2023). Modifikasi Air Conditioner Split 1/2 PK Sebagai Water Heater Untuk Media Pembelajaran Mesin Konversi Energi Bagi Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Pontianak. *Turbo : Jurnal Program Studi Teknik Mesin*, *12*(2), 2.

JCGM. (2023). *Guide to the expression of uncertainty in measurement — Part 1: Introduction*. https://doi.org/10.59161/JCGMGUM-1-2023

Kabeel, A. E., Abdelgaied, M., & Zakaria, Y. (2017). Performance evaluation of a solar energy assisted hybrid desiccant air conditioner integrated with HDH desalination system. *Energy Conversion and Management*, *150*, 382–391.

Kaidir, Mulyanef, & Burmawi. (2018). Performance Study on Solar Hybrid Air-Conditioning System for Residential Water Heating. *MATEC Web of Conferences*, *248*, 01003.

Kaidir, Suryadimal, Wibisono, A., Burmawi, & Mulyanef. (2023). Performance study of air conditioning system using solar power photovoltaic as energy source. *AIP Conference Proceedings*, *2691*, 040008.

Kurniawan, Y., Khoerun, B., & Rohma, S. (2021). Analisis Perbandingan Performansi AC Split Konvensional dengan AC Split Tenaga Surya. *Jurnal Teknik Mesin*, *14*(1), 6–10.

Kurniawan, Y., Kusnandar, Berkah, F. T. K., & Tony, M. S. K. (2020). Development of hot water storage in hybrid-solar thermal air conditioning system. *Journal of Physics: Conference Series*, *1511*(1), 012123.

Noor, D. N., Ibrahim, H., & Basrawi, F. (2018). Environmental Assessment on Hybrid Solar Air Conditioning System in Tropical Region. *MATEC Web of Conferences*, *225*, 06016.

Nwasuka, N. C., & Nwaiwu, U. (2021). Performance Evaluation Of A Solar Hybrid Air-Conditioner. *Proceedings on Engineering Sciences*, *3*(4), 463–472.

Rashid, F. L., Eleiwi, M. A., Mohammed, H. I., Ameen, A., & Ahmad, S. (2023). A Review of Using Solar Energy for Cooling Systems: Applications, Challenges, and Effects. *Energies*, *16*(24), 8075.

She, X., Cong, L., Nie, B., Leng, G., Peng, H., Chen, Y., Zhang, X., Wen, T., Yang, H., & Luo, Y. (2018). Energy-efficient and -economic technologies for air conditioning with vapor compression refrigeration: A comprehensive review. *Applied Energy*, *232*, 157–186.

Sutriyatna, S. (2022). Analisis Penghematan Konsumsi Energi Listrik pada AC dengan Perubahan Udara dalam Ruang Laboratorium Politeknik Negeri Pontianak. *Vokasi: Jurnal Publikasi Ilmiah*, *17*(1), 11–16.

Temaja, I. W., Arsana, I. M. E., & Midiani, L. P. I. (2018). Kajian Ekesperimental Campuran R-32/R-290 Pengganti Refrijeran R-32 pada AC Split Domestik. *Matrix : Jurnal Manajemen Teknologi dan Informatika*, *8*(3), 74–78.

Uchechukwu, N., P, N. C., C, C. M., & C, N. V. (2023). Development of a solar hybrid air conditioner. *Indian Journal of Engineering*, *20*(53), 1–9.