

STUDI EKSPERIMENTAL *SOLAR COLD ENERGY STORAGE* DENGAN PENAMBAHAN PCM DAN TANPA PCM

Calvin¹, Samar², Himsar Ambarita³

Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara

Jalan Dr. T. Mansyur No. 9, Padang Bulan, Kec. Medan Baru, Kota Medan, Sumatera Utara 20222, Indonesia

*Email: calvinmesin123@gmail.com

ABSTRAK

Peningkatan efisiensi energi dan kondisi kenyamanan di dalam gedung lingkungan semakin dibutuhkan. Oleh karena itu, bahan perubahan fasa (PCM) dikhususkan untuk mengurangi konsumsi energi bangunan. Penelitian ini adalah eksperimen dengan sistem kerja CES bertenaga surya yang berdimensi 740 mm x 410 mm x 310 mm yang digunakan untuk menyuplai udara dinginnya ke ruangan berdimensi 4,8 m x 3,7 m x 3,3 m. Komponen utama dari sistem pendingin CES terdiri dari gabungan sistem termoelektrik dan PCM yang diaplikasikan secara aktif. Dalam aplikasi aktif, konveksi paksa merupakan mekanisme perpindahan panas yang dominan antara PCM dan udara dalam CES dimana diperlukan beberapa perangkat listrik tambahan. Pada pengujian ini didapat hasil CES tanpa PCM, di hari pertama dan kedua memiliki perbedaan temperatur outlet untuk ruangan dan temperatur inlet dari ruangan yang hampir sama dengan rata-rata sebesar 1,43°C dan 1,5. Sedangkan CES dengan PCM pada hari pertama dan kedua dengan rata-rata sebesar 7,36°C dan 3,85°C. Untuk nilai COP didapat CES tanpa PCM di hari pertama dan kedua memiliki nilai rata-rata sebesar 0,25. Sedangkan nilai COP CES dengan PCM di hari pertama dan kedua sebesar 0,39 dan 0,33.

Kata kunci: cold energy storage (CES), phase change material (PCM), termoelektrik peltier, temperatur.

ABSTRACT

Increased energy efficiency and comfort conditions in the building environment are increasingly needed. Therefore, phase change materials (PCM) are devoted to reducing the energy consumption of buildings. This research is an experiment with a solar-powered CES working system with dimensions of 740 mm x 410 mm x 310 mm which is used to supply cold air to a room with dimensions of 4.8 m x 3.7 m x 3.3 m. The main component of the CES cooling system consists of a combination of a thermoelectric system and an actively applied PCM. In active applications, forced convection is the dominant heat transfer mechanism between PCM and air in CES where some additional electrical devices are required. In this test, the results of CES without PCM were obtained, on the first and second days there were differences in the outlet temperature for the room and the inlet temperature for the room which were almost the same with an average of 1.43 °C and 1.5. While CES with PCM on the first and second days with an average of 7.36 °C and 3.85 °C. For COP values obtained CES without PCM on the first and second days has an average value of 0.25. While the value of COP CES with PCM on the first and second days was 0.39 and 0.33.

Keywords: cold energy storage (CES), phase change material (PCM), peltier thermoelectric, temperature.

1. PENDAHULUAN

Peningkatan efisiensi energi dan kondisi kenyamanan di dalam gedung lingkungan semakin dibutuhkan. Oleh karena itu, bahan perubahan fasa (PCM) dikhususkan untuk mengurangi konsumsi energi bangunan [1]. Salah satu cara untuk mengurangi kebutuhan energi adalah penggunaan *thermal energy storage* (TES) [2, 3]. Di antara berbagai aplikasi TES, akumulasi suhu panas dan dingin dari -50°C hingga 120°C memiliki potensi pasar yang lebih tinggi jika menggunakan *phase change material* (PCM) [4, 5]. *Phase change material* (PCM) yang merupakan LTHES (*latent heat thermal energy storage*) ketika digunakan sebagai *cold energy storage* (CES), menawarkan alternatif yang menjanjikan terhadap sistem pendingin konvensional. PCM memiliki kapasitas penyimpanan energi panas yang besar dalam kisaran suhu yang dekat dengan titik perubahan wujudnya dan menunjukkan perilaku yang hampir isothermal selama proses *charging* dan *discharging* [6].

Teknologi PCM dapat diimplementasikan ke dalam bangunan, baik secara pasif atau aktif [7]. Dalam aplikasi aktif, konveksi paksa merupakan mekanisme perpindahan panas yang dominan antara PCM dan udara dalam ruangan dimana diperlukan beberapa perangkat listrik atau mekanik tambahan [8]. Penggunaan PCM sebagai *cold energy storage* (CES) dapat diintegrasikan dengan sistem termoelektrik. Pendinginan termoelektrik (TEC) memiliki beberapa keunggulan dibandingkan dengan sistem pendingin lain seperti *compact* dalam ukuran dan ringan, keandalan (reliability) tinggi, tidak ada bagian yang bergerak secara mekanis sehingga tidak berisik, tidak ada fluida kerja sehingga ramah lingkungan, dan pendinginan termoelektrik dapat ditenagai secara DC (arus searah) yang berarti mudah diintegrasikan dengan panel PV (fotovoltaik) [9].

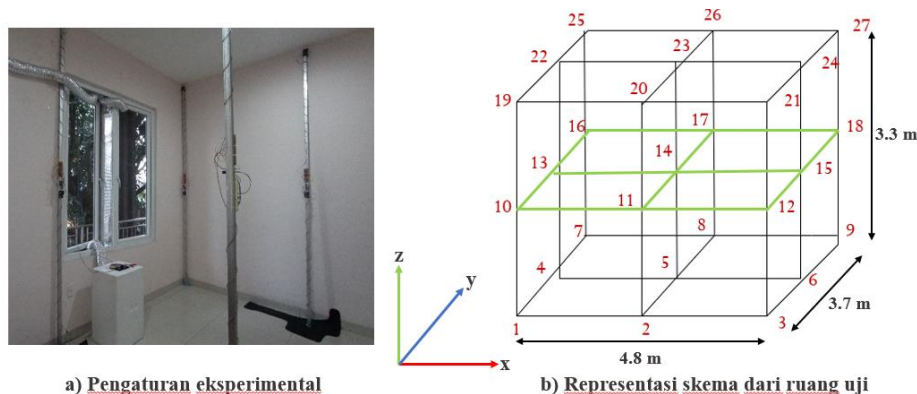
Sistem pendingin yang diteliti adalah *solar cold energy storage*. Pada sistem *cold energy storage* ini menggunakan PCM dan TEC yang ditenagai oleh panel surya. Penelitian ini berfokus pada temperatur yang terjadi di *cold energy storage* dan nilai performansi dari sistem kerja *cold energy storage*.

2. METODE DAN SETUP EKSPERIMENTAL

Peralatan pengujian dan rumusan masalah dijelaskan pada bagian berikut ini.

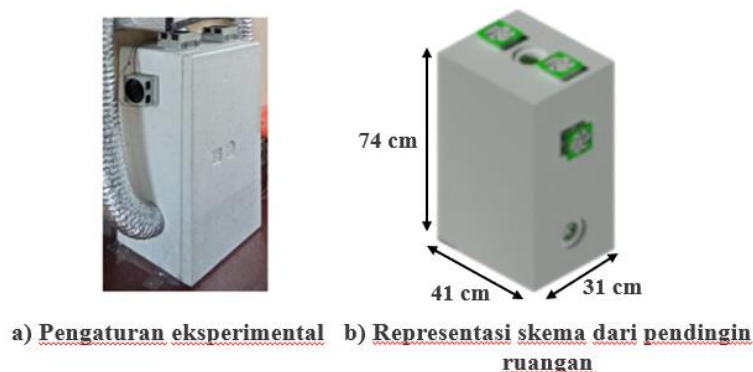
2.1. Deskripsi sistem

Pada penelitian ini objek penelitian yang diamati adalah ruangan uji yang berlokasi di kota Medan, Sumatera Utara dengan dimensi 4,8 m x 3,7 m x 3,3 m yang dikondisikan udaranya oleh pendingin ruangan berbasis *solar cold energy storage*. Representasi skema dari ruangan uji yang dianalisa dengan dinding ruangan uji yang terdapat jendela dengan dimensi geometris dan pengaturan eksperimental ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ruang uji

Seperti yang terlihat pada Gambar 2, ukuran pendingin *solar cold energy storage* berbahan styrofoam adalah 74 cm x 41 cm x 31 cm dengan 4 set peltier sebagai sumber pendingin ditambah PCM berjenis *ice gel* dan 6 kipas DC (8 x 8) cm untuk sirkulasi udara di dalam ruangan uji, dimana 4 kipas terpasang di dalam ruangan uji pada kotak styrofoam sebagai output ke ruangan uji, dan 2 kipas lagi terpasang di pendingin ruangan sebagai input dari ruangan uji dengan daya listrik yang disuplai dari panel surya. Pendingin *solar cold energy storage* memiliki tiga bukaan, dua bukaan untuk saluran masuk udara dan satu lagi untuk saluran keluar udara.

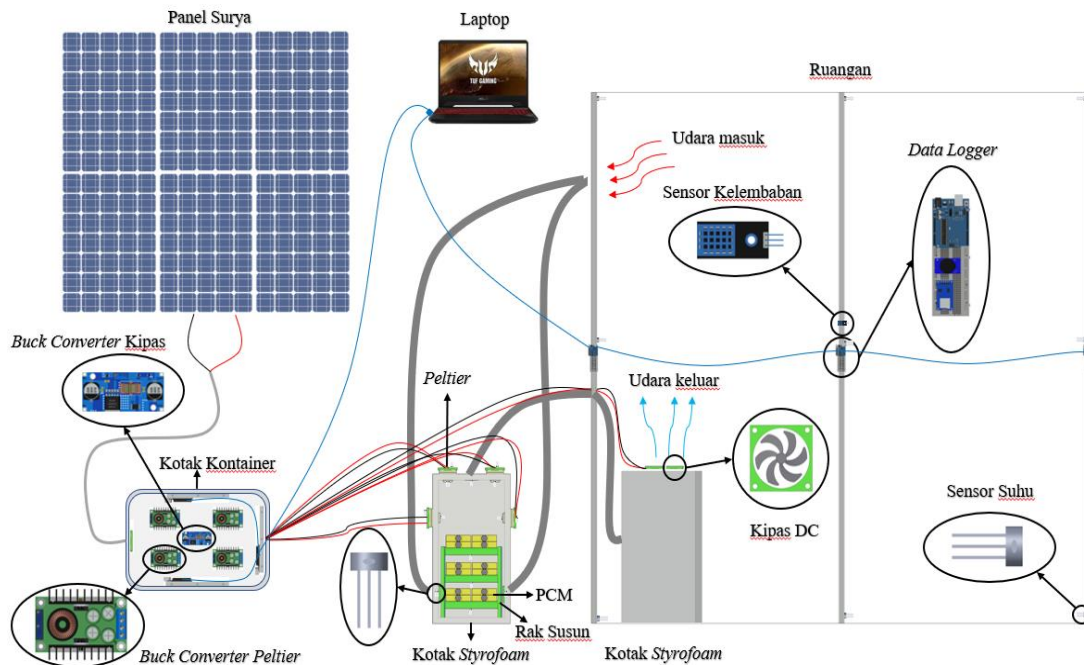


Gambar 2. Pendingin solar cold energy storage

2.2. Prosedur percobaan

Dua kondisi yang berbeda dilakukan selama percobaan untuk menganalisis dan membandingkan pengukuran.

- Mode 1 : Pendingin *cold energy storage* tanpa PCM.
- Mode 2 : Pendingin *cold energy storage* dengan PCM

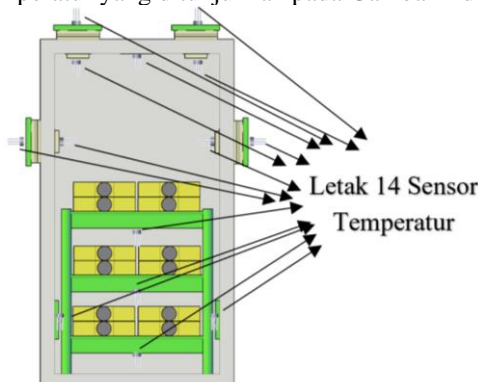


Gambar 3. Skema pengujian

Pengujian dilakukan pada tanggal 02-03 Oktober 2021 untuk mode 1 dan 11-12 Januari 2022 untuk mode 2 dengan kotak styrofoam yang sama. Pada Gambar 3 dapat dilihat bahwa panel surya digunakan sebagai sumber energi untuk menjalankan alat pendingin. Diketahui bahwa energi radiasi matahari yang diserap panel surya cukup fluktuatif sehingga digunakan perangkat buck converter untuk menurunkan tegangan yang berlebih sesuai tegangan kerja alat pendingin yaitu 12 V. Alat pendingin yang digunakan adalah sistem pendingin berbasis *solar cold energy storage*. Pada alat pendingin dipasang termoelektrik dan PCM.

Cara kerja dari alat pendingin dimulai dengan udara dari ruangan dihisap dari bagian atas ruangan masuk ke kotak pendingin. Udara ruangan yang masuk kotak pendingin diserap panasnya kemudian dialirkan kembali ke ruangan menggunakan kipas DC sehingga dihasilkan output udara dengan temperatur yang lebih rendah ke dalam ruangan.

Selanjutnya, sensor arduino-uno mulai di jalankan untuk dapat mengakuisisi data secara *real-time* yang di simpan pada sd-card. Setelah itu, pengaturan eksperimen dijalankan apakah terjadi permasalahan pada sensor dengan menggunakan laptop. Setelah itu, mikrokontroler arduino membaca temperatur selama waktu yang telah diatur, microsd dicabut dan dibaca dalam microsoft excel pada komputer. Untuk pendingin *solar cold energy storage* terdapat 14 titik sensor temperatur yang ditunjukkan pada Gambar 4 dan 1 sensor suhu di sekitar CES.



Gambar 4. Letak sensor suhu di pendingin CES

2.3. Persamaan yang digunakan

Membandingkan kerja suatu sistem pendingin, berarti membicarakan koefisien performa (COP). Dari sisi udara, kapasitas pendinginan (Q_c) dan COP dari unit pendingin dapat dievaluasi dengan persamaan berikut:

$$Q_c = c_{p,udara} \dot{m} (T_{in,udara} - T_{out,udara}) \quad (1)$$

Dimana \dot{m} merupakan laju aliran massa udara dari unit pendingin, $T_{in,udara}$ dan $T_{out,udara}$ merupakan temperatur masuk dan keluar dari aliran udara yang melalui unit pendingin. $c_{p,udara}$ merupakan kapasitas panas udara yang melalui unit pendingin yang diambil pada referensi temperatur rata-rata $T_{in,udara}$ dan $T_{out,udara}$.

$$COP_{unit} = \frac{Q_c}{P_{unit}} \quad (2)$$

Dimana Q_c merupakan kapasitas pendinginan yang dihasilkan dari unit pendingin dan P_{unit} merupakan total daya listrik yang dikonsumsi termoelektrik dan kipas DC.

Untuk persamaan fungsi kerja kipas DC yang digunakan:

$$v = -0,0184V^2 + 0,4636V - 0,7807 \quad (3)$$

Dimana v adalah kecepatan kipas DC dan V adalah tegangan listrik yg disuplai ke kipas DC.

2.4. Alat-alat dan bahan yang digunakan

Alat ukur untuk pengujian ditunjukkan pada Gambar 5 dan spesifikasi diberikan pada Tabel 1.



Gambar 5. Alat-alat ukur

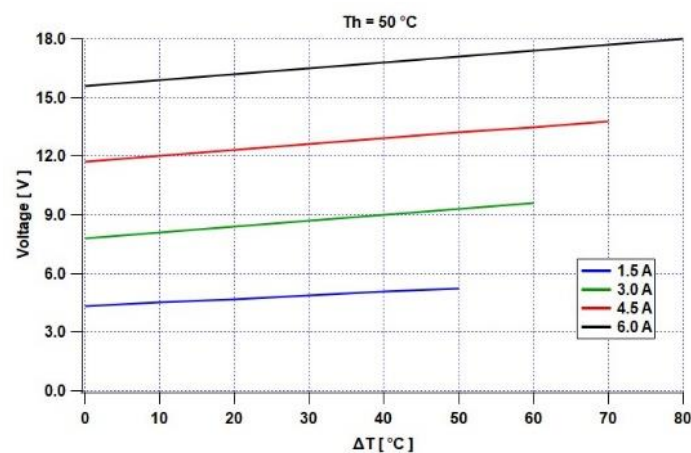
Tabel 1 Spesifikasi peralatan pengukuran

Peralatan	Model	Jangkauan	Akurasi/resolusi
Sensor temperatur	DS18B20	-55 +125 °C	± 0,5 °C
Sensor kelembaban	DHT11	20 – 90% RH	±5% RH
Anemometer	GT8907	0 – 45,0 m/s	± 3%.
Sensor tegangan	-	0 – 25 V	0,00489 V

Peltier yang digunakan modul peltier “TEC-12706” dengan spesifikasi yang dapat dilihat dapat dilihat pada Tabel 2. Untuk grafik kerja peltier dapat dilihat pada Gambar 6.

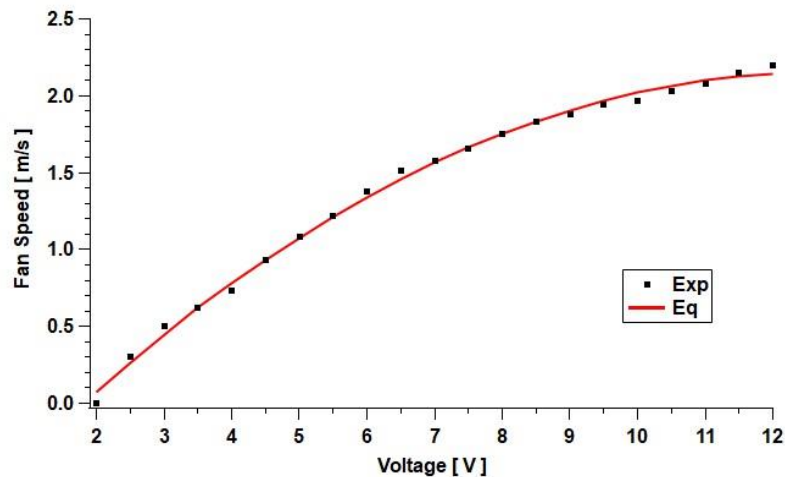
Tabel 2 Spesifikasi Modul Peltier “TEC1-12706”

Sisi Temperatur Panas (°C)	25°C	50°C
Q_{max} (Watts)	50	57
Delta T_{max} (°C)	66	75
I_{max} (Amps)	6.4	6.4
V_{max} (Volts)	14,4	16,4
Resistansi Modul (Ohms)	1,98	2,30



Gambar 6. Grafik fungsi kerja peltier

Terdapat Kipas DC (8 X 8) cm dengan daya sebesar 2,6 Watt. Untuk grafik fungsi kerja kipas DC pada Gambar 7, tampak titik-titik data Exp yang didapatkan melalui pengukuran menggunakan anemometer pada range tegangan 2-12 V dengan inkremen 0,5 V. Sedangkan kurva persamaan Eq merupakan hasil regresi polinomial dari titik-titik data Exp sehingga didapatkan persamaan (3) yang ada di bagian 2.3.



Gambar 7. Grafik fungsi kerja kipas DC

Bahan yang digunakan untuk pengujian adalah material berubah fasa *ice gel* sebanyak 24 wadah 400 ml dengan sifat termofisik yang dapat dilihat pada tabel 3 [10].

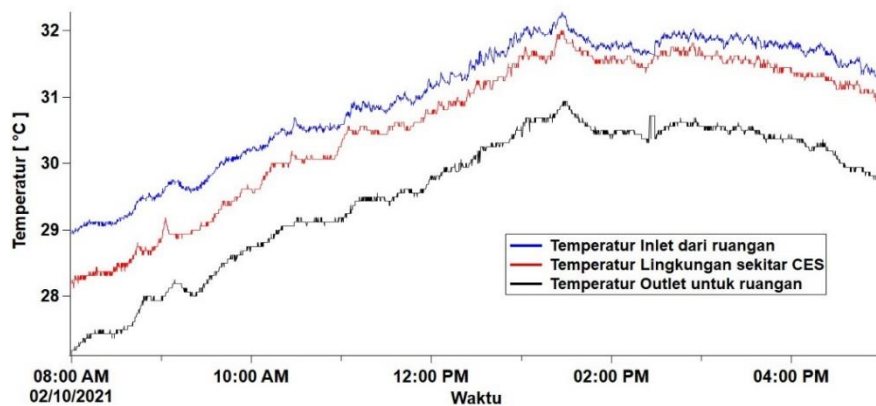
Tabel 3 Sifat termo-fisik dari *ice gel*

Suhu leleh	-5 °C
Suhu beku	-5 °C
Kalor laten	507952 J/ kg
Kalor spesifik liquid	4024 J/kg °C
Kalor spesifik solid	1787 J/kg °C
Densitas	1000 kg/m ³
Konduktivitas termal liquid	0,55677 W/m K @20 °C
Konduktivitas termal solid	1,96 W/m K @-5 °C

3. HASIL

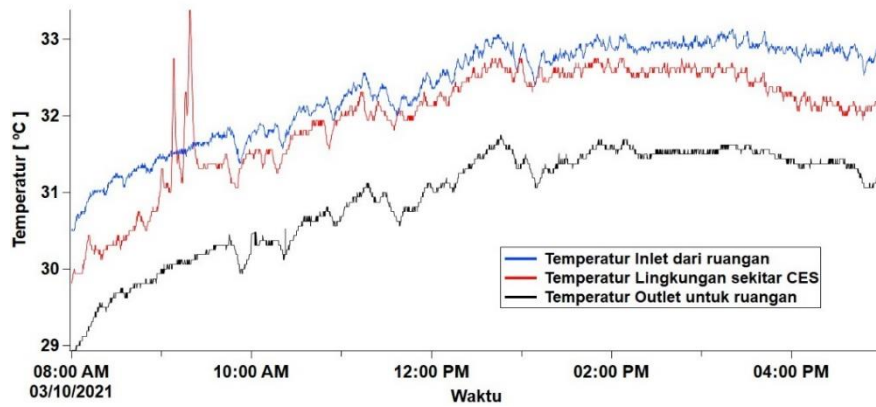
Pengujian eksperimental untuk sistem pendingin CES dilakukan di Medan, Sumatera Utara. Pengujian dilakukan untuk mempelajari karakteristik kinerja sistem pendingin CES.

Dalam penelitian ini, data suhu dalam kotak CES dianalisis menggunakan data eksperimental pada jam kerja selama 2 hari pada pengujian mode 1 (tanpa PCM) tanggal 02-03 Oktober 2021. Adapun grafiknya dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 8. Grafik temperatur tanpa menggunakan PCM (02 Oktober 2021)

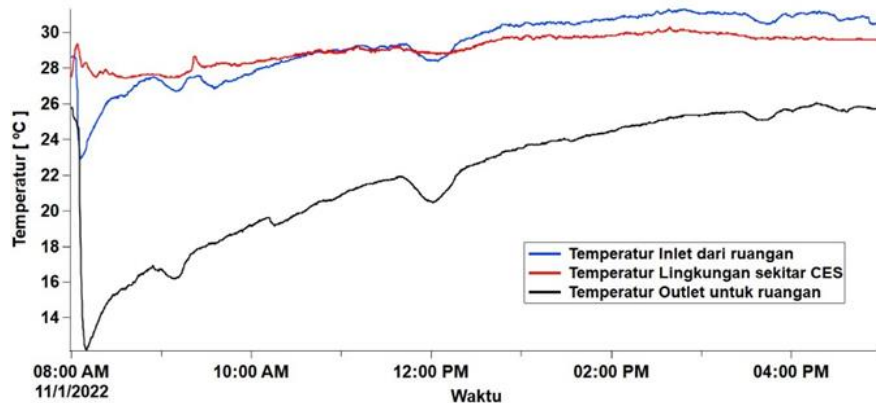
Dapat dilihat pada Gambar 8 yaitu dari pukul 08:00 hingga pukul 17:00 didapatkan temperatur rata-rata inlet dan outlet sebesar 31°C dan 29,57°C dengan temperatur lingkungan sekitar CES yang rata-ratanya sebesar 30,6°C. Berdasarkan hasil pengujian, perbedaan temperatur outlet untuk ruangan dan temperatur inlet dari ruangan rata-rata sebesar 1,43°C. Hal ini berarti kinerja dari peltier berfungsi dengan baik untuk menurunkan suhu udara dari ruangan.



Gambar 9. Grafik temperatur tanpa menggunakan PCM (03 Oktober 2021)

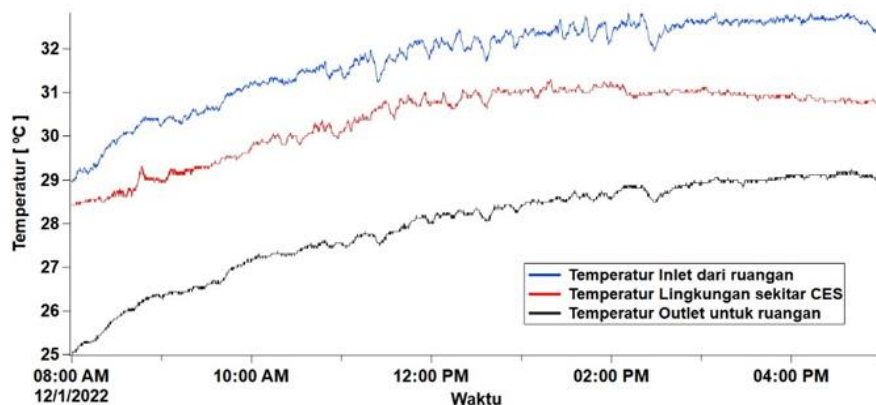
Dapat dilihat pada Gambar 9 yaitu dari pukul 08:00 hingga pukul 17:00 didapatkan temperatur rata-rata inlet dan outlet sebesar $32,36^{\circ}\text{C}$ dan $30,85^{\circ}\text{C}$ dengan temperatur lingkungan sekitar CES yang rata-ratanya sebesar 32°C . Berdasarkan hasil pengujian, perbedaan temperatur outlet untuk ruangan dan temperatur inlet dari ruangan rata-rata sebesar $1,5^{\circ}\text{C}$. Hal ini berarti kinerja dari peltier berfungsi dengan baik untuk menurunkan suhu udara dari ruangan.

Dalam pengujian mode 2, data suhu yang dianalisis menggunakan data eksperimental pada jam kerja 2 hari pada tanggal 11-12 Januari 2022 dengan menggunakan PCM. Adapun grafiknya dapat dilihat sebagai berikut:



Gambar 10. Grafik Temperatur dengan menggunakan PCM (11 Januari 2022)

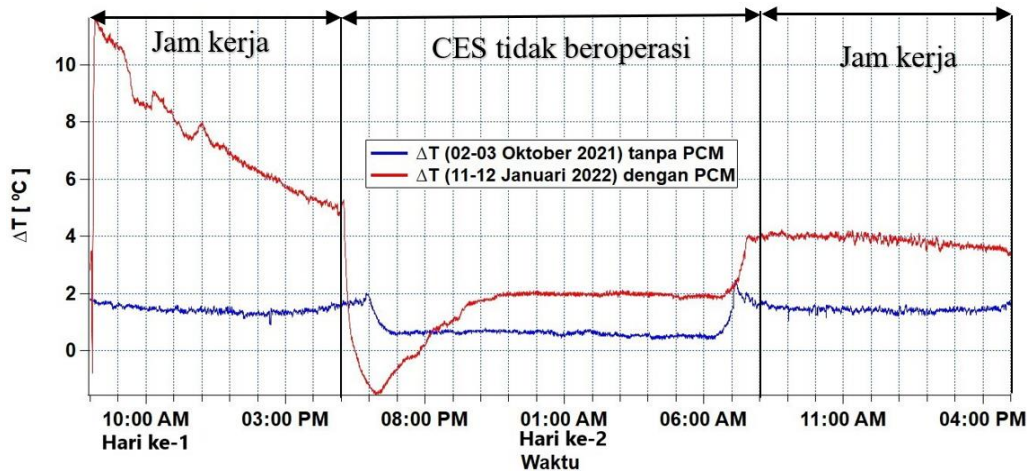
Dapat dilihat pada Gambar 10 yaitu temperatur inlet dan outlet dengan menggunakan PCM. Berdasarkan hasil pengujian, perbedaan temperatur outlet untuk ruangan dan temperatur inlet dari ruangan dapat mencapai sebesar $11,63^{\circ}\text{C}$ pada pukul 08:11. Dimana temperatur outlet dapat dipertahankan dibawah 20°C adalah selama 2,5 jam mulai dari pukul 08:05 hingga pukul 10:35. Pada pukul 17:00 perbedaan temperatur outlet untuk ruangan dan temperatur inlet dari ruangan menjadi 5°C dengan rata-rata sebesar $7,36^{\circ}\text{C}$. Dengan temperatur rata-rata inlet dan outlet sebesar $29,34^{\circ}\text{C}$ dan 22°C dengan temperatur lingkungan sekitar CES yang rata-ratanya sebesar $29,12^{\circ}\text{C}$. Hal ini berarti kinerja dari PCM bersama peltier berfungsi dengan optimal untuk menurunkan suhu udara dari ruangan.



Gambar 11. Grafik Temperatur dengan menggunakan PCM (12 Januari 2022)

Dilihat pada Gambar 11 yaitu temperatur inlet dan outlet dengan menggunakan PCM. Berdasarkan hasil pengujian, dengan menggunakan PCM yang masih tetap diletakkan di dalam kotak pada kondisi hari sebelumnya yaitu 11 Januari 2022, perbedaan temperatur outlet untuk ruangan dan temperatur inlet dari ruangan sudah menurun dengan rata-rata sebesar $3,85^{\circ}\text{C}$. Dengan temperatur rata-rata inlet dan outlet sebesar $31,77^{\circ}\text{C}$ dan $27,9^{\circ}\text{C}$ dengan temperatur lingkungan sekitar CES yang rata-ratanya sebesar $30,32^{\circ}\text{C}$. Hal ini berarti kinerja dari PCM sudah kurang mampu menyerap kalor udara pada pengujian berlangsung. Tetapi kinerja dari PCM bersama peltier masih berfungsi dengan baik untuk menurunkan suhu udara dari ruangan

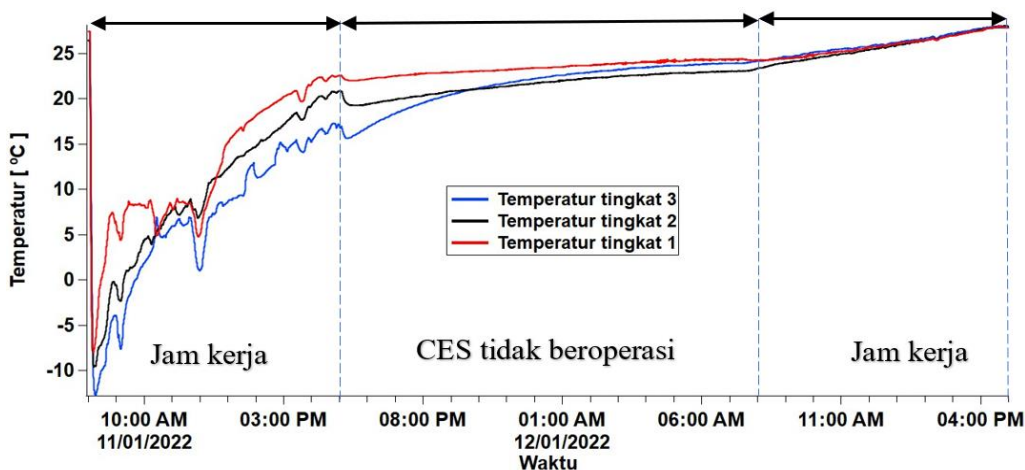
Berikut grafik perbandingan suhu udara tanpa PCM dan dengan menggunakan PCM adalah sebagai berikut:



Gambar 12. Grafik perbandingan perbedaan suhu yang dihasilkan pada masing-masing hari

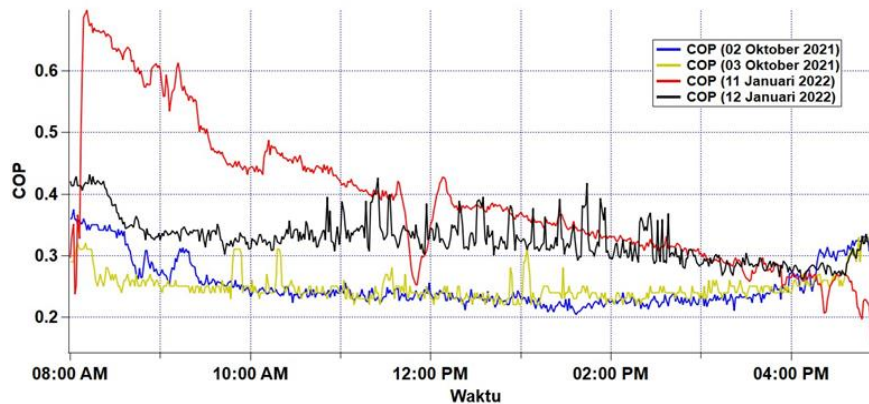
Dilihat pada Gambar 12 yaitu grafik perbandingan perbedaan suhu yang dihasilkan pada masing-masing hari. Hasil ini didapat dari perbedaan suhu (ΔT) = suhu inlet (T_{in}) – suhu outlet (T_{out}). Dapat dilihat pada jam 08:00 WIB sampai 17:00 WIB tanggal 02 Oktober 2021, perbedaan temperatur sebesar $1,43^{\circ}\text{C}$, pada saat CES tidak beroperasi perbedaan suhu kembali menurun karena peltier dan kipas tidak bekerja dikarenakan radiasi matahari pada saat itu sudah tidak ada dan hari selanjutnya pada jam 08:00 WIB sampai 17:00 WIB tanggal 03 Oktober 2021, perbedaan temperatur sebesar $1,5^{\circ}\text{C}$, dan didapat kinerja dari peltier berfungsi dengan optimal untuk mensuplai suhu dingin untuk ruangan.

Pada tanggal 11 Januari 2022 di jam 08:00 WIB sampai 17:00 WIB, perbedaan temperatur lebih tinggi, ini membuktikan bahwa dengan menambah PCM maka suhu outlet yang diberikan untuk ruangan lebih baik seiring dengan penurunan daya pendinginannya dari $11,63^{\circ}\text{C}$ sampai 5°C , pada saat CES tidak beroperasi perbedaan suhu kembali menurun, dapat terlihat pada jam 18:00 WIB perbedaan temperatur menjadi $-1,53^{\circ}\text{C}$ di titik terendahnya karena udara dingin yang dihasilkan PCM menyebar melewati sensor suhu di sekitar 2 buah bukaan inlet di kotak pendingin dan untuk hari selanjutnya pada jam 08:00 WIB sampai 17:00 WIB pada tanggal 12 Januari 2022, perbedaan temperatur menjadi kisaran 4°C - $3,5^{\circ}\text{C}$, hal ini dikarenakan PCM sudah kurang mampu menyerap kalor udara pada pengujian berlangsung. Berdasarkan hal tersebut dapat disimpulkan bahwa dengan menambah PCM, dapat menyerap panas lebih baik dan menghasilkan suhu dingin lebih baik untuk ruangan daripada hanya bergantung pada peltier saja tanpa dukungan PCM.



Gambar 13. Grafik Temperatur di daerah dekat PCM selama 2 hari

Dilihat pada gambar 13 yaitu temperatur di daerah dekat PCM. Berdasarkan hasil pengujian selama 2 hari yaitu terhitung dari jam 08:00 WIB di pagi hari pada tanggal 11 Januari 2022 sampai jam 17:00 WIB di sore hari pada tanggal 12 Januari 2022, terlihat perbedaan temperatur pada ketiga tingkatan tersebut, pada tingkat pertama dilihat dari bawah rak didapat temperatur yang lebih cepat naik dikarenakan lebih dekat terkena konveksi paksa dari kipas, sedangkan tingkat kedua lebih jauh dari kipas dan tingkat ketiga temperatur lebih lama naik karena lebih jauh terkena konveksi paksa dari kipas dari pada tingkat pertama dan kedua. Dapat terlihat temperatur tingkatan tersebut sudah kembali stabil pada jam 17:00 sore pada tanggal 12 Januari 2022, karena PCM sudah tidak mampu menyerap kalor udara pada pengujian berlangsung dengan temperatur rata-rata sebesar 28°C.



Gambar 14. Grafik perbandingan nilai COP dari masing-masing hari pada sistem CES

Dilihat pada Gambar 14 yaitu grafik perbandingan nilai COP (Coefficient Of Performance) pada masing-masing hari. Pada tanggal 02 Oktober 2021, terdapat nilai COP dengan nilai rata-rata sebesar 0,25 dan pada tanggal 03 Oktober 2021 terdapat nilai COP dengan nilai rata-rata sebesar 0,25. Pada tanggal 11 Januari 2022, terdapat nilai COP yang baik dengan nilai yang paling tinggi pada waktu 08:11 WIB yaitu sebesar 0,7 dan nilai COPnya terus menurun seiring dengan kemampuan menyerap kalor dari PCM yang sudah kurang mampu menyerap kalor, kemudian pada waktu 17:00 WIB nilai COP sudah mencapai sebesar 0,14 dengan nilai rata-rata sebesar 0,39. Pada tanggal 12 Januari 2022, terdapat nilai COP dengan nilai rata-rata sebesar 0,33 dikarenakan PCM yang dimasukkan pada hari sebelumnya sudah kurang mampu menyerap kalor dengan baik lagi. Dapat disimpulkan dengan menambah PCM ke dalam sistem cold energy storage, dapat menghasilkan nilai COP yang lebih baik ketimbang tidak menggunakan PCM.

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini, pengujian telah dilakukan untuk mengevaluasi kinerja sistem pendingin CES secara komparatif melalui pengujian mode 1 (tanpa PCM) dan pengujian mode 2 (dengan PCM). Beberapa kesimpulan bisa didapatkan dari hasil pengujian tersebut:

- Pada pengujian CES tanpa PCM, di hari pertama dan kedua memiliki perbedaan temperatur outlet untuk ruangan dan temperatur inlet dari ruangan yang hampir sama dengan rata-rata sebesar 1,43°C dan 1,5°C. Sedangkan CES dengan PCM pada hari pertama, memiliki perbedaan sebesar 11,63°C pada pukul 08:11 WIB dimana temperatur outletnya dapat dipertahankan dibawah 20°C selama 2,5 jam mulai dari pukul 08:05 WIB hingga pukul 10:35 WIB dan pada pukul 17:00 WIB perbedaannya sudah menjadi 5°C dengan rata-rata sebesar 7,36°C. Di hari kedua, perbedaan temperatur sudah menurun dengan rata-rata sebesar 3,85°C.
- Berdasarkan hasil pengujian mode 2 didapatkan bahwa PCM dapat digunakan selama 33 jam sebelum akhirnya mencapai suhu rata-rata 28°C.
- Nilai COP CES tanpa PCM di hari pertama dan kedua dengan nilai rata-rata sebesar 0,25. Sedangkan nilai COP CES dengan PCM di hari pertama, dengan nilai kisaran sebesar 0,14-0,7 dengan nilai rata-rata sebesar 0,39. Untuk nilai COP di hari kedua, dengan nilai rata-rata sebesar 0,33.

NOMENKLATUR

A	Luas permukaan bidang (m ²)
K	Konduktivitas termal (W/m.K)
V	Kecepatan udara (m/s)
M	Massa bahan (kg)
V	Tegangan (Volt)
I	Arus (Amps)
P	Daya (W)

T	Temperatur (°C)
Q	Kapasitas (W)
\dot{m}	Laju aliran massa (kg/s)
C	Kapasitas panas udara (J/kg.K)

SUBSCRIPTS

S	Permukaan
in,udara	Masuk dari aliran udara
out,udara	Keluar dari aliran udara
C	Pendinginan
∞	Lingkungan

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Pigliautile, I., Chàfer, M., Pisello, A. L., Pérez, G., & Cabeza, L. F. (2020). Inter-building assessment of urban heat island mitigation strategies: Field tests and numerical modelling in a simplified-geometry experimental set-up. *Renewable Energy*, 147, 1663–1675.
- [2]. Souayfane, F., Fardoun, F., & Biwale, P. H. (2016). Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. In *Energy and Buildings* (Vol. 129, pp. 396–431).
- [3]. Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2016a). Solar Heating and Cooling Systems: Fundamentals, Experiments and Applications. *Solar Heating and Cooling Systems: Fundamentals, Experiments and Applications*, 1–424.
- [4]. Kenisarin, M. and Mahkamov, K., 2016. Salt hydrates as latent heat storage materials: Thermophysical properties and costs. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 145, pp.255-286.
- [5]. Rasta, I.M. and Suamir, I.N., 2018. The role of vegetable oil in water based phase change materials for medium temperature refrigeration. *Journal of Energy Storage*, 15, pp.368-378
- [6]. Gholamibozanjani, G., & Farid, M. (2020). Application of an active PCM storage system into a building for heating/cooling load reduction. *Energy*, 210.
- [7]. Kozak, Y., Abramzon, B., & Ziskind, G. (2013). Experimental and numerical investigation of a hybrid PCM-air heat sink. *Applied Thermal Engineering*, 59(1–2), 142–152.
- [8]. Chiu, J. N. W., Gravoille, P., & Martin, V. (2013). Active free cooling optimization with thermal energy storage in Stockholm. *Applied Energy*, 109, 523–529.
- [9]. Zhao, D., & Tan, G. (2014). Experimental evaluation of a prototype thermoelectric system integrated with PCM (phase change material) for space cooling. *Energy*, 68, 658–666.
- [10]. Leonardo, H., Samar, & Ambarita, H. (2021). Simulation of Cold - Energy Storage Distribution Temperature Using Phase - Change Material. 01, 28–31.