

UJI EKSPERIMENTAL PENDINGIN TERMoeLEKTRIK TENAGA SURYA DENGAN SIKULASI AIR PADA HEATSINK SISI PANAS

Nyoman Sugiarta^{1*)}, I Made Hoki Riadi²⁾, Ida Bagus Gde Widiantra³⁾, I Made Sugina⁴⁾, I Dewa Gede Agus Tri Putra⁵⁾

^{1),2),3),4),5)}Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bali

E-mail : sugiarta@pnb.ac.id

Abstrak

Energi surya sebagai sumber daya terbarukan semakin menjadi fokus dalam upaya menuju sistem energi yang berkelanjutan. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) memberikan solusi yang populer untuk menghasilkan listrik dari sinar matahari. Pendingin termoelektrik dan PLTS terintegrasi adalah pendekatan inovatif dalam memanfaatkan energi surya untuk aplikasi pendinginan yang ramah lingkungan. Pada penelitian ini perangkat sistem pendingin termoelektrik tenaga surya sudah dibuat dan diuji eksperimental dengan tujuan untuk menentukan performansi sistem pendingin. Sistem pendingin termoelektrik menggunakan satu buah modul termoelektrik TEC-12706, *heatsink* aluminium bersirip dengan kipas pada sisi dingin dan *water block heatsink* pada sisi panas dengan sirkulasi air. Kotak pendingin memiliki kapasitas 10 L. Sistem PLTS terdiri dari satu buah panel surya 120 W_p dan satu buah baterai 12 V/24 Ah. Tes performansi dilakukan di tempat terbuka untuk menentukan kapasitas pendinginan, konsumsi daya listrik dan COP sistem. Hasil pengujian menunjukkan bahwa pendingin termoelektrik mampu menghasilkan kapasitas pendinginan 7.26 W, konsumsi daya listrik rata-rata 49.4 W dan COP 0.147 dengan penurunan temperatur air dari 27.6 °C sampai 19.3 °C.

Kata Kunci: Pendingin termoelektrik, PLTS, Modul TEC-12706, Sirkulasi air, *Water block heatsink*.

Abstrak

Solar energy as a renewable resource increasingly becomes a focus in efforts towards a sustainable energy system. Solar photovoltaic (PV) plants provide a popular solution for generating electricity from sunlight. Integrated thermoelectric cooler and solar PV plant is an innovative approach to harnessing solar energy for environmentally friendly cooling applications. In this research, a solar-powered thermoelectric cooling system device was built and experimentally tested to determine the cooling system's performance. The thermoelectric cooling system uses one TEC-12706 thermoelectric module, a finned aluminium heatsink with a fan on the cold side and a water block heatsink on the hot side with water circulation. The cooler box has a capacity of 10 L. The PV system comprises one 120 W_p solar panel and one 12 V/24 Ah battery. Performance tests were conducted in an open area to determine cooling capacity, electrical power consumption and system COP. The test results show that the thermoelectric cooler can produce a cooling capacity of 7.26 W, an average electric power consumption of 49.4 W and a COP of 0.147 with a decrease in water temperature from 27.6 °C to 19.3 °C.

Keywords: thermoelectric cooler, PV plant, TEC-12706 module, water circulation, water block heatsink

PENDAHULUAN

Integrasi pendingin termoelektrik dengan sumber listrik dari PLTS dapat menciptakan sistem energi yang efisien dan berkelanjutan. Pemanfaatan energi surya memberikan solusi sistem pendinginan ramah lingkungan dengan membantu mengurangi ketergantungan pada sumber energi non-terbarukan dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Penerapan sistem pendingin ini mempertimbangkan beberapa

faktor, seperti kondisi cuaca setempat, kapasitas PLTS, karakteristik modul termoelektrik dan kebutuhan kapasitas beban pendinginan untuk mendapatkan performansi sistem yang aktual dan optimal.

Modul termoelektrik memiliki dua permukaan yaitu sisi dingin dan sisi panas dengan unit pembuang panas *heatsink* berpendingin udara dengan atau tanpa kipas [1]-

[3] atau *heatsink* dengan pendinginan sirkulasi air (*water-cooling block*) [4]-[6]. Beda temperatur antara kedua sisi modul dapat terjadi berdasarkan efek Peltier yang berasal dari tegangan dan arus DC yang diberikan [7]. Daya *output* DC dari sistem PLTS lebih efisien dipakai sebagai sumber daya utama untuk pendingin termoelektrik karena bisa langsung diintegrasikan. Daya *output* panel surya secara teoritis dan eksperimental dipengaruhi oleh besarnya intensitas radiasi matahari, temperatur dan kelembaban relatif udara lingkungan. Dengan meningkatnya intensitas radiasi matahari maka daya *output* panel surya juga meningkat. Namun peningkatan intensitas radiasi matahari menyebabkan temperatur permukaan panel surya meningkat dan berdampak pada menurunnya daya *output* [8].

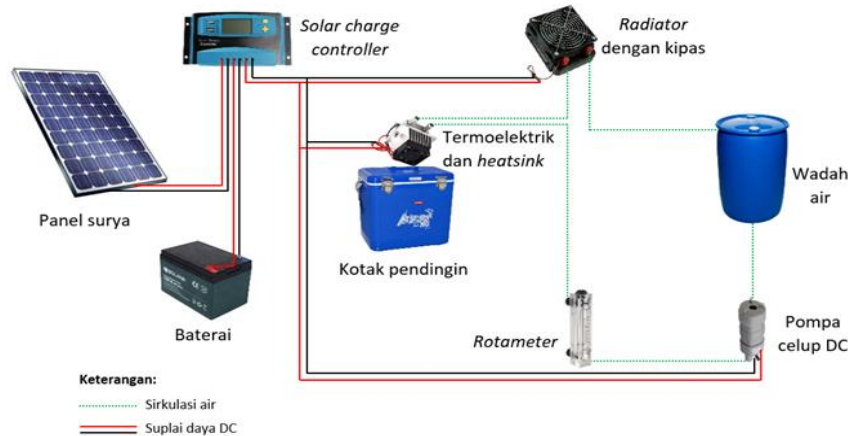
Para peneliti terdahulu melaporkan studi eksperimental pendingin termoelektrik dengan tenaga surya. Pendingin termoelektrik berbasis empat buah modul TEC-12706, *heatsink* sisi panas berpendingin udara dengan kipas dan PLTS kapasitas $2 \times 100 \text{ W}_p$ diuji di kota Medan diperoleh temperatur air menurun dari 26°C ke 15°C dalam 40 menit dan COP 0.359 [9]. Uji coba pada refrigerator termoelektrik *portable* energi surya menghasilkan penurunan temperatur pendingin dari 27°C ke 5°C dalam waktu 44 menit dan COP sistem 0.16 [10]. Penelitian lain untuk kondisi temperatur ruang pendingin 10°C dan ruang panas 40°C memberikan COP pendinginan 0.61 [11].

Penelitian ini menyajikan tentang pengujian eksperimental alat pendingin termoelektrik yang digerakkan oleh sistem PLTS dengan fokus pada penggunaan sistem sirkulasi air pada bagian *heatsink* sisi panas dari modul

termoelektrik (*water block heatsink*). Hal ini mengingat bahwa air memiliki kelebihan karakteristik termal yaitu mampu memindahkan panas lebih baik dibandingkan dengan pendinginan menggunakan aliran udara. Di samping itu performansi aktual sistem pendingin secara spesifik tergantung pada lokasi sistem ditempatkan sehingga tujuan utama penelitian ini adalah untuk menentukan performansi sistem berdasarkan kondisi iklim lokal di Bali.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menerapkan metode pengujian eksperimental dan analisis performansi alat pendingin termoelektrik yang dioperasikan dengan suplai daya dari sistem PLTS *off-grid*. Gambar 1 menunjukkan skema sistem pendingin termoelektrik yang terintegrasi PLTS. Sub sistem PLTS terdiri dari komponen utama: panel surya, *solar charge controller* (SCC) dan baterai. Sedangkan sub sistem pendingin termoelektrik tersusun atas kotak pendingin (terpasang modul termoelektrik dan *heatsink*) dan sistem sirkulasi air (*radiator* dengan kipas, pompa celup DC, wadah air dan *rotameter*). Pendingin termoelektrik dilengkapi dengan dua buah *heatsink* yang menempel pada permukaan sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik, yaitu jenis *water block* pada sisi panas dan jenis paduan aluminium bersirip dengan kipas pada sisi dingin. Suplai daya untuk pendingin termoelektrik berasal dari pengkabelan terminal *load* DC pada SCC. Air bersirkulasi dengan bantuan pompa melalui *water block heatsink* yang berada di luar kotak pendingin untuk membuang panas yang dilepaskan dari sisi panas modul termoelektrik. Dengan demikian efek pendinginan dapat berlangsung akibat penyerapan panas pada sisi dingin modul termoelektrik yang berada di dalam kotak pendingin.



Gambar 1. Skema sistem pendingin termoelektrik tenaga surya

Gambar 2 menunjukkan foto fasilitas perangkat uji eksperimental alat pendingin termoelektrik tenaga surya yang berlokasi di kampus Politeknik Negeri Bali. Sub sistem PLTS memiliki spesifikasi komponen, yaitu satu buah panel surya polikristalin Sunworth Solar (model SW120P) kapasitas 120 W_p (tegangan *open circuit* 21.8 V dan arus hubung singkat 7.21 A), satu buah SCC PWM kapasitas 30A (12/24V) dan satu buah baterai VRLA (FULLRIVER, *rating* 12V/24Ah/20HR). Sedangkan untuk sub sistem pendingin termoelektrik menggunakan satu buah modul termoelektrik TEC-12706 (12V, 6A), satu buah *heatsink* sisi dingin (paduan aluminium 9 sirip, kipas DC *brushless*, 0.12 A), satu buah *heatsink* sisi panas jenis *water block* berbahan paduan aluminium, satu buah *radiator* (bahan paduan aluminium, ukuran 8 x 10 x 2.5 cm, kipas DC *brushless* 0.25A), satu buah kotak pendingin Marina cooler 12S (kapasitas 10 L, dimensi 32.5 x 22.5 x 28.5 cm), satu buah pompa celup DC model JT-500 (12V, 600 L/h, *head* 5 m).



Gambar 2. Foto perangkat uji eksperimental

Data pengujian meliputi hasil pengukuran beberapa parameter, yaitu kondisi cuaca (intensitas radiasi matahari, temperatur dan kelembaban relatif udara), kelistrikan DC (tegangan dan kuat arus) PLTS dan pendingin termoelektrik (modul termoelektrik, kipas sisi dingin, kipas radiator dan pompa celup) serta temperatur di dalam kotak pendingin termasuk temperatur air sebagai beban pendinginan. Intensitas radiasi matahari diukur menggunakan *solar power meter* digital (model SM206). *Thermo-hygrometer* digital (model HTC-2) digunakan untuk mengukur temperatur dan kelembaban relatif udara lingkungan. Data parameter kelistrikan pada PLTS diperoleh berdasarkan pembacaan pada display SCC (*output* panel surya, baterai dan *load* DC), sedangkan pada pendingin termoelektrik berdasarkan tampilan *volt-ampere meter* digital (3 buah, masing-masing untuk modul termoelektrik dengan kipas sisi dingin, kipas *radiator* dan pompa celup). Termometer NTC digital (2 buah, masing-masing *2-channel*) digunakan untuk mengukur temperatur di dalam kotak pendingin dengan posisi penempatan *probe* sensor termokopel ditunjukkan pada Gambar 3. Beban air ditaruh dalam enam buah botol plastik dengan volume total 2 L. Debit air mengalir dipertahankan konstan sebesar 2.5 L/menit berdasarkan pembacaan *rotameter*. Sudut kemiringan panel adalah 10°. Pengambilan data dilakukan secara manual setiap 10 menit sekali mulai pukul 08:00 sampai dengan 17:00 WITA.

$$COP = \frac{Q_{air}}{P_e} \quad (3)$$



Gambar 3. Posisi penempatan sensor termokopel di dalam kotak pendingin

Indikator performansi alat pendingin termoelektrik tenaga surya dinyatakan dalam nilai COP. COP merupakan rasio antara kapasitas pendinginan (Q_{air} , satuan: J) dan konsumsi daya listrik (P_e , satuan: W). Sementara V dan I adalah *input* tegangan (satuan: V) dan kuat arus (satuan: A) pada pendingin termoelektrik yang berasal dari PLTS. Sedangkan Δt adalah lama waktu proses pendinginan (satuan: detik).

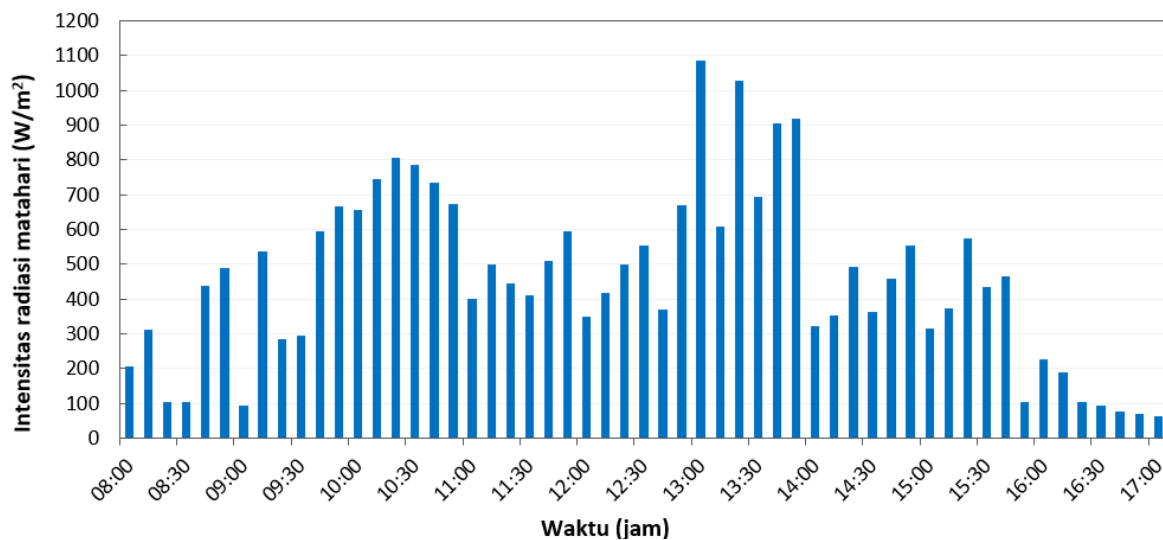
$$Q_{air} = m_{air} C_{p,air} (T_{air,awal} - T_{air,akhir}) / \Delta t \quad (1)$$

$$P_e = VI \quad (2)$$

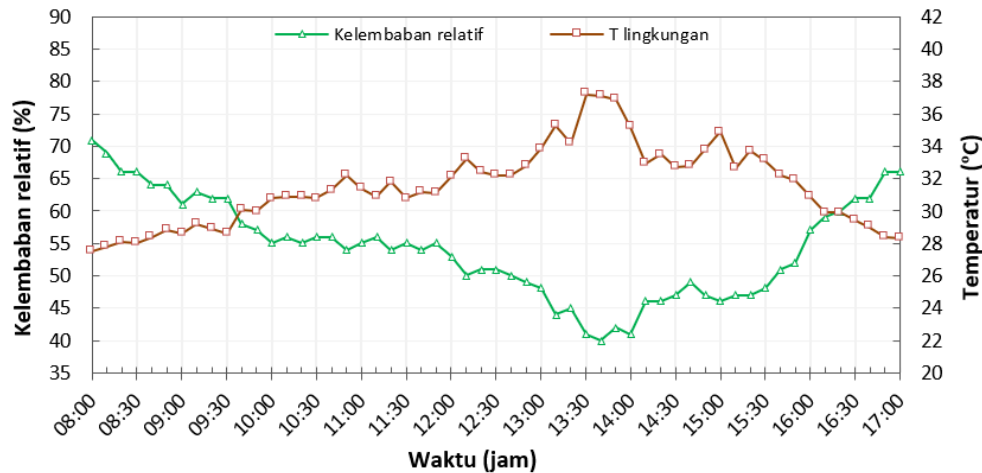
HASIL DAN PEMBAHASAN

Selama pengujian di tempat terbuka dengan paparan sinar matahari secara langsung, pemantauan parameter kondisi cuaca memegang peranan penting dalam memahami performansi perangkat PLTS dan pendingin termoelektrik. Variabilitas cuaca setempat yang tinggi dan fluktuatif sepanjang hari dapat mempengaruhi kemampuan adaptasi dari perangkat dalam proses konversi energi.

Gambar 4 menunjukkan distribusi intensitas radiasi matahari selama sembilan jam pengujian dengan nilai rata-rata sebesar 457 W/m^2 pada kondisi awan relatif cerah. Intensitas radiasi matahari antara $920\text{-}1086 \text{ W/m}^2$ terjadi pukul 13:00-14:00 WITA. Kondisi intensitas radiasi matahari ini memungkinkan panel surya mengkonversinya menjadi daya listrik lebih intensif untuk selanjutnya disimpan pada baterai ataupun secara bersamaan digunakan menghidupkan pendingin termoelektrik. Secara kumulatif energi radiasi matahari yang diterima oleh panel surya selama pengujian adalah 4.163 kWh/m^2 .



Gambar 4. Distribusi intensitas radiasi matahari

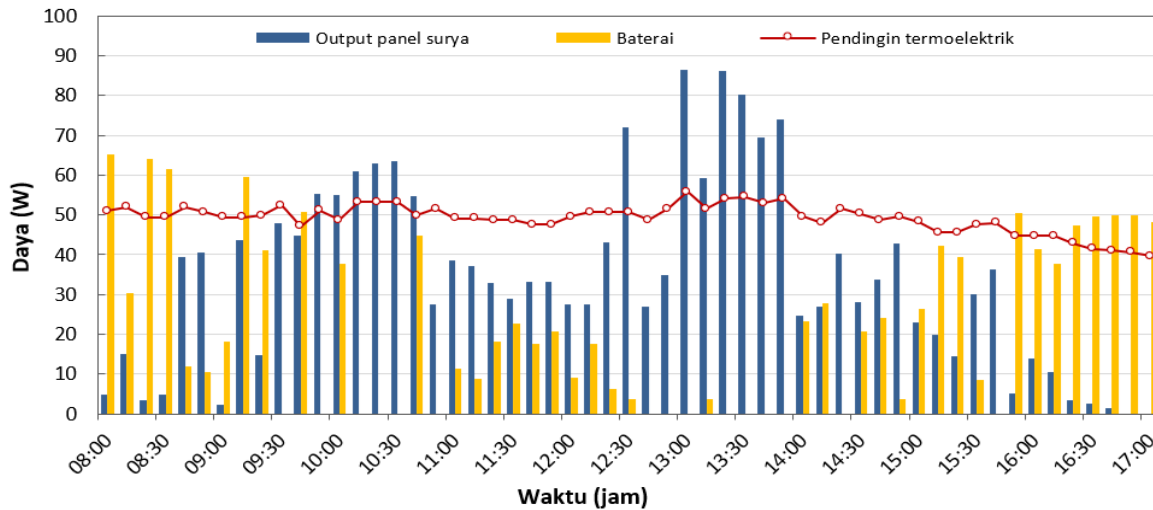


Gambar 5. Fluktuasi temperatur dan kelembaban relatif udara lingkungan

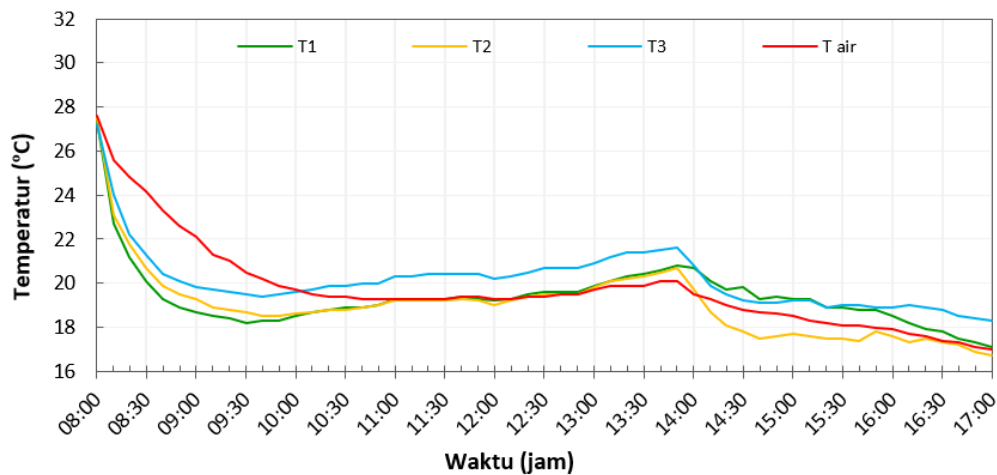
Gambar 5 menunjukkan grafik hasil pengukuran parameter temperatur dan kelembaban relatif udara lingkungan. Dari gambar dapat dilihat bahwa temperatur udara berfluktuasi antara 27.5 - 37.2 °C dengan nilai rata-rata 31.5 °C sedangkan kelembaban relatif bervariasi antara 40-71% dengan nilai rata-rata 54%. Temperatur udara maksimum sekitar 37.2 °C dan kelembaban relatif minimum 40% terjadi sekitar pukul 13:30-13:40 WITA. Tren perubahan temperatur udara lingkungan terpantau mengikuti secara proporsional perubahan intensitas radiasi matahari. Sementara kelembaban relatif menurun dengan meningkatnya temperatur udara dan begitu juga sebaliknya.

Perbandingan daya yang dihasilkan oleh panel surya, daya baterai dan daya yang dikonsumsi oleh pendingin termoelektrik ditampilkan pada Gambar 6. Profil daya pada gambar tersebut memberikan gambaran bagaimana kemampuan PLTS yang dilengkapi sistem penyimpanan energi baterai mampu mengubah energi surya menjadi daya listrik untuk pendinginan. Hasil pengujian dalam

penelitian ini mengkonfirmasi bahwa daya *output* panel surya sebesar 80.4-86.4 W terjadi ketika puncak intensitas radiasi matahari terjadi antara pukul 13:00-14:00 WITA dan pada saat itu temperatur udara lingkungan mencapai nilai relatif tinggi. Daya untuk menggerakkan pendingin termoelektrik ketika awal beroperasi (pukul 08:00-08:30 WITA) mayoritas disuplai dari daya yang tersimpan pada baterai sebesar 61.5-65 W. Ini disebabkan karena daya *output* panel surya masih belum mencukupi, yaitu 3.5-14.9 W sedangkan pendingin termoelektrik mengkonsumsi daya mencapai 49.5-51 W. Daya *output* panel surya hampir seluruhnya digunakan untuk pendingin termoelektrik, yaitu sekitar pukul 10:20-10:30 WITA dan 12:40-13:50 WITA karena kemungkinan pada periode waktu tersebut baterai sudah penuh. Sementara suplai daya pendingin termoelektrik berangsur-angsur didominasi dari baterai mulai pukul 15:50 WITA seiring dengan menurunnya daya *output* panel surya, hingga seluruhnya dari baterai terjadi antara pukul 16:50-17:00 WITA.



Gambar 6. Profil daya *output* panel surya, daya baterai dan daya pendingin termoelektrik



Gambar 7. Variasi temperatur di dalam kotak pendingin

Gambar 7 menunjukkan perubahan temperatur di dalam kotak pendingin yang terdiri dari temperatur udara di dalam ruangan dan temperatur air sebagai beban pendinginan terhadap waktu. Temperatur T_1 , T_2 , T_3 dan T_{air} masing-masing mewakili temperatur udara yang berada dekat dengan *heatsink* sisi dingin, temperatur udara di tengah-tengah kotak pendingin, temperatur udara dekat dinding bawah kotak pendingin dan temperatur air. Dari gambar terlihat bahwa penurunan temperatur T_1 , T_2 , dan T_3 adalah 9.2 °C, 8.8 °C dan 7.7 °C dari kondisi awal masing-masing 27.4 °C, 27.5 °C dan 27.2 °C selama 90 menit pertama pendingin termoelektrik beroperasi (pada pukul 10:30 WITA). Selisih temperatur udara 0.4-1.5 °C pada ketiga posisi (T_1 , T_2 dan T_3)

mengindikasikan bahwa kipas pada *heatsink* sisi dingin membantu mendistribusikan udara dingin lebih merata di dalam kotak pendingin. Sementara itu temperatur air menurun sebesar 7.1 °C dari kondisi awalnya, yaitu 27.6 °C. Selanjutnya temperatur udara dan air mengalami kenaikan secara perlahan mencapai maksimum pada pukul 13:50 WITA dengan kenaikan terbesar pada T_3 sebesar 21.6 °C dan terendah pada T_{air} yaitu 20.1 °C. Setelah itu temperatur udara dan air mulai menurun perlahan sampai dengan akhir pengujian (pukul 17:00 WITA) dan mencapai temperatur terendah sebesar 17.1 °C, 16.7 °C, 18.3 °C dan 17 °C, masing-masing untuk T_1 , T_2 , T_3 dan T_{air} . Hal ini kemungkinan disebabkan karena perubahan temperatur udara lingkungan

secara signifikan mempengaruhi efek pendinginan yang terjadi di dalam kotak pendingin.

COP pendingin termoelektrik dihitung berdasarkan pada volume beban air 2 L ($c_{p, \text{air}} = 4.2$ kJ/kgK) dengan penurunan temperatur dari 27.6 °C ke 19.3 °C dalam waktu 140 menit (pukul 10:40 WITA), yaitu sebelum terjadinya fluktuasi temperatur hingga pukul 17:00 WITA. Kapasitas pendinginan diperoleh sebesar 7.26 W, sedangkan konsumsi daya listrik rata-rata pendingin termoelektrik dari PLTS adalah 49.4 W sehingga memberikan nilai COP sebesar 0.147.

KESIMPULAN

Dalam penelitian ini sudah dilakukan pembuatan dan pengujian perangkat sistem pendingin termoelektrik tenaga surya. Performansi perangkat sangat tergantung pada intensitas radiasi matahari dan temperatur udara lingkungan. Pendingin termoelektrik mampu menurunkan temperatur air di dalam kotak pendingin sebesar 10.6 °C dalam sembilan jam pada kondisi temperatur lingkungan 27.5 -37.2 °C. COP pendinginan adalah 0.147. Nilai COP ini masih rendah. Pemilihan modul termoelektrik yang orisinal dan *water-block* berbahan tembaga perlu menjadi pertimbangan terkait efektifitas perpindahan panas. Untuk pengembangan selanjutnya, penerapan sistem kontrol dan manajemen energi secara otomatis pada perangkat pendingin termoelektrik tenaga surya diharapkan dapat membantu lebih mengoptimalkan performansi sistem.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menghaturkan terima kasih yang tak terhingga kepada institusi Politeknik Negeri Bali atas dukungan pendanaan sehingga penelitian ini dapat dipublikasikan pada jurnal nasional.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Jugsujinda, A. Vora-Ud, T. Seetawan. Analyzing of Thermoelectric Refrigerator Performance. *Procedia Eng.* 8:154-159. 2011.
- [2] L. Nulhbateraim. Uji Unjuk Kerja Pendingin Ruangan Berbasis Thermoelectric Cooling. *Simetris J. Tek. Industri, Mesin, Elektro dan Ilmu Komputer* 8(1): 85-90. 2017.
- [3] A. K. Mainil, A. Aziz, M. Akmal. Portable Thermoelectric Cooler Box Performance with Variation of Input Power and Cooling Load. *Aceh Int. J. Sci. Technol.* 7(2): 85-92. 2018.
- [4] G. Tan, D. Zhao. Study of a thermoelectric space cooling system integrated with phase change material. *Appl. Therm. Eng.* 86: 187-198. 2015.
- [5] Mirmanto, I. B. Alit, I. M. A. Sayoga, R. Sutanto, Nurchayati, A. Mulyanto. Experimental cooler box performance using two different heat removal units: A heat sink fin-fan, and a double fan heat pipe. *Front. Heat Mass Transf.* 10: 1-7. 2018.
- [6] T. Ismael, S. B. Yun, F. Ulugbek. Radiator Heat Dissipation Performance. *J. Electron. Cool. Therm. Control* 6(2): 88-96. 2016.
- [7] A. Kherkhar, Y. Chiba, A. Tlemçani, H. Mamur. Thermal investigation of a thermoelectric cooler based on Arduino and PID control approach. *Case Stud. Therm. Eng.* 36. 2022.
- [8] N. C. Park, W. W. Oh, D. H. Kim. Effect of temperature and humidity on the degradation rate of multicrystalline silicon photovoltaic module. *Int. J. Photoenergy* (2013):1-9. 2013.
- [9] T. B. Sitorus, Z. Lubis, F. Ariani, F. Sembiring. Study on Thermoelectric Cooler Driven by Solar Energy in Medan City. *EMITTER International Journal of Engineering Technology* 6(2): 317-327. 2018.
- [10] S.A. Abdul-Wahab, A. Elkamel, A.M. Al-Damkhi, A. Is'haq, H.S. Al-Rubai'ey, A.K. Al-Battashi, A.R. Al-Tamimi, K.H. Al-Mamari, M.U. Chutani. Design and experimental investigation of portable solar thermoelectric refrigerator. *Renew. Energy* 34(1):30-34. 2009.
- [11] S. M. A. Rahman, A. A. Hachicha, C. Ghenai, R. Saidur, Z. Said. Performance and life cycle analysis of a novel portable solar thermoelectric refrigerator. *Case Stud. Therm. Eng.* 19: 100599. 2020.