pISSN : 0852-0232, eISSN : 2656-582X DOI : 10.14710/gt.v23i2.xxxxx

RANCANG BANGUN THERMAL ENERGY STORAGE SEBAGAI PENYIMPANAN ENERGI BERBASIS SOLAR PANEL

Gilar Wirayudha[1)], Fakhruddin Mangkusasmito [2)]

[1)]Program Studi Str. Teknik Listrik Industri, Sekolah Vokasi, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275
**E-mail : fakhm17@gmail.com*

ABSTRACT

The intermittent nature of solar energy causes photovoltaic power output to fluctuate with solar irradiance, requiring an energy storage system to maintain energy availability when panel output decreases. This study designs, constructs, and evaluates a silica-sand-based Thermal Energy Storage prototype powered directly by photovoltaic panels. The prototype uses 57 kg of silica sand with a particle size of 30–50 mesh as a sensible heat storage medium. The final configuration employs two 545 Wp photovoltaic panels connected in series, two series-connected resistive heaters rated at 42 V and 500 W each, two K-type thermocouples, and rockwool-aluminum foil insulation. An ESP32 and Arduino Nano monitoring system records sand temperature, voltage, current, power, and estimated solar irradiance to a spreadsheet. Three configurations were evaluated. The highest temperature increased from 103.63°C in the first configuration to 195.13°C in the second and 230.13°C in the third. Complete insulation enabled the system to retain an average temperature of 100.09°C after approximately 16 h of cooling, with an average cooling rate of 5.84°C/h. For the analyzed charging period, 4,099 Wh of electrical energy produced 1,703.49 Wh of stored thermal energy, corresponding to a thermal storage efficiency of 41.56%. The results show that increasing the number of panels and heaters, combined with comprehensive insulation, improves heating and heat-retention performance.

Keywords: *silica sand, solar energy, sand battery, thermal energy storage, storage efficiency.*

PENDAHULUAN

Kebutuhan energi terus meningkat, sedangkan pemanfaatan energi fosil berkaitan dengan keterbatasan cadangan dan emisi gas rumah kaca. Energi surya menjadi salah satu alternatif yang potensial di Indonesia karena tersedia sepanjang tahun. Energi tersebut dapat dikonversi menjadi listrik menggunakan panel fotovoltaik, tetapi keluarannya berubah terhadap waktu, tutupan awan, temperatur modul, dan kondisi lingkungan [1]–[4].

Ketidaksesuaian antara waktu produksi dan pemanfaatan energi mendorong penggunaan teknologi penyimpanan. Untuk aplikasi yang tujuan akhirnya berupa panas, penyimpanan langsung dalam bentuk energi termal dapat mengurangi tahapan konversi dibandingkan penyimpanan elektrokimia. Thermal Energy Storage (TES) memungkinkan panas disimpan ketika energi tersedia dan dimanfaatkan kembali ketika sumber menurun [1], [5], [6].

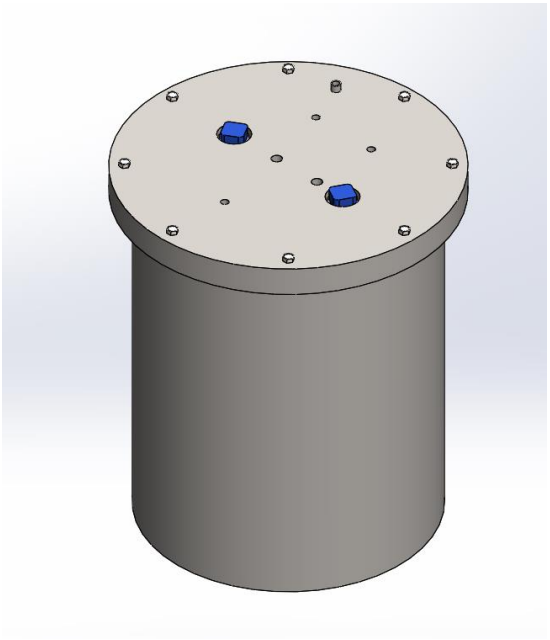
Pasir silika berpotensi digunakan sebagai media penyimpanan panas sensibel karena tersedia relatif melimpah, tidak mudah terbakar, stabil pada temperatur tinggi, dan dapat digunakan berulang kali. Energi disimpan melalui peningkatan temperatur tanpa perubahan fase. Besarnya energi yang tersimpan dipengaruhi oleh massa, kapasitas panas spesifik, dan perubahan temperatur [7]–[9].

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa ukuran partikel dan luas permukaan penghantar panas memengaruhi waktu pengisian dan pelepasan panas. Integrasi panel fotovoltaik, elemen pemanas resistif, dan media pasir juga telah menunjukkan bahwa energi listrik dapat dikonversi langsung menjadi panas [9]–[12]. Penelitian ini berfokus pada prototipe skala laboratorium tanpa baterai elektrokimia dan tanpa MPPT, dengan evaluasi bertahap terhadap jumlah panel, jumlah elemen pemanas, serta susunan isolasi.

METODE PENELITIAN

PERANCANGAN SISTEM

Prototipe menggunakan konstruksi tabung berlapis. Tabung dalam menampung pasir silika, elemen pemanas, coil tembaga, dan dua thermocouple tipe K. Tabung luar melindungi rockwool dan aluminium foil. Pasir silika yang digunakan sebanyak 57 kg dengan ukuran partikel 30–50 mesh. Dua panel LONGi LR5-72HBD-545M dihubungkan seri sehingga tegangan nominal pada titik daya maksimum mencapai 83,60 V. Dua elemen pemanas 42 V, 500 W juga dihubungkan seri sehingga tegangan nominal gabungan sebesar 84 V dan daya total 1.000 W [13].



Gambar 1. Rancangan tabung penyimpanan dan penempatan komponen

Temperatur pasir diukur pada dua titik menggunakan thermocouple tipe K dan modul MAX6675. ESP32 membaca sensor temperatur dan INA219, sedangkan Arduino Nano membaca sensor tegangan dan ACS712. Data dikirimkan melalui jaringan Wi-Fi ke spreadsheet dengan interval lima menit. Temperatur rata-rata dihitung dari dua titik pengukuran.

KONFIGURASI PENGUJIAN

Konfigurasi	Panel dan Heater	Kondisi Isolasi
1	1 panel, 1 heater	Gasket dan rockwool pada penutup
2	2 panel, 2 heater	Rockwool dan aluminium foil pada sisi tabung; penutup belum menyeluruh
3	2 panel, 2 heater	Rockwool dan aluminium foil pada seluruh sisi termasuk penutup

Pengujian pertama dilaksanakan pada 6–8 Juli 2026, pengujian kedua pada 15–18 Juli 2026, dan pengujian ketiga pada 31 Juli–3 Agustus 2026. Setelah daya elemen pemanas menurun mendekati nol, pencatatan temperatur dilanjutkan untuk mengevaluasi kemampuan retensi panas.

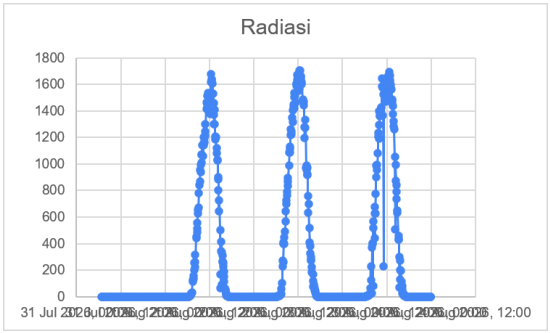
METODE ANALISIS

Energi termal yang tersimpan pada pasir dihitung menggunakan $Q = m\ cp\ \Delta T$, dengan m sebagai massa pasir, cp sebagai kapasitas panas spesifik, dan ΔT sebagai kenaikan temperatur. Energi listrik diperoleh dari akumulasi daya terhadap waktu. Efisiensi penyimpanan dihitung dengan membandingkan energi termal pasir terhadap energi listrik masukan. Laju pendinginan rata-rata dihitung dari penurunan temperatur dibagi durasi pendinginan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

KELUARAN PANEL SURYA

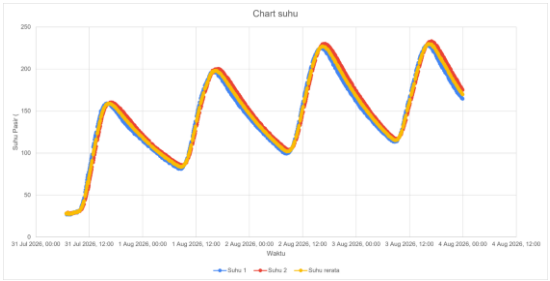
Pada kondisi operasi yang relatif stabil selama 1–3 Agustus 2026, daya maksimum harian meningkat dari 658,20 W menjadi 672,53 W dan 683,31 W. Nilai 683,31 W setara dengan 62,69% kapasitas nominal gabungan panel sebesar 1.090 Wp. Rasio tersebut bukan efisiensi panel, tetapi perbandingan daya operasi lapangan terhadap kapasitas nominal pada kondisi STC.



Gambar 2. Pola estimasi radiasi matahari selama pengujian

Perubahan daya panel menunjukkan kecenderungan yang searah dengan perubahan radiasi matahari. Namun, daya maksimum tidak selalu terjadi bersamaan dengan radiasi maksimum karena keluaran panel turut dipengaruhi oleh temperatur modul, karakteristik resistansi beban, kondisi sambungan, dan tidak digunakannya MPPT.

KENAIKAN TEMPERATUR PASIR



Gambar 3. Perubahan temperatur pasir pada konfigurasi ketiga

Konfigurasi pertama mencapai temperatur tertinggi 103,63°C. Setelah penambahan jumlah panel dan elemen pemanas, konfigurasi kedua

mencapai 195,13°C. Konfigurasi ketiga dengan isolasi menyeluruh mencapai temperatur tertinggi 230,13°C. Peningkatan terbesar terjadi dari konfigurasi pertama ke konfigurasi kedua karena kapasitas sumber dan pemanas bertambah. Setelah jumlah panel dan heater sama, penambahan isolasi pada penutup membantu sistem mencapai temperatur lebih tinggi dan mempertahankan panas lebih lama.

Parameter	Konfigurasi 1	Konfigurasi 2	Konfigurasi 3
Temperatur tertinggi	103,63°C	195,13°C	230,13°C
Temperatur pagi rata-rata	41,88°C	84,29°C	100,09°C
Laju pendinginan	3,52°C/jam	7,33°C/jam	5,84°C/jam

Laju pendinginan konfigurasi pertama terlihat paling rendah, tetapi temperatur awal pendinginannya juga jauh lebih rendah. Perbandingan yang lebih relevan adalah konfigurasi kedua dan ketiga karena keduanya memiliki temperatur awal pendinginan rata-rata yang hampir sama, sekitar 195°C. Isolasi menyeluruh menurunkan laju pendinginan dari 7,33°C/jam menjadi 5,84°C/jam atau sekitar 20,33%.



Gambar 4. Kurva pendinginan konfigurasi ketiga

ENERGI DAN EFISIENSI PENYIMPANAN

Pada periode pemanasan yang dianalisis, temperatur rata-rata 57 kg pasir meningkat dari 100,25°C menjadi 229,88°C sehingga ΔT mencapai 129,63°C. Dengan kapasitas panas spesifik 830 J/kg°C, energi termal pasir dihitung sebesar 6.132.559 J atau 1.703,49 Wh. Energi listrik masukan berdasarkan integrasi daya terhadap waktu mencapai 4.099 Wh.

Perbandingan energi termal pasir dengan energi listrik masukan menghasilkan efisiensi penyimpanan sebesar 41,56%. Nilai ini merupakan efisiensi pengisian energi termal ke dalam pasir, bukan efisiensi total dari radiasi matahari hingga pemanfaatan panas. Selisih energi mencakup panas yang diserap elemen pemanas, tabung, penutup, coil tembaga, dan komponen konstruksi serta panas yang berpindah ke lingkungan.

KESIMPULAN

Prototipe TES berbasis 57 kg pasir silika berhasil dibangun dengan sumber energi langsung dari dua panel surya 545 Wp. Pengembangan dari satu panel dan satu elemen pemanas menuju dua panel dan dua elemen pemanas meningkatkan temperatur tertinggi dari 103,63°C menjadi 195,13°C. Pemasangan rockwool dan aluminium foil pada seluruh sisi meningkatkan temperatur tertinggi menjadi 230,13°C dan menurunkan laju pendinginan sebesar 20,33% dibandingkan konfigurasi dengan isolasi penutup yang belum menyeluruh. Konfigurasi akhir mempertahankan temperatur rata-rata 100,09°C setelah sekitar 16 jam pendinginan. Energi termal yang tersimpan sebesar 1.703,49 Wh dari energi listrik masukan 4.099 Wh menghasilkan efisiensi penyimpanan 41,56%.

SARAN

Pengembangan berikutnya perlu menambah jumlah titik pengukuran temperatur, meningkatkan kalibrasi sensor, memperbaiki kerapatan isolasi pada terminal dan sambungan, serta mempertimbangkan penggunaan MPPT agar panel bekerja lebih dekat dengan titik daya maksimum. Neraca energi selanjutnya juga perlu memasukkan energi yang diserap komponen konstruksi.

DAFTAR PUSTAKA

[1] I. Dinçer and M. A. Rosen, Thermal Energy Storage: Systems and Applications, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2021.

[2] J. A. Duffie and W. A. Beckman, Solar Engineering of Thermal Processes, 4th ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2013.

[3] S. A. Kalogirou, Solar Energy Engineering: Processes and Systems, 3rd ed. Oxford, UK: Academic Press, 2023.

[4] Kementerian ESDM RI, “Matahari untuk PLTS di Indonesia,” 2012.

[5] K. Wang, Z. Qin, W. Tong, and C. Ji, “Thermal energy storage for solar energy utilization: Fundamentals and applications,” IntechOpen, 2020.

[6] R. Mabrouk, H. Naji, A. C. Benim, and H. Dhahri, “A state of the art review on sensible and latent heat thermal energy storage processes,” Applied Sciences, vol. 12, no. 14, 2022.

[7] N. Al Rizeiqi, M. Jedda, and P. Y. Liew, “Silica sand as thermal energy storage,” Chemical Engineering Transactions, vol. 106, pp. 1111–1116, 2023.

[8] P. Davenport et al., “Thermal stability of silica for application in thermal energy storage,” NREL/CP-5700-77426, 2020.

[9] P. Niksiar, C. Rogillio, H. Torab, and S. Tiari, “Experimental study of a silica sand sensible heat storage system enhanced by fins,” Energies, vol. 17, no. 21, 2024.

[10] M. Imran et al., “Experimental and numerical analysis of hybrid silica sand–basalt rock thermal energy storage,” Engineering Proceedings, vol. 111, no. 1, 2025.

[11] D. K. Saini, C. Muniyappa, A. Yadav, and S. Zaphar, “Photovoltaic water heating system with coarse sand thermal storage,” International Journal of Energy and Water Resources, 2025.

[12] R. Bruno and G. Jaskhec, “Enhanced thermal storage for residential heating,” Frontiers in Energy Research, vol. 13, 2025.

[13] LONGi Green Energy Technology Co., Ltd., “Hi-MO 5 LR5-72HBD 540–560M module datasheet,” 2023.