

Sistem pendingin gedung 15.5 MWh dengan ice slurry CTES dan solar PV

Agus Sunjarianto Pamitran^{a,1}, Rizqi Rizaldi Azis^a, Eko Mulyono^b, Ardiyansyah Yatim^a, Arnas Lubis^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok, 16424

^bPT. Ekonomi Kapita Oentoeng, Jakarta Selatan, 12560

¹Email korespondensi: pamitran@eng.ui.ac.id

Abstract. Given the increasing concerns about the environmental impact of fossil fuel-based electricity sources, effective efforts are needed to encourage the use of green energy to meet electricity needs, especially for buildings. Air conditioning systems generally contribute the largest electricity consumption in commercial buildings, so planning an energy conservation system is very important. This study designs a building air conditioning system that uses solar power plants (PLTS) as a power source, by applying the principles of district cooling and cold thermal energy storage (CTS) with ice slurry to optimize the performance of the cooling system. With a case study in a building in Jakarta, Indonesia, this study aims to determine the capacity of the PV system and CTES that can reduce energy consumption and emissions, while considering the costs involved. This study shows 3 CTES charging schemes. In this study, a comparison of several CTES charging schemes shows that the charging scheme using a hybrid power supply is the most cost-efficient option, followed by the off-grid scheme, while the conventional system is the most expensive due to the high cost of electricity. Overall, the CTES system with ice slurry is not only a technological innovation, but also a strategic step towards a more environmentally friendly and energy-efficient building system, where energy needs are balanced with the principle of long-term sustainability.

Keywords: ice slurry, cold thermal energy storage, solar PV, air conditioning, refrigeration

Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/jq6wjj06>

PENDAHULUAN

Sistem tata udara yang efektif tidak hanya meningkatkan kenyamanan, tetapi juga produktivitas dan efisiensi kerja di rumah dan bangunan komersial. Namun, tingginya biaya perangkat dan operasional masih menjadi tantangan utama. Sistem HVAC di gedung perkantoran besar umumnya mengonsumsi 40-50% dari total energi gedung [1], sehingga perencanaan sistem konservasi energi dan penyimpanannya sangat krusial.

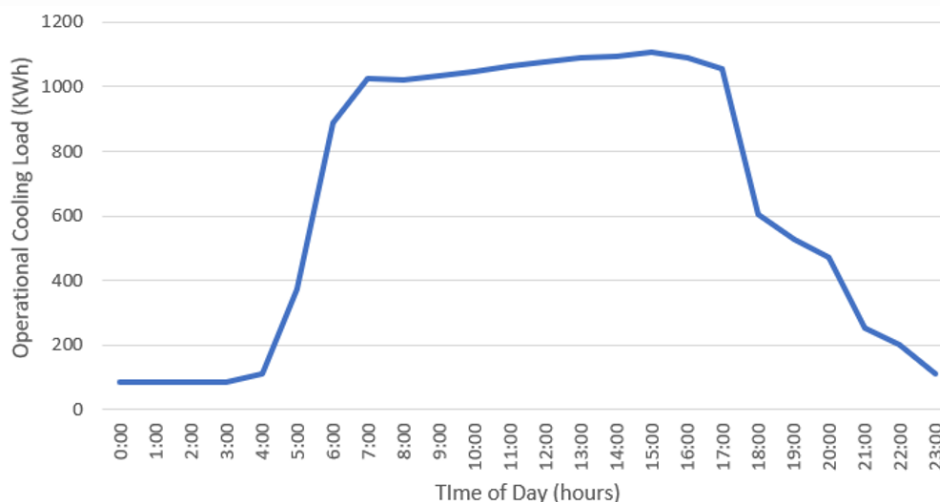
Untuk mengurangi beban listrik, diterapkan tarif berdasarkan waktu, yaitu WBP, (Waktu Beban Puncak) dan LWBP (Luar Waktu Beban Puncak), serta penggunaan teknologi *Cold Thermal Energy Storage* (CTES) yang menyimpan energi dingin di luar jam sibuk. CTES memanfaatkan tarif rendah untuk memproduksi dan menyimpan energi dingin dan menggunakannya saat tarif tinggi. Teknologi ice slurry menawarkan efisiensi tinggi dan kapasitas penyimpanan dingin yang besar, menjadikannya solusi inovatif untuk sistem refrigerasi. Koefisien perpindahan kalor *ice slurry* meningkat seiring dengan konsentrasi es, yang disebabkan oleh perubahan fase dengan kalor laten yang besar [2].

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) menjadi alternatif untuk mengurangi ketergantungan pada pembangkit listrik berbahan bakar fosil yang berdampak negatif pada lingkungan. Meskipun investasi awal tinggi, PLTS tidak menghasilkan emisi. Kendala lainnya adalah alat penyimpanan daya listrik, yaitu baterai, yang masih terkendala oleh biaya dan

limbah [3]. Solusi dari sistem ini adalah mengombinasikan sistem penyimpanan energi termal (CTES) maupun menggunakan sumber energi listrik hibrida. Studi ini menunjukkan penerapan ice slurry sebagai media pendingin pada sistem tata udara gedung perkantoran di Jakarta, Indonesia. Perbandingan skema dan kondisi operasional tangki CTES yang menggunakan ice slurry berbasis campuran air dan etilena glikol menggunakan PLTS sebagai sumber dayanya disajikan, dengan data beban pendinginan gedung yang digunakan sebagai dasar untuk analisis keseimbangan panas dalam sistem ini.

METODOLOGI

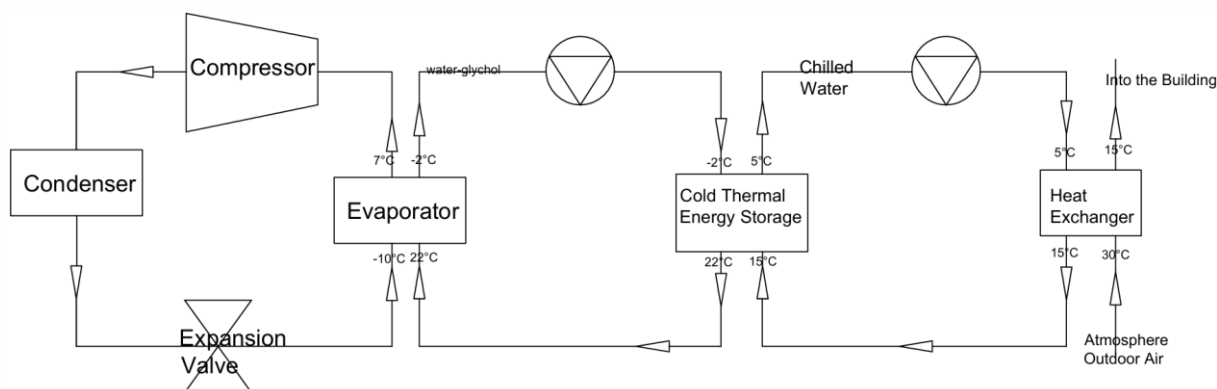
Penelitian ini menggunakan data beban operasional pendingin dari sebuah gedung perkantoran empat lantai di Jakarta, Indonesia, dengan suhu lingkungan rata-rata 30 °C. Radiasi matahari di Jakarta menunjukkan rata-rata tahunan 4.756 kWh/m²/hari dengan puncak pada bulan Agustus–Oktober. Gedung beroperasi dari pukul 08.00 hingga 17.00 tanpa pengaturan beban puncak atau non-puncak, sehingga beban pendingin rata sepanjang waktu operasional gedung. Beban operasional pendingin gedung untuk penelitian ini kemudian disesuaikan dengan distribusi bebannya dengan penelitian yang sudah ada [4] sebagai referensi untuk operasional selama 24 jam. Penelitian terkait [4] dilakukan di gedung perkantoran 47 lantai yang berlokasi di Jakarta Pusat. Beban operasional pendingin gedung yang telah disesuaikan pola beban pendinginannya terdapat pada Gambar 1.



Gambar 1 Beban Pendinginan Operasional

Rancangan menggunakan refrigeran natural ammonia R717, memiliki ODP (Ozone Depletion Potential) nol, sifat termodinamika yang sangat baik, serta koefisien perpindahan kalor yang tinggi [5]. Rancangan sistem pendingin terdiri dari tiga loop. Loop pertama adalah siklus refrigerasi yang memproduksi ice slurry. Loop kedua adalah penyimpanan ice slurry dalam sistem CTES. Loop ketiga digunakan untuk memenuhi kebutuhan pendinginan gedung, dengan strategi operasi CTES yang berfungsi untuk mengatur penyesuaian yang diperlukan. Chilled water keluar dari evaporator dengan temperatur -2°C dengan campuran etilen glikol 20% untuk menurunkan titik beku. Campuran water-glikol dipompa oleh primary chilled water pump untuk disimpan di CTES tank dalam fasa ice slurry. Ice slurry dari CTES tank dialirkan ke AHU

dengan secondary chilled water pump menjadi air dingin dengan temperatur masuk AHU sebesar 5°C untuk menurunkan temperatur udara luar lingkungan 30°C menjadi 15°C . Udara yang digunakan untuk mendinginkan gedung dialirkan kembali ke AHU untuk didinginkan kembali oleh air dingin dari CTES, melalui pertukaran kalor pada AHU. Air dingin yang digunakan untuk mendinginkan udara di AHU dialirkan kembali ke CTES untuk kembali didinginkan oleh air dingin yang dihasilkan oleh evaporator. Loop ini terus berulang sesuai kebutuhan sistem. Secara keseluruhan, sistem ini menggabungkan refrigerasi dan penyimpanan energi termal, dengan menggunakan ice slurry sebagai media penyimpanan dan pelepasan energi dingin. Diagram skematik sistem pendinginan dan storage ice slurry terdapat pada Gambar 2.



Gambar 2 Diagram Skematik Sistem Pendinginan

Perancangan menggunakan metode optimasi weighted sum [6] untuk mendapatkan angka optimal untuk setiap skema pengisian CTES dengan hasil biaya dan efisiensi energi yang optimal. Tahapan perancangan dimulai dari memilih komponen sistem refrigerasi, dilanjutkan dengan menentukan skema dan kondisi operasional pengisian CTES, menentukan kapasitas CTES dan sistem PLTS. Hasil akhirnya

adalah perbandingan biaya dari setiap skema yang digunakan untuk mengisi CTES beserta kapasitas sistem PLTS dan kapasitas CTES.

Sistem refrigerasi menggunakan water-cooled chiller “Chiller FUGU series” dari Mayekawa dengan R717 sebagai refrigerant primer dan monoetilen glikol sebagai refrigerant sekunder. Chiller ini digunakan karena sesuai dengan jenis refrigerant yang digunakan

dalam sistem dan juga memiliki COP yang baik di kelasnya.

CTES dirancang berbentuk silinder dengan material wool kaca dengan ketebalan 100 mm, busa poliuretan (PU) dengan ketebalan 100 mm, dan stainless steel dengan ketebalan 1 mm. Dimensi CTES memiliki tinggi 7 m dan diameternya menyesuaikan dengan volumenya, berbeda untuk tiap jenis skema dan kondisi operasional pengisian. Tangki penyimpanan ini memiliki kekuatan untuk menahan tekanan media penyimpanan dan harus kedap air dan tahan korosi.

Kapasitas CTES (kJ/h) dapat diketahui dengan persamaan (1) dan (2).

$$Q_{CTES} = m(C_{p \text{ Water-Glycol}} \times \Delta T + L_{IPF}) \quad (1)$$

$$IPF = \frac{V_{ice}}{V_{total}} \times 100 \quad (2)$$

Sistem menggunakan pompa air untuk mengalirkan air dingin menggunakan chilled water pump. Perhitungan daya pompa ditunjukkan pada persamaan (3) dan (4) [7].

$$CHWP = \frac{CHWFR \times \text{Pump Head}}{a \times \text{Pump Eff}} \quad (3)$$

$$CWFR = \frac{a \times Q_{tot}}{\Delta T_{\text{Chilled Water}}} \quad (4)$$

CHWP : Daya Chilled Water Pump (kW)

CWFR : Laju aliran chilled water (GPM)

Pump Head : Tinggi tekanan pompa maksimal (ft)

a : Konstanta konversi unit (3960)

Pump Eff : Efisiensi pompa.

a : Konstanta konversi unit (24)

$\Delta T_{\text{Chilled Water}}$: Perbedaan temperatur antara air yang didinginkan chiller dengan air dari AHU (°F)

Berdasarkan sumber daya listriknya, sistem refrigerasi dirancang dengan tiga skema pengisian

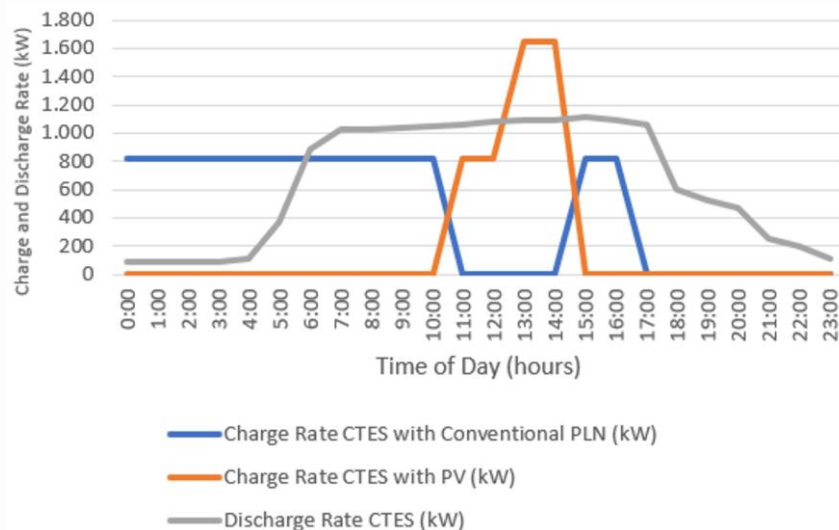
CTES, skema pertama adalah pengisian CTES dengan suplai daya hybrid, skema kedua adalah pengisian CTES dengan sumber daya off-grid (PV saja), dan skema ketiga adalah pengisian CTES dengan sumber daya off-grid dan baterai. Ketiga skema dibuat untuk menentukan yang paling efisien dalam konsumsi energi dan biaya. Rancangan sistem PLTS menggunakan metode kalkulasi manual [8]. Data yang dibutuhkan adalah load energy dalam sehari, peak load, dan rancangan day of autonomy sistem.

HASIL DAN PEMBAHASAN

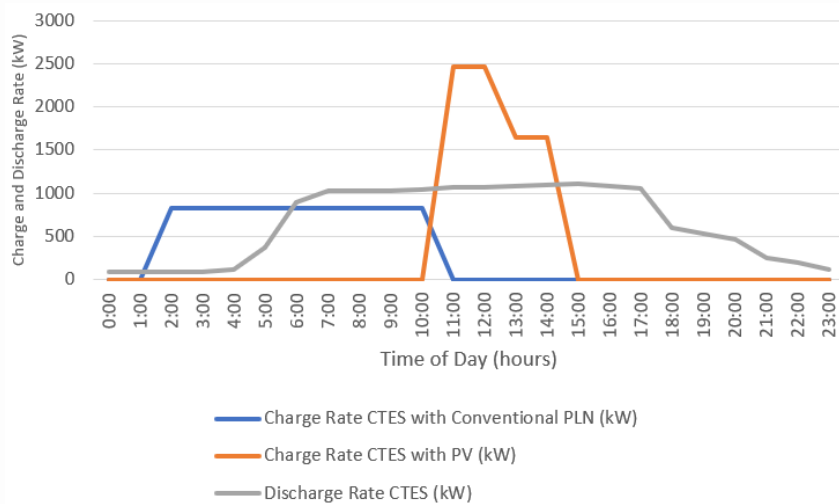
Skema pengisian CTES dengan suplai daya hybrid dibuat dengan tiga kondisi operasional. Kondisi operasional hybrid 1, seperti ditunjukkan pada Gambar 3, menggunakan strategi perataan beban, yaitu mengisi CTES dengan kapasitas pendinginan yang merata mulai pukul 00.00 hingga 16.00 (kecuali saat *Peak Sun Hour*, PSH, pukul 10.00 hingga 14.00) untuk menghindari tarif listrik tinggi pada Waktu Beban Puncak (WBP) pukul 17.00 hingga 23.00, sehingga dapat menekan biaya listrik operasional.

Gambar 4 menunjukkan kondisi operasional hybrid 2 yang menggunakan perataan beban pendinginan yang disuplai daya listriknya oleh PLTS 50% sejak pukul 10.00 hingga 14.00 dan PLN 50% sejak pukul 01.00 hingga 10.00. Kondisi operasional hybrid 2 menunjukkan bahwa dibutuhkan kapasitas solar PV yang lebih besar daripada kondisi operasional hybrid 1.

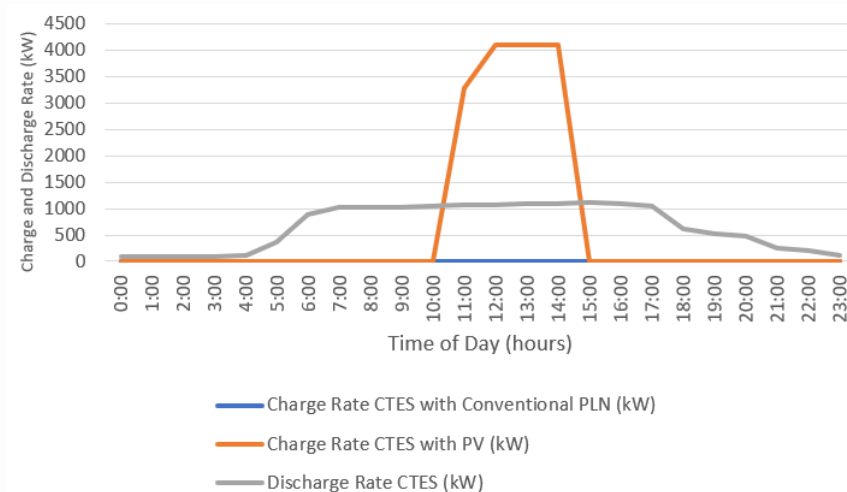
Gambar 5 menunjukkan kondisi operasional hybrid 3 yang menggunakan suplai daya listrik dari PLTS untuk mengoperasikan chiller. Sedangkan daya listrik dari PLN hanya digunakan untuk keperluan listrik operasional minor lain. Jelas, kondisi operasional hybrid 3 menunjukkan bahwa dibutuhkan kapasitas solar PV yang lebih besar daripada kondisi operasional hybrid 2.



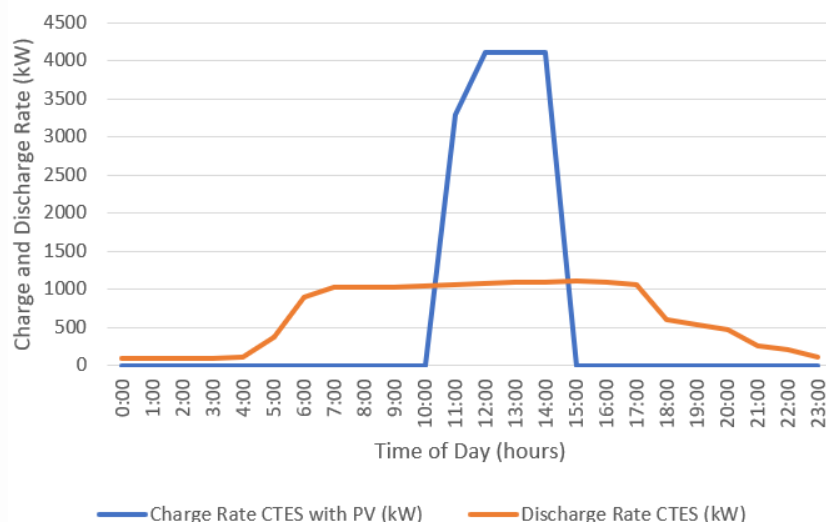
Gambar 3 Kondisi Operasional 1, hibrid PLN (saat tarif listrik rendah) dan PLTS (saat PSH)



Gambar 4 Kondisi Operasional 2, hibrid PLN 50% dan PLTS 50%



Gambar 5 Kondisi Operasional 3, hibrid PLTS off-grid dan PLN minor



Gambar 6 PLTS seluruhnya, dengan sebagian kecil baterai

Skema pengisian CTES dengan sumber daya off-grid (PV) tidak memerlukan baterai sebagai sumber daya listrik untuk chiller, namun menggunakan baterai untuk pengoperasian peralatan pendukung lainnya. Gambar 6 menunjukkan grafik pengisian CTES dengan sumber daya off-grid menggunakan PV. Pengisian CTES dilakukan hanya saat PSH. Secara teoritis, kondisi ini memerlukan kapasitas PV sedikit lebih besar daripada kondisi pada Gambar 5.

PV system menggunakan modul Trina Solar Bifacial 695 Wp Vertex N, memiliki 1,06 kWh/m²/hari. Ukuran atap gedung perancangan adalah 60 m × 35 m dan memiliki luas 2.100 m². Hanya skema pengisian CTES menggunakan suplai daya hybrid kondisi 1 saja yang bisa dipasang sistem PV, sedangkan kondisi operasional dan skema pengisian lainnya tidak bisa diterapkan karena kurangnya luas area atap gedung.

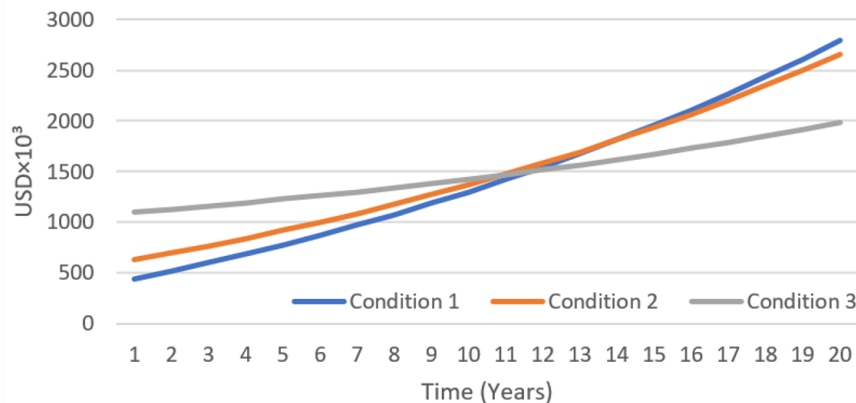
Studi ini menetapkan masa perancangan sistem selama 20 tahun dengan biaya yang meliputi biaya investasi awal, biaya maintenance, dan biaya operasional (listrik untuk skema hybrid). Biaya investasi awal meliputi biaya untuk 2 sistem, sistem pendingin dan sistem PV. Biaya maintenance mencakup perbaikan dan penggantian komponen. Biaya sistem pendingin berkisar 0,45–1,8% dari investasi awal [9], sedangkan PLTS sebesar 1–2% per tahun atau 20–40% selama 20 tahun [10]. Dalam studi ini, biaya maintenance total ditetapkan sebesar 50% dari investasi awal. Biaya operasional dalam penelitian ini merujuk adalah biaya listrik yang dibutuhkan untuk mengoperasikan sistem. Tarif listrik yang digunakan mengacu pada golongan P-2/TM (Tegangan Menengah) dengan daya di atas 200 kVA. Tarif LWBP (Luar Waktu Beban Puncak) ditetapkan sebesar Rp1.415,01/kWh, sedangkan tarif WBP (Waktu Beban Puncak) berada dalam rentang Rp1.400–Rp2.000/kWh tergantung pada kebijakan PLN.

Adanya aliran perpindahan kalor pada CTES di setiap skema dan kondisi pengisian memerlukan tambahan kinerja sistem refrigerasi untuk menghasilkan ice slurry, sehingga meningkatkan konsumsi daya listrik. Pada skema pengisian CTES dengan suplai daya PLTS non-hybrid, peningkatan beban listrik akibat perpindahan panas relatif kecil (sekitar 1,4 kW) dan masih dapat ditopang oleh kapasitas modul surya yang telah dirancang. Namun, dibutuhkan biaya tambahan untuk peningkatan kapasitas baterai, mengingat penurunan kinerja baterai selama 20 tahun masa pakai [11].

Gambar 7 menunjukkan grafik biaya per tahun selama 20 tahun untuk skema hybrid dengan adanya discount rate sebesar 5,15% dalam 10 tahun terakhir dan inflation rate sebesar 4,88% dalam 20 tahun terakhir. Gambar 7 menunjukkan bahwa pada kondisi operasional 1, meskipun biaya investasi awal lebih rendah, total biaya selama 20 tahun lebih tinggi akibat konsumsi listrik yang terbesar. Sebaliknya, kondisi operasional 3 menunjukkan biaya operasional terendah. Ketiga skema pengisian CTES dengan suplai daya hybrid mencapai titik temu biaya (meeting point) pada tahun ke-11.

KESIMPULAN

Sistem pendingin gedung perkantoran di Jakarta yang menggunakan ice slurry dengan Cold Thermal Energy Storage (CTES) dikaji dalam studi ini. CTES berpotensi meningkatkan efisiensi energi dan biaya, memperpanjang umur peralatan, serta meningkatkan performa refrigerasi, meski tantangan seperti desain tangki dan biaya awal perlu diperhatikan. Penggunaan energi surya dalam sistem ini bertujuan mengurangi ketergantungan pada energi fosil yang berdampak buruk pada lingkungan.



Gambar 7 Perbandingan Biaya Rata-rata untuk 3 Kondisi Operasional dengan Hybrid Power Supply

Dalam studi ini, perbandingan beberapa skema pengisian CTES menunjukkan bahwa skema pengisian menggunakan suplai daya hybrid merupakan pilihan paling efisien secara biaya, diikuti oleh skema off-grid, sementara sistem konvensional menjadi yang paling mahal karena tingginya biaya listrik. Penggunaan ice slurry dalam CTES juga memerlukan penyesuaian kapasitas sistem refrigerasi akibat adanya aliran perpindahan kalor selama penyimpanan. Hal ini berdampak pada kebutuhan energi tambahan, terutama pada sistem konvensional dan off-grid dengan baterai, yang memerlukan kapasitas penyimpanan energi yang lebih besar karena degradasi baterai dalam jangka

panjang. Secara keseluruhan, sistem CTES dengan ice slurry tidak hanya merupakan inovasi teknologi, tetapi juga langkah strategis menuju sistem bangunan yang lebih ramah lingkungan dan efisien energi, di mana kebutuhan energi diseimbangkan dengan prinsip keberlanjutan jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Publikasi ini didanai oleh Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, dan bekerja sama dengan PT. Ekonomi Kapita Oentoeng.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] L. Perez-Lombard, J. Ortiz, C. Poutb, A review on buildings energy consumption information, *Energy Buildings* 40 (3) (2008) 394–398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- [2] H. Song, P.G. Verdin, J. Zhang, Research Developments and Applications of Ice Slurry. *Energies* 17(20) (2024) 5213. <https://doi.org/10.3390/en17205213>
- [3] Z. Arifin, Fachrurroji, M. Huda, Increasing performance of chiller systems in high-rise buildings by load optimization, *International Journal of Applied Power Engineering (IJAPE)* 13(1) (2024) 113-122. <http://doi.org/10.11591/ijape.v13.i1.pp113-122>
- [4] E.M. Melchor-Martínez, R. Macias-Garbett, A. Malacara-Becerra, H.M.N. Iqbal, J.E. Sosa-Hernández, R. Parra-Saldivar, Environmental impact of emerging contaminants from battery waste: A mini review, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 3 (2021) 100104 <https://doi.org/10.1016/j.csee.2021.100104>
- [5] M.E.N. Rivero, Z. Ge, Z. Jiang, Y. Zhao, L. Weng, Y. Ding, Thermal energy storage options, *Power generation technologies for low-temperature and distributed heat*, Woodhead Publishing Series in Energy (2023) 419–471 <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818022-8.00002-8>
- [6] D. Kristiani, U. Proboyekti, Implementasi weighted sum model dan least square method dalam pemberian nilai dukung kelayakan penerbitan buku: Studi kasus: Penerbit Andi, *Jurnal EKSIS*, 7(1) (2014) 13–27.
- [7] T.R. Biyanto, A.F. Alhikami, G. Nugroho, R. Hantoro, R. Bayuaji, H. Firmanto, J. Waluyo, A.I. Sonhaji, Thermal energy storage optimization in shopping center buildings, *Journal of Engineering and Technological Sciences* 47(5) (2015) 549–567 <https://doi.org/10.5614/j.eng.technol.sci.2015.47.5.7>
- [8] A. Romana, E.A., Setiawan, K. Joyonegoro, Comparison of two calculation methods for designing the solar electric power system for small islands, *3rd i-TREC E3S Web of Conferences* 67, 02052 (2018) <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20186702052>
- [9] N. Firdaus, B.T. Prasetyo, T. Luciana, Chiller: Performance deterioration and maintenance. *Energy Engineering*,

113(4) (2016) 55–80 <https://doi.org/10.1080/01998595.2016.11728657>

- [10] Ardiansyah, Yandri, K.H. Khwee, Perancangan teknis dan analisis ekonomi pembangkit listrik tenaga surya dengan sistem on-grid di Kantor Bupati Sambas, *Journal of Electrical Engineering, Energy, and Information Technology* 11(1) (2023) <https://doi.org/10.26418/j3eit.v11i1.65671>
- [11] M. Asep, M. Milan, A. Lapthorn, S. Padmanaban, Future Trends and Aging Analysis of Battery Energy Storage Systems for Electric Vehicles, *Sustainability* 13 (2021) 13779 <https://doi.org/10.3390/su132413779>