

## Kajian Literatur Sistem PLTS Off-Grid untuk Aplikasi Pendinginan dan Mesin Pembuat Es di Wilayah Kepulauan Terpencil

Dianta Mustofa Kamal<sup>1</sup>, Yasmin Alifya Azfari<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Progam Studi Magister Terapan Rekayasa Teknologi Manufaktur, Politeknik Negeri Jakarta

<sup>2</sup>Program Sarjana Terapan Teknik Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta

\*Penulis korespondensi, email: [dianta@pnj.ac.id](mailto:dianta@pnj.ac.id)

**Abstrak**— Ketersediaan energi listrik yang terbatas di wilayah kepulauan terpencil masih menjadi kendala dalam mendukung sistem rantai dingin (cold chain) pada sektor perikanan, khususnya untuk pengoperasian mesin pembuat es dan sistem pendinginan. Kondisi tersebut mendorong pemanfaatan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid sebagai sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan mengkaji perkembangan implementasi sistem PLTS off-grid pada aplikasi pendinginan dan mesin pembuat es di wilayah kepulauan terpencil melalui pendekatan Systematic Literature Review (SLR). Kajian dilakukan menggunakan metode PRISMA terhadap publikasi ilmiah periode 2018–2025 yang diperoleh dari Google Scholar, ScienceDirect, IEEE Xplore, dan SpringerLink. Sebanyak 15 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dianalisis secara deskriptif-komparatif berdasarkan konfigurasi sistem, kapasitas komponen utama, kebutuhan energi pendinginan, serta performa operasional. Hasil kajian menunjukkan bahwa sistem PLTS off-grid maupun sistem hibrida berbasis fotovoltaik mampu mendukung operasional mesin pembuat es pada daerah dengan keterbatasan akses listrik. Sistem hibrida memberikan keandalan yang lebih tinggi untuk beban pendinginan kontinu, sedangkan sistem off-grid lebih sesuai diterapkan pada wilayah tanpa jaringan listrik. Kajian ini memberikan rekomendasi bahwa optimalisasi desain sistem, kapasitas penyimpanan energi, dan karakteristik beban refrigerasi menjadi faktor penting dalam meningkatkan keberlanjutan sistem rantai dingin pada sektor perikanan kepulauan.

**Kata Kunci:** *PLTS off-grid; mesin pembuat es; sistem pendinginan; energi surya; cold chain.*

*This article is licensed under the [CC-BY-SA](#) license.*

### 1. Pendahuluan

Wilayah kepulauan terpencil di Indonesia masih menghadapi keterbatasan akses listrik yang andal sehingga aktivitas ekonomi, khususnya sektor perikanan, masih bergantung pada generator berbahan bakar fosil yang memiliki biaya operasional tinggi dan berdampak terhadap lingkungan. Kondisi tersebut menjadi kendala dalam penyediaan energi untuk mendukung sistem pendinginan dan penyimpanan hasil perikanan secara berkelanjutan [1]–[3].

Mesin pembuat es merupakan komponen penting dalam cold chain system karena berfungsi menjaga mutu ikan selama penyimpanan dan distribusi. Namun, kebutuhan energi yang kontinu menyebabkan operasional mesin pembuat es di wilayah terpencil masih bergantung pada generator diesel yang kurang efisien dan memerlukan biaya operasional yang tinggi. Oleh karena itu, diperlukan sumber energi alternatif yang lebih ekonomis, ramah lingkungan, dan berkelanjutan [4]–[6].

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) menjadi salah satu solusi yang potensial karena Indonesia memiliki intensitas radiasi matahari yang tinggi sepanjang tahun. Sistem PLTS off-grid yang terdiri atas modul fotovoltaik, charge controller, baterai, dan inverter mampu menyediakan energi secara mandiri pada daerah yang belum terjangkau jaringan listrik. Perkembangan teknologi penyimpanan energi juga meningkatkan keandalan sistem dalam melayani beban pendinginan secara kontinu [7]–[10].

Berbagai penelitian menunjukkan bahwa PLTS dapat mendukung operasional mesin pembuat es dan sistem pendinginan di wilayah terpencil. Implementasi di Kepulauan Karimunjawa menunjukkan bahwa sistem fotovoltaik mampu mendukung produksi es hingga 180 kg per siklus operasi, sedangkan penelitian lain membuktikan bahwa sistem PLTS off-grid dapat mengoperasikan mesin pembuat es skala kecil tanpa bergantung pada jaringan listrik. Selain meningkatkan efisiensi energi, penerapan PLTS juga berpotensi mengurangi konsumsi bahan bakar fosil dan emisi karbon [1], [4], [11]–[14].

Meskipun demikian, sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada evaluasi komponen PLTS atau sistem refrigerasi secara terpisah sehingga belum memberikan sintesis yang menghubungkan konfigurasi PLTS, kebutuhan energi pendinginan, kapasitas produksi es, dan pengembangan cold chain system pada wilayah kepulauan [8], [11], [15], [16]. Kebaruan penelitian ini terletak pada penyusunan kajian literatur yang mengintegrasikan aspek desain PLTS off-grid, sistem penyimpanan energi, karakteristik beban pendinginan, serta implementasinya pada sektor perikanan di wilayah kepulauan terpencil.

Penelitian ini bertujuan mengkaji perkembangan penerapan sistem PLTS off-grid untuk aplikasi pendinginan dan mesin pembuat es melalui pendekatan Systematic Literature Review (SLR). Kajian difokuskan pada konfigurasi sistem, kebutuhan energi, performa operasional, serta peluang implementasi PLTS sebagai solusi energi berkelanjutan untuk mendukung cold chain system pada sektor perikanan.

## **2. Metode**

Penelitian ini menggunakan metode Systematic Literature Review (SLR) untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis penelitian mengenai penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid pada sistem pendinginan dan mesin pembuat es di wilayah kepulauan terpencil. Proses kajian mengacu pada pedoman Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses (PRISMA) agar tahapan identifikasi, seleksi, dan sintesis literatur dilakukan secara sistematis dan transparan [12], [20].

Penelusuran literatur dilakukan pada basis data Google Scholar, ScienceDirect, IEEE Xplore, dan SpringerLink dengan rentang publikasi tahun 2018–2025. Kata kunci yang digunakan meliputi solar-powered ice maker, solar refrigeration, off-grid photovoltaic system, hybrid photovoltaic system, cold storage fisheries, renewable energy for fisheries, dan solar cold chain.

Seleksi artikel dilakukan berdasarkan kriteria inklusi, yaitu artikel berbahasa Indonesia atau Inggris, dipublikasikan pada jurnal atau prosiding peer-reviewed, membahas aplikasi PLTS pada sistem pendinginan atau mesin pembuat es, tersedia dalam bentuk full text, serta memuat data teknis sistem. Artikel nonilmiah, duplikat, atau yang tidak relevan dikeluarkan dari proses analisis.

Tahapan seleksi mengikuti alur PRISMA sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Dari 76 artikel yang teridentifikasi, sebanyak 34 artikel lolos tahap penyaringan judul dan abstrak, kemudian diperoleh 15 artikel yang memenuhi seluruh kriteria untuk dianalisis.

Data yang diekstraksi meliputi konfigurasi PLTS, kapasitas panel surya dan baterai, jenis sistem (off-grid atau hibrida), kebutuhan energi, kapasitas produksi es, serta performa operasional. Selanjutnya, data

dianalisis secara deskriptif-komparatif untuk mengidentifikasi perkembangan teknologi, keunggulan, keterbatasan, dan peluang implementasi PLTS sebagai sumber energi berkelanjutan pada sistem pendinginan di wilayah kepulauan terpencil.

### **3. Hasil dan Pembahasan**

Hasil kajian terhadap lima belas artikel menunjukkan bahwa penelitian mengenai penerapan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) untuk sistem pendinginan dan mesin pembuat es berkembang pesat selama periode 2018–2025. Perkembangan tersebut didorong oleh kebutuhan energi berkelanjutan pada wilayah pesisir dan kepulauan terpencil yang memiliki keterbatasan akses listrik. Sebagian besar penelitian berfokus pada pengembangan sistem fotovoltaik, penyimpanan energi, serta integrasi sistem rantai dingin (cold chain system) untuk meningkatkan efisiensi dan menjaga kualitas hasil perikanan [12], [20], [23]–[25].

Hasil sintesis menunjukkan bahwa terdapat dua konfigurasi utama, yaitu sistem PLTS off-grid dan sistem hibrida (hybrid photovoltaic-battery-grid). Sistem off-grid memanfaatkan panel surya dan baterai sebagai sumber energi utama sehingga sesuai diterapkan pada daerah tanpa jaringan listrik. Sebaliknya, sistem hibrida mengombinasikan panel surya, baterai, dan jaringan listrik sehingga mampu memberikan pasokan energi yang lebih stabil untuk beban pendinginan yang beroperasi secara kontinu [11], [17], [22].

Penelitian Cheepati dkk. menunjukkan bahwa sistem PLTS off-grid dengan panel surya 300 Wp, baterai 12 V 100 Ah, MPPT, dan inverter 2000 W mampu mengoperasikan mesin pembuat es skala kecil secara mandiri. Namun, kinerja sistem masih dipengaruhi oleh variasi radiasi matahari sehingga kapasitas panel surya dan baterai harus disesuaikan dengan kebutuhan energi harian [2]. Sementara itu, penelitian Indartono dan Mustikaningtyas di Kepulauan Karimunjawa menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas PLTS dari 5 kWp menjadi 6,66 kWp mampu meningkatkan produksi energi tahunan dari 5,762 MWh menjadi 8,412 MWh dan mendukung produksi es hingga 180 kg per siklus operasi [1].

Selain kapasitas panel surya, baterai merupakan komponen penting yang menentukan kontinuitas operasi sistem. Pemilihan kapasitas baterai yang tepat mampu meningkatkan stabilitas pasokan energi dan memperpanjang waktu operasi, sedangkan perkembangan teknologi baterai litium memberikan efisiensi yang lebih baik dibandingkan baterai konvensional [11], [17], [22]. Karakteristik beban refrigerasi juga perlu diperhatikan karena kebutuhan daya relatif tinggi pada tahap awal pembekuan sehingga desain sistem harus disesuaikan dengan profil konsumsi energi [15], [18], [19].

Kajian juga menunjukkan bahwa teknologi pendinginan berbasis PLTS tidak hanya diterapkan pada mesin pembuat es, tetapi juga pada sistem penyimpanan ikan (solar cold storage) yang mampu mempertahankan suhu 0–5 °C dengan konsumsi energi yang lebih efisien melalui pengendalian temperatur otomatis [24], [25]. Dibandingkan generator diesel, sistem PLTS mampu menurunkan konsumsi bahan bakar, mengurangi emisi karbon, serta menekan biaya operasional jangka panjang meskipun memerlukan investasi awal yang lebih tinggi [15], [19], [20].

Meskipun demikian, implementasi PLTS masih menghadapi beberapa tantangan, antara lain fluktuasi radiasi matahari, tingginya biaya investasi awal, keterbatasan kapasitas penyimpanan energi, serta kurangnya sumber daya manusia yang mampu melakukan instalasi dan pemeliharaan sistem di wilayah terpencil [8], [14], [22]. Penelitian terbaru juga menunjukkan adanya pergeseran fokus dari evaluasi komponen individual menuju pengembangan sistem yang terintegrasi antara PLTS, penyimpanan energi, refrigerasi, sistem kendali, dan analisis tekno-ekonomi [20], [22], [23].

Secara keseluruhan, hasil kajian menunjukkan bahwa sistem PLTS off-grid lebih sesuai untuk aplikasi pendinginan skala kecil pada daerah tanpa jaringan listrik, sedangkan sistem hibrida lebih tepat untuk kebutuhan energi yang lebih besar dan beroperasi secara kontinu. Keberhasilan implementasi

dipengaruhi oleh desain sistem, kapasitas panel surya dan baterai, karakteristik beban pendinginan, serta kondisi operasional setempat. Oleh karena itu, PLTS memiliki prospek yang besar sebagai solusi energi berkelanjutan dalam mendukung pengembangan cold chain system pada sektor perikanan di wilayah kepulauan terpencil.

#### **4. Kesimpulan**

Kajian literatur ini menunjukkan bahwa sistem PLTS off-grid dan sistem hibrida memiliki potensi yang besar sebagai sumber energi untuk aplikasi pendinginan dan mesin pembuat es di wilayah kepulauan terpencil. Sistem off-grid sesuai untuk daerah tanpa akses jaringan listrik, sedangkan sistem hibrida lebih andal untuk beban pendinginan yang beroperasi secara kontinu.

Keberhasilan implementasi dipengaruhi oleh kapasitas panel surya, sistem penyimpanan energi, karakteristik beban refrigerasi, dan desain instalasi. Selain meningkatkan keandalan penyediaan energi, penerapan PLTS mampu mengurangi penggunaan bahan bakar fosil, menekan biaya operasional, serta mendukung pengembangan cold chain system pada sektor perikanan.

Penelitian selanjutnya perlu mengembangkan analisis berbasis studi kasus di wilayah kepulauan Indonesia dengan mempertimbangkan aspek teknis, ekonomi, dan lingkungan, termasuk pemanfaatan baterai generasi terbaru serta sistem kendali berbasis Internet of Things (IoT) untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem.

#### **Daftar Pustaka**

- [1] Y. S. Indartono and A. Mustikaningtyas, "Solar Powered Ice Maker System in Karimunjawa Island, Indonesia," *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, vol. 352, pp. 352–360, 2022, doi: 10.3233/FAIA220117.
- [2] D. O. Akinyele and R. K. Rayudu, "Review of energy storage technologies for sustainable power networks," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 42, Art. no. 100857, 2020, doi: 10.1016/j.seta.2020.100857.
- [3] A. Ibrahim, A. Fudholi, and K. Sopian, "Review of solar-powered refrigeration and cooling systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 123, Art. no. 109765, 2020, doi: 10.1016/j.rser.2020.109765.
- [4] M. M. Rana, M. Uddin, M. R. Sarkar, G. M. Shafiullah, H. Mo, and M. Atef, "A review on hybrid photovoltaic–battery energy storage system: Current status, challenges, and future directions," *Journal of Energy Storage*, vol. 51, Art. no. 104597, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104597.
- [5] M. Sharaf, M. S. Yousef, and A. S. Huzayyin, "Review of cooling techniques used to enhance the efficiency of photovoltaic power systems," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 29, pp. 26131–26159, 2022, doi: 10.1007/s11356-022-18719-9.
- [6] M. A. Abdelkareem, K. Sopian, E. T. Sayed, M. A. Elsaid, M. A. Abdelgaied, and A. G. Olabi, "Solar cooling technologies: State of art and perspectives," *Energy Conversion and Management*, vol. 214, Art. no. 112896, 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112896.
- [7] A. Alayi and M. H. Ahmadi, "Analysis of environmental impacts and techno-economic evaluation of solar refrigerators," *Journal of Energy Storage*, vol. 35, Art. no. 102250, 2021, doi: 10.1016/j.est.2021.102250.
- [8] M. M. Rahman, M. M. Hasan, R. K. Paidi, and M. R. Islam, "Hybrid photovoltaic-battery energy systems for rural electrification and cooling applications: A review," *Journal of Energy Storage*, vol. 52, Art. no. 104812, 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104812.
- [9] T. Kousksou, A. Allouhi, M. Belattar, M. Jamil, T. El Rhafiki, and Y. Zeraoui, "Renewable energy storage systems for cold chain applications in remote regions," *Renewable Energy*, vol. 197, pp. 1050–1064, 2023, doi: 10.1016/j.renene.2022.07.091.

- [10] J. Prakash, S. K. Singh, and A. Kumar, "Solar refrigeration technologies for vaccine and fisheries cold storage applications: Recent developments and future prospects," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 2211–2228, 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.01.052.
- [11] G. Saha and A. K. M. Abdul Malek Azad, "A review of advancements in solar PV-powered refrigeration: Enhancing efficiency, sustainability, and operational optimization," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 1693–1709, 2024, doi: 10.1016/j.egyr.2024.07.046.
- [12] N. I. Ibrahim, A. Yahiaoui, J. A. Garkuwa, R. Ben Mansour, and S. Rehman, "Solar cooling with absorption chillers, thermal energy storage, and control strategies: A review," *Journal of Energy Storage*, vol. 97, Art. no. 112762, 2024, doi: 10.1016/j.est.2024.112762.
- [13] E. Baniasadi, A. Rezk, Y. B. Tola, A. Alaswad, M. Imran, and P. Humphries, "Renewable-driven hybrid refrigeration system for enhancing food preservation: Digital twin design and performance assessment," *Energy Conversion and Management*, vol. 322, Art. no. 119165, 2024, doi: 10.1016/j.enconman.2024.119165.
- [14] M. A. Aziz, M. I. H. Khan, H. M. M. Afroz, M. M. Hossain, S. Talukdar, and M. A. A. Masud, "The development and performance evaluation of an alternative energy-based hybrid cold storage system," *Journal of Cleaner Production*, vol. 434, Art. no. 140394, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.140394.
- [15] Y. Guo, T. Zhang, H. Zhou, S. Shen, et al., "Study on off-grid performance and economic viability of photovoltaic energy storage refrigeration systems," *International Journal of Refrigeration*, vol. 169, 2024, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2024.11.012.
- [16] J. Li, X. Wang, Y. Liu, et al., "Research on the characteristics of photovoltaic-driven refrigerated warehouse with ice storage under weather and load variation," *Renewable Energy*, vol. 235, Art. no. 121399, 2024, doi: 10.1016/j.renene.2024.121399.
- [17] "Cooling with the sun: Empowering off-grid communities in developing countries with solar-powered cold storage systems," *Energy Research & Social Science*, vol. 117, Art. no. 103686, 2024, doi: 10.1016/j.erss.2024.103686.
- [18] "Recent developments in solar-powered refrigeration systems and energy storage methods for on-farm preservation of fruits and vegetables," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 66, Art. no. 104032, 2024, doi: 10.1016/j.seta.2024.104032.
- [19] S. Gunawan, W. Arfianto, and B. Heryadi, "A comparative review and novel design possibilities on solar-driven absorption LiBr–H<sub>2</sub>O refrigeration system," *Mesin*, vol. 30, no. 1, pp. 1–20, 2024, doi: 10.5614/MESIN.2024.30.1.1.
- [20] A. M. Adeyinka, O. C. Esan, A. O. Ijaola, et al., "Advancements in hybrid energy storage systems for enhancing renewable energy-to-grid integration," *Sustainable Energy Research*, vol. 11, Art. no. 26, 2024.
- [21] K. H. Chakravarty, M. Sadi, H. Chakravarty, A. S. Alsagri, T. J. Howard, and A. Arabkoohsar, "A review on integration of renewable energy processes in vapor absorption chiller for sustainable cooling," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 50, Art. no. 101822, 2022.
- [22] A. Behzadi, A. Arabkoohsar, M. Sadi, and K. H. Chakravarty, "A novel hybrid solar-biomass design for green off-grid cold production: Techno-economic analysis and optimization," *Solar Energy*, vol. 218, pp. 639–651, 2021.
- [23] Q. Deng, Z. Yang, L. Zhang, and M. Jia, "The control strategy and economic analysis of a new type of solar cold storage," *Journal of Energy Storage*, vol. 52, Art. no. 104865, 2022.
- [24] W. Du, M. Li, Y. Wang, X. Ma, C. Hu, Y. Zhang, and Z. Zhang, "Dynamic energy efficiency characteristics analysis of a distributed solar photovoltaic direct-drive solar cold storage," *Applied Energy*, vol. 305, Art. no. 117809, 2022.
- [25] D. N. Basu and A. Ganguly, "Solar thermal–photovoltaic powered potato cold storage: Conceptual design and performance analyses," *Applied Energy*, vol. 165, pp. 308–317, 2016.