E-ISSN : 2988-1986
https://ejournal.cahayailmubangsa.institute/index.php/kohesi

Kohesi: Jurnal Multidisiplin Saintek
Volume 11 No 1 Tahun 2026

DAMPAK LISTRIK TENAGA SURYA (PHOTOVOLTAIC) TERHADAP LINGKUNGAN DAN EKONOMI: LITERATURE REVIEW

Ahmad Akbar Ramadhan Putra Andriyanto*)[1], Khiatta Catur Wira Mada[1], Mohammad Ihsanul Fikri[1], Muh. Ulil Amir[1], Muhammad Syukri[1], Arif Mustapa[2]

[1]Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya
[2]Departemen Psikologi, Fakultas Ilmu Sosial dan Ilmu Politik, Universitas Brawijaya
*)Corresponding author, email: ahmadakbarrpa31@student.ub.ac.id

ABSTRAK

Transisi global menuju energi terbarukan telah menempatkan teknologi Photovoltaic (PV) sebagai solusi utama dalam mencapai netralitas iklim. Namun, implementasi sistem PV dalam skala besar menghadapi berbagai tantangan, baik dari perspektif lingkungan maupun ekonomi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak yang ditimbulkan oleh teknologi photovoltaic (PV) terhadap aspek lingkungan dan ekonomi berdasarkan berbagai hasil penelitian yang telah dipublikasikan. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan mengidentifikasi manfaat serta tantangan yang muncul selama siklus hidup sistem photovoltaic sebagai bagian dari upaya transisi menuju energi berkelanjutan. Metode yang digunakan mengacu pada pedoman PRISMA dengan meninjau 10 artikel jurnal yang telah melalui proses peer-review dan dipublikasikan pada periode 2021 hingga 2026. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem PV mampu mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan selama fase operasional, meskipun masih terdapat tantangan lingkungan terkait penggunaan lahan, konsumsi air, serta pengelolaan limbah pada akhir masa pakai. Dari perspektif ekonomi, Levelized Cost of Electricity (LCOE) mengalami penurunan yang signifikan, sehingga menjadikan PV sebagai salah satu sumber energi paling kompetitif secara global. Namun demikian, tingginya biaya investasi awal serta integrasi Energy Storage Systems (ESS) masih menjadi tantangan utama yang mempengaruhi periode pengembalian investasi. Penelitian ini menyimpulkan bahwa teknologi PV memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi jangka panjang yang signifikan, namun memerlukan pengelolaan siklus hidup yang tepat serta dukungan kebijakan yang memadai.

ABSTRACT

The global transition toward renewable energy has positioned photovoltaic (PV) technology as a key solution for achieving climate neutrality. However, large-scale implementation of PV systems presents challenges from both environmental and economic perspectives. This study aims to analyze the environmental and economic impacts of photovoltaic technology

Article History
Received: Juli 2026
Reviewed:Juli 2026
Published: Juli 2026

Plagiarism Checker No 237.u873247.fh8374

Copyright : Author
Publish by : Kohesi

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License

through a systematic literature review approach. The method follows PRISMA guidelines by reviewing 10 peer-reviewed journal articles published between 2020 and 2025. The findings indicate that PV systems significantly reduce greenhouse gas emissions during operation, although environmental challenges remain in terms of land use, water consumption, and end-of-life waste management. From an economic perspective, the Levelized Cost of Electricity (LCOE) has decreased significantly, making PV one of the most competitive energy sources globally. However, high initial investment costs and the integration of Energy Storage Systems (ESS) remain key challenges affecting the payback period. This study concludes that PV technology provides substantial long-term environmental and economic benefits, but requires proper lifecycle management and supportive policy frameworks. **Kata kunci: Photovoltaic, Environmental Impact, Economic Impact, LCOE**

PENDAHULUAN

Perubahan iklim dan kerusakan lingkungan menjadi salah satu tantangan terbesar yang dihadapi dunia saat ini. Peningkatan penggunaan bahan bakar fosil untuk memenuhi kebutuhan energi telah menyebabkan emisi gas rumah kaca dalam jumlah besar, yang berdampak pada kenaikan suhu global, perubahan pola cuaca, serta meningkatnya frekuensi berbagai bencana alam. Sektor energi diketahui menjadi salah satu penyumbang utama emisi karbon dioksida sehingga berbagai negara mulai mendorong pemanfaatan sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan guna mengurangi dampak lingkungan tersebut [1], [11].

Salah satu sumber energi terbarukan yang berkembang pesat dalam beberapa dekade terakhir adalah energi surya melalui teknologi Photovoltaic (PV). Teknologi ini mampu mengubah energi matahari menjadi energi listrik secara langsung tanpa menghasilkan emisi selama proses operasinya. Keunggulan tersebut menjadikan PV sebagai salah satu alternatif yang dianggap mampu mendukung upaya pengurangan emisi gas rumah kaca sekaligus membantu pencapaian target transisi energi dan netralitas karbon di berbagai negara [9], [11].

Meskipun sering dipandang sebagai teknologi ramah lingkungan, dampak lingkungan dari sistem photovoltaic tidak hanya dapat dilihat pada tahap operasionalnya. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa proses produksi panel surya memerlukan berbagai material dan energi yang turut menghasilkan emisi serta berpotensi menimbulkan limbah berbahaya. Selain itu, penggunaan lahan dalam skala besar, kebutuhan air untuk pemeliharaan panel, serta pengelolaan limbah panel yang telah mencapai akhir masa pakainya merupakan tantangan lingkungan yang perlu diperhatikan dalam pengembangan teknologi PV secara berkelanjutan [1], [5]. Oleh karena itu, penilaian terhadap dampak lingkungan teknologi PV perlu dilakukan dengan mempertimbangkan seluruh tahapan siklus hidup sistem, mulai dari proses manufaktur hingga pengelolaan limbah akhir.

Selain memberikan dampak terhadap lingkungan, teknologi photovoltaic juga memiliki pengaruh yang signifikan dari sisi ekonomi. Perkembangan teknologi manufaktur, peningkatan efisiensi panel surya, dan bertambahnya kapasitas produksi global telah mendorong penurunan biaya pembangkitan listrik tenaga surya secara konsisten dalam beberapa tahun terakhir. Kondisi ini menyebabkan nilai Levelized Cost of Electricity (LCOE) tenaga surya menjadi semakin kompetitif dibandingkan sumber energi konvensional sehingga mendorong peningkatan investasi dan pemanfaatan sistem PV di berbagai sektor [7], [9].

Di sisi lain, implementasi teknologi PV masih menghadapi sejumlah tantangan ekonomi

yang perlu dipertimbangkan. Biaya investasi awal yang relatif tinggi, kebutuhan sistem penyimpanan energi untuk mengatasi sifat intermiten energi surya, serta degradasi performa panel selama masa operasional dapat memengaruhi kelayakan finansial suatu proyek photovoltaic [3], [4], [8]. Faktor-faktor tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan penerapan teknologi PV tidak hanya ditentukan oleh manfaat lingkungan yang dihasilkan, tetapi juga oleh kemampuan sistem tersebut dalam memberikan keuntungan ekonomi yang berkelanjutan.

Berbagai penelitian mengenai dampak lingkungan dan ekonomi teknologi photovoltaic telah dilakukan dengan pendekatan dan fokus yang berbeda-beda. Namun, hasil-hasil penelitian tersebut masih tersebar dalam berbagai publikasi sehingga diperlukan suatu kajian yang mampu mengintegrasikan temuan-temuan tersebut secara sistematis. Melalui pendekatan systematic literature review, berbagai hasil penelitian dapat dianalisis dan dibandingkan untuk memperoleh gambaran yang lebih utuh mengenai manfaat, tantangan, serta implikasi penerapan teknologi photovoltaic terhadap lingkungan dan ekonomi.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui dampak lingkungan dan ekonomi dari teknologi photovoltaic berdasarkan hasil-hasil penelitian yang telah dipublikasikan. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai peran teknologi photovoltaic dalam mendukung transisi energi berkelanjutan serta menjadi bahan pertimbangan dalam pengembangan dan implementasi sistem energi surya di masa mendatang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode systematic literature review (SLR) dengan pendekatan PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) untuk menjamin transparansi, konsistensi, dan sistematika dalam proses identifikasi serta seleksi literatur. Pendekatan ini dipilih karena mampu mengintegrasikan berbagai hasil penelitian secara komprehensif dan terstruktur, sehingga menghasilkan sintesis yang valid dan dapat dipertanggungjawabkan.

Sumber data diperoleh dari basis data ilmiah bereputasi internasional, yaitu IEEE Xplore, ScienceDirect, MDPI, dan Environmental Research Letters. Proses pencarian menggunakan kata kunci yang relevan, antara lain "solar PV environmental impact", "PV lifecycle assessment", "techno-economic analysis of PV", dan "LCOE solar energy". Literatur dibatasi pada publikasi tahun 2020 hingga 2025 untuk menjaga relevansi terhadap perkembangan teknologi terkini.

Proses seleksi dilakukan melalui tiga tahapan: identifikasi (seleksi judul dan abstrak, eliminasi duplikasi), penyaringan (tinjauan teks lengkap), dan evaluasi kelayakan. Kriteria inklusi mencakup artikel peer-reviewed yang membahas dampak lingkungan (emisi, penggunaan lahan, limbah) dan/atau dampak ekonomi (biaya investasi, LCOE, profitabilitas) dari sistem PV, serta tersedia dalam bentuk full text.

Artikel yang hanya berfokus pada aspek teknis material tanpa analisis dampak, atau tidak memiliki data empiris yang jelas, dieliminasi.

Sebanyak 10 artikel yang memenuhi kriteria dianalisis menggunakan pendekatan kualitatif-komparatif, difokuskan pada keterkaitan antara dampak lingkungan berbasis siklus hidup, indikator ekonomi (LCOE dan payback period), serta peran integrasi Energy Storage Systems (ESS). Sintesis dilakukan dengan membandingkan temuan antar studi untuk mengidentifikasi pola umum, kesenjangan penelitian, dan implikasi praktis.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan hasil telaah terhadap sepuluh artikel yang memenuhi kriteria penelitian, diketahui bahwa teknologi photovoltaic memberikan berbagai dampak yang berkaitan dengan aspek lingkungan dan ekonomi. Sebagian besar penelitian menunjukkan bahwa penggunaan PV mampu mendukung pengurangan emisi gas rumah kaca dan meningkatkan pemanfaatan energi terbarukan. Namun, beberapa studi juga menyoroti adanya tantangan lingkungan yang muncul selama proses produksi, operasional, hingga pengelolaan limbah panel surya. Dari sisi ekonomi, perkembangan teknologi dan penurunan biaya produksi menjadikan PV semakin kompetitif, meskipun investasi awal dan kebutuhan sistem penyimpanan energi masih menjadi perhatian utama dalam implementasinya. Sintesis hasil penelitian disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Hasil Studi Literatur

Peneliti (tahun)	Judul	Metode	Hasil	Sumber
Lakhouit et al. (2025)	Assessing the environmental impact of PV emissions and sustainability challenges	Environmental Impact Assessment (EIA)	Menemukan bahwa emisi PV sangat rendah dibanding fosil, namun penggunaan air untuk pembersihan di daerah arid menjadi tantangan keberlanjutan.	[5]
Tawalbeh et al. (2021)	Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook	Systematic Critical Review	Mengidentifikasi bahwa PV tidak "nol-emisi" sepenuhnya karena adanya limbah logam berat (kadmium/timbal) dan masalah penggunaan lahan.	[1]
Hasan et al. (2022)	Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review	Comprehensive Review	Debat, suhu, dan kelembapan adalah faktor lingkungan utama yang menurunkan efisiensi operasional dan memperpendek umur ekonomis panel.	[6]

Babu et al. (2025)	Towards Sustainable and Clean Energy Futures: A Techno-Economic Review of Solar PV Systems, Challenges, and Opportunities	Techno-Economic Review	LCOE tenaga surya telah mencapai titik paritas jaringan global, menjadikannya opsi paling ekonomis untuk transisi energi bersih.	[7]
Li et al. (2023)	Energy–Environment–Economy (3E) analysis of the performance of introducing photovoltaic and energy storage systems into residential buildings: A case study in Shenzhen, China	3E Analysis & Case Study (Shenzhen)	Integrasi baterai (ESS) meningkatkan kemandirian energi rumah tangga hingga 70% dan memberikan keuntungan ekonomi jangka panjang bagi residensial.	[4]
Hasan et al. (2023)	Harnessing solar power: a review of photovoltaic innovations, solar thermal systems, and the dawn of	Technological Review	Inovasi pada sistem penyimpanan energi (baterai) adalah kunci untuk mengatasi sifat intermiten PV agar tetap stabil secara ekonomi.	[8]

Peneliti (tahun)	Judul	Metode	Hasil	Sumber
	energy storage solutions			
Lazaroiu et al. (2023)	A comprehensive overview of photovoltaic technologies and their efficiency for climate neutrality	Literature Synthesis	Teknologi PV multi-junction dan bifacial menawarkan efisiensi lebih tinggi yang mempercepat pencapaian target netralitas karbon dunia.	[9]
Koester et al. (2022)	Review of photovoltaic module degradation, field inspection techniques and techno-economic assessment	Failure Modes and	Effects Analysis (FMEA)	[3]
Mukhtar et al. (2024)	Enviro-economic and optimal hybrid energy system: Photovoltaic–biogas–hydro–battery system in rural areas of Pakistan	Optimization Modelling (HOMER Pro)	Sistem hibrida (PV-Biogas-Hydro) terbukti paling optimal secara biaya (NPC rendah) dan ramah lingkungan untuk wilayah pedesaan.	[10]
Saxena et al. (2023)	Modelling the global photovoltaic potential on land and its sensitivity to climate change	Global	Climate Modelling	[11]

Dari perspektif ekologis, sebagian besar literatur menegaskan bahwa sistem PV mampu menurunkan emisi gas rumah kaca secara signifikan dibandingkan pembangkit berbasis fosil. Tawalbeh et al. (2021) mencatat bahwa intensitas emisi PV sepanjang siklus hidupnya berkisar antara 20–50 gram CO_2 ekuivalen per kilowatt-jam, jauh lebih rendah dibanding batu

bara yang mencapai 800–1000 gram CO_2e/kWh [1]. Saxena et al. (2023) memperkuat temuan ini dengan pemodelan global yang menunjukkan potensi PV dalam mereduksi emisi sektor energi secara masif apabila adopsinya dipercepat [11].

Akan tetapi, penilaian menyeluruh berbasis Life Cycle Assessment (LCA) mengungkap sisi lain yang kerap luput dari perhatian. Tawalbeh et al. (2021) mengidentifikasi bahwa fase produksi panel surya melibatkan material berbahaya seperti kadmium dan timbal, yang berpotensi mencemari tanah dan air jika tidak dikelola dengan standar yang ketat [1]. Temuan ini diperkuat oleh Lakhouit et al. (2025) yang menunjukkan bahwa tanpa regulasi daur ulang yang terstandarisasi secara global, lonjakan adopsi PV justru akan menciptakan gelombang limbah panel bekas yang berpotensi menjadi krisis lingkungan baru pada dekade mendatang [5].

Aspek yang sering diabaikan dalam analisis makro namun memiliki implikasi nyata adalah kebutuhan air–untuk pembersihan panel, khususnya di wilayah kering dan semi-arid. Lakhouit et al. (2025) mengemukakan bahwa di kawasan dengan iradiasi matahari tinggi yang justru paling ideal untuk instalasi PV skala besar akumulasi debu pada permukaan panel dapat menurunkan efisiensi hingga 30%, sehingga memerlukan pembersihan rutin. Di sisi lain, wilayah tersebut umumnya menghadapi kelangkaan air, sehingga kebutuhan air untuk pembersihan panel secara tidak langsung berkompetisi dengan kebutuhan air domestik dan pertanian [5]. Kondisi ini merupakan contoh nyata bagaimana aspek operasional PV dapat menjadi tekanan lingkungan baru yang tidak terlihat dalam analisis emisi semata sebuah trade-off yang memerlukan solusi inovatif seperti sistem pembersihan kering berbasis robot atau lapisan anti-debu pada panel.

Hasan et al. (2022) menambahkan dimensi teknis-ekologis yang penting: faktor lingkungan seperti suhu tinggi, kelembaban, dan paparan debu dapat menurunkan efisiensi operasional panel secara signifikan [6]. Penurunan efisiensi ini tidak hanya berdampak pada output energi, tetapi juga secara tidak langsung meningkatkan kebutuhan lahan karena lebih banyak panel diperlukan untuk menghasilkan kapasitas yang sama. Dengan kata lain, terdapat keterkaitan sistemik antara degradasi kinerja teknis dan perluasan jejak lingkungan yang perlu diperhitungkan dalam perencanaan instalasi PV berskala besar.

Dari perspektif ekonomi, teknologi PV menunjukkan trajektori yang sangat positif. Babu et al. (2025) mengkonfirmasi bahwa LCOE tenaga surya telah mengalami penurunan lebih dari 89% dalam satu dekade terakhir, menjadikannya salah satu sumber listrik termurah di berbagai wilayah dunia [7]. Penurunan biaya ini didorong oleh efisiensi manufaktur massal, inovasi material sel surya, dan peningkatan skala instalasi. Lazaroiu et al. (2023) menambahkan bahwa terobosan pada teknologi panel bifacial dan multi-junction membuka peluang peningkatan efisiensi konversi energi yang lebih tinggi, yang semakin memperkuat daya saing ekonomi PV [9].

Namun, daya saing makro tersebut belum sepenuhnya tercermin dalam kelayakan finansial pada skala mikro, terutama di segmen residensial dan wilayah berkembang. Li et al. (2023) melalui studi kasus di Shenzhen, Tiongkok, menunjukkan bahwa integrasi sistem PV dengan Energy Storage Systems (ESS) mampu meningkatkan kemandirian energi rumah tangga hingga 70%, sekaligus memberikan manfaat ekonomi jangka panjang yang signifikan [4]. Namun, biaya investasi awal yang mencakup panel, inverter, dan sistem baterai masih menjadi hambatan nyata bagi sebagian besar rumah tangga, terutama di negara berkembang di mana akses pembiayaan energi bersih masih terbatas.

Perlu ditegaskan bahwa argumentasi "PV menguntungkan" tidak berlaku universal tanpa mempertimbangkan konteks lokal. Hasan et al. (2023) menekankan bahwa intermittensi sumber energi surya—yang bergantung pada ketersediaan sinar matahari menjadi kerentanan fundamental yang harus diatasi melalui integrasi ESS [8]. Tanpa penyimpanan energi yang memadai, nilai ekonomi PV akan menurun signifikan karena kelebihan produksi di siang hari tidak dapat dimanfaatkan secara optimal di malam hari atau

saat mendung. Hal ini menimbulkan dilema ekonomi: ESS diperlukan untuk memaksimalkan nilai investasi PV, tetapi ESS sendiri menambah beban biaya yang substansial, sehingga memperpanjang periode pengembalian investasi (payback period).

Koester et al. (2022) memperkenalkan variabel degradasi panel sebagai faktor ekonomi yang sering diremehkan dalam proyeksi keuangan jangka panjang. Penurunan efisiensi panel sebesar rata-rata 0,5% per tahun mungkin tampak kecil, tetapi dalam horizon investasi 25–30 tahun, akumulasi degradasi ini secara nyata mempengaruhi Internal Rate of Return (IRR) dan memperpanjang payback period [3]. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya program pemeliharaan preventif yang terstruktur dan pemantauan performa berbasis sensor sebagai investasi pelengkap yang tak terpisahkan dari sistem PV.

Mukhtar et al. (2024) menawarkan perspektif solusi yang relevan khususnya bagi konteks negara berkembang: pendekatan sistem energi hibrida (PV-Biogas-Hidro) terbukti memberikan kombinasi optimal antara Net Present Cost (NPC) rendah, emisi minimal, dan keandalan pasokan yang tinggi untuk wilayah pedesaan yang jauh dari jaringan listrik utama [10]. Pendekatan ini menunjukkan bahwa optimasi ekonomi dan lingkungan tidak harus saling bertentangan, melainkan dapat dicapai secara sinergis melalui desain sistem yang tepat.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil systematic literature review terhadap 10 artikel ilmiah yang telah dianalisis, dapat disimpulkan tiga poin utama sebagai berikut:

1. Pertama, dari dimensi lingkungan, teknologi PV terbukti mampu mengurangi emisi gas rumah kaca secara signifikan selama fase operasionalnya dengan intensitas emisi siklus hidup jauh di bawah pembangkit fosil. Namun, penilaian ini tidak boleh berhenti pada fase operasional semata. Temuan lintas studi mengungkap bahwa fase produksi yang melibatkan material berbahaya (kadmium, timbal), permasalahan penggunaan lahan, kebutuhan air untuk pembersihan panel di wilayah kering, dan potensi limbah panel pada akhir masa pakai merupakan tekanan lingkungan nyata yang kerap diabaikan dalam analisis makro. Keberlanjutan PV secara ekologis, oleh karenanya, sangat bergantung pada efektivitas regulasi daur ulang, standar produksi ramah lingkungan, dan penerapan prinsip ekonomi sirkular dalam industri energi surya.

2. Kedua, dari dimensi ekonomi, penurunan dramatis nilai LCOE telah menempatkan PV sebagai salah satu sumber energi paling kompetitif secara global. Inovasi teknologi panel bifacial, multi-junction, dan sistem penyimpanan energi terus mendorong peningkatan nilai investasi. Meski demikian, tingginya biaya investasi awal terutama bila mencakup integrasi ESS masih menjadi hambatan signifikan yang mempengaruhi kelayakan finansial di skala mikro. Degradasi performa panel sebesar 0,5% per tahun juga menjadi faktor yang secara akumulatif berdampak pada IRR dan payback period dalam horizon investasi jangka panjang.

3. Ketiga, sintesis keseluruhan menunjukkan bahwa keberhasilan implementasi teknologi PV dalam konteks transisi energi global tidak cukup ditentukan oleh keunggulan teknis atau penurunan biaya semata. Diperlukan pendekatan yang terintegrasi: manajemen siklus hidup yang berkelanjutan, adopsi sistem energi hibrida yang kontekstual, serta dukungan kebijakan dan skema pembiayaan inovatif yang adaptif terhadap kondisi lokal khususnya di negara berkembang yang menghadapi tantangan akses energi sekaligus tekanan lingkungan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] M. Tawalbeh *et al.*, "Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook," *Science of the Total Environment*, vol. 759, p. 143528, 2021.

[2] L. D. Jathar, S. Ganesan, U. Awasarmol, K. Nikam, K. Shahapurkar, M. E. M. Soudagar, *et al.*, "Comprehensive review of environmental factors influencing the performance of photovoltaic panels: Concern over emissions at various phases throughout the lifecycle," *Environmental Pollution*, vol. 326, p. 121474, 2023.

[3] L. Koester, S. Lindig, A. Louwen, A. Astigarraga, G. Manzolini, and D. Moser, "Review of photovoltaic module degradation, field inspection techniques and techno-economic assessment," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 165, p. 112616, 2022.

[4] Y. Li, H. Li, R. Miao, H. Qi, and Y. Zhang, "Energy–environment–economy (3E) analysis of the performance of introducing photovoltaic and energy storage systems into residential buildings: A case study in Shenzhen, China," *Sustainability*, vol. 15, no. 11, p. 9007, 2023.

[5] A. Lakhouit, N. Alhathlaul, C. El Mokhi, and H. Hachimi, "Assessing the environmental impact of PV emissions and sustainability challenges," *Sustainability*, vol. 17, no. 7, p. 2842, 2025.

[6] K. Hasan, S. B. Yousuf, M. S. H. K. Tushar, B. K. Das, P. Das, and M. S. Islam, "Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review," *Energy Science & Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 656–675, 2022.

[7] R. M. Babu, M. S. Alam, A. Islam, and M. K. Islam, "Towards sustainable and clean energy futures: A techno-economic review of solar PV systems, challenges, and opportunities," *IEEE Access*, 2025.

[8] M. M. Hasan, S. Hossain, M. Mofijur, Z. Kabir, I. A. Badruddin, T. M. Yunus Khan, and E. Jassim, "Harnessing solar power: A review of photovoltaic innovations, solar thermal systems, and the dawn of energy storage solutions," *Energies*, vol. 16, no. 18, p. 6456, 2023.

[9] A. C. Lazaroiu, M. G. Osman, C. V. Strejoiu, and G. Lazaroiu, "A comprehensive overview of photovoltaic technologies and their efficiency for climate neutrality," *Sustainability*, vol. 15, no. 23, p. 16297, 2023.

[10] S. Mukhtar, S. Muhammad, H. A. Alyousef, W. Khan, R. Shah, and S. A. El-Tantawy, "Enviro-economic and optimal hybrid energy system: Photovoltaic–biogas–hydro-battery system in rural areas of Pakistan," *Heliyon*, vol. 10, no. 16, 2024.

[11] A. Saxena, C. Brown, A. Arneth, and M. Rounsevell, "Modelling the global photovoltaic potential on land and its sensitivity to climate change," *Environmental Research Letters*, vol. 18, no. 10, p. 104017, 2023.