

Kajian Awal Perbandingan Teknologi Tenaga Suria dan Aplikasi Optimumnya di Malaysia

Ainul Azniza, A.Z.^{1*}, Noraini Mohd Baidui¹, Nor Hamidah Yatim¹, Norwadiyah Mohd Andai¹, Muhammad Nabil bin Norazman¹, Mohamad Ammir Ibtisham¹

¹ Department of Mechanical Engineering, Politeknik Merlimau Melaka, 77300 Merlimau, Melaka

*Corresponding author E-mail: ainul@pmm.edu.my

Abstrak

Permintaan terhadap tenaga boleh diperbaharui semakin meningkat selari dengan usaha global untuk mengurangkan kebergantungan terhadap bahan api fosil dan menangani isu perubahan iklim. Tenaga suria dikenalpasti sebagai antara sumber paling berpotensi, namun kepelbagaian teknologi yang tersedia seperti sistem fotovoltaik (PV), kuasa suria tertumpu (CSP), panel bifacial, sistem suria terma dan panel nipis (thin film) menimbulkan cabaran dalam menentukan teknologi yang paling sesuai bagi aplikasi tertentu, terutamanya dalam konteks iklim tropika dan keperluan tenaga di Malaysia. Kajian ini bertujuan untuk menjalankan penilaian awal terhadap lima teknologi tenaga suria utama melalui pendekatan analisis literatur dan perbandingan kualitatif. Penilaian dibuat berdasarkan faktor seperti kecekapan tenaga, kos pemasangan dan penyelenggaraan, keperluan ruang, serta kesesuaian aplikasi di persekitaran tempatan. Dapatan kajian menunjukkan bahawa tiada satu teknologi yang paling unggul secara mutlak, sebaliknya setiap teknologi mempunyai kekuatan tersendiri mengikut konteks penggunaan. Sebagai contoh, teknologi PV sesuai untuk kediaman dan kawasan luar bandar, manakala CSP dan panel bifacial lebih efisien untuk ladang solar berskala besar. Kajian ini menyimpulkan bahawa pemilihan teknologi tenaga suria yang berpandukan kepada padanan aplikasi dapat meningkatkan kecekapan sistem, mengoptimalkan pelaburan dan menyokong peralihan negara ke arah masa depan tenaga yang lebih lestari.

Kata Kunci: Tenaga Suria, Teknologi Fotovoltaik, Kuasa Suria Tertumpu, Aplikasi Optimum, Malaysia

1.0 Pengenalan

Tenaga suria merupakan salah satu sumber tenaga boleh diperbaharui yang semakin mendapat perhatian global kerana keupayaannya mengurangkan pelepasan karbon, mengurangkan kebergantungan terhadap bahan api fosil dan menyokong agenda kelestarian alam sekitar. Sumber ini diperoleh daripada cahaya matahari yang ditukarkan kepada tenaga elektrik atau haba melalui pelbagai teknologi seperti sistem fotovoltaik (PV), kuasa suria tertumpu (CSP), sistem suria terma dan panel nipis (thin film) (Sarker et al., 2023). Malaysia, yang terletak berhampiran garisan Khatulistiwa, menerima purata pancaran suria antara 4 hingga 6 kWh/m² sehari sepanjang tahun, menjadikannya sangat sesuai untuk pembangunan teknologi tenaga suria (Safari et al., 2020). Usaha kerajaan Malaysia dalam memperkukuh sektor ini dapat dilihat melalui inisiatif seperti *Malaysia Renewable Energy Roadmap (MyRER)* dan program insentif seperti Feed-in Tariff (FiT) serta Net Energy Metering (NEM), yang telah mendorong pertumbuhan pesat dalam pemasangan sistem tenaga suria, terutamanya di sektor kediaman dan komersial (SEDA, 2023). Walau bagaimanapun, walaupun berlaku peningkatan dalam kadar penggunaan, pemilihan teknologi yang bersesuaian masih menjadi cabaran utama kerana terdapat pelbagai sistem dengan prestasi, kos dan keperluan infrastruktur yang berbeza-beza. Kekeliruan ini boleh mengakibatkan pelaburan yang tidak optimum serta prestasi sistem yang kurang efisien, justeru satu kajian komparatif diperlukan untuk memahami padanan teknologi yang paling sesuai dengan konteks dan keperluan tempatan (Zhao et al., 2018; Yeoh, 2021).

2.0 Sorotan Kajian

Tenaga suria telah menjadi antara bidang penyelidikan utama dalam usaha global untuk mempercepatkan peralihan kepada sumber tenaga boleh diperbaharui. Pelbagai kajian telah dilakukan untuk menilai prestasi, kos, dan kesesuaian pelaksanaan teknologi ini dalam konteks berbeza. Oleh itu, bahagian ini menghimpunkan dapatan-dapatan penting daripada kajian lepas yang berkaitan dengan prestasi teknologi, isu pemilihan aplikasi, serta faktor-

faktor kritikal yang mempengaruhi keberkesanan pelaksanaan sistem tenaga suria di peringkat nasional dan tempatan.

2.1 Kajian Prestasi dan Kecekapan Teknologi

Kajian oleh Zhao et al. (2018) meneliti kos pemasangan dan penyelenggaraan sistem PV serta mendapati bahawa lokasi, jenis panel dan kos infrastruktur memberi kesan langsung terhadap pelaburan dan prestasi keseluruhan sistem. Penemuan ini disokong oleh Sarker et al. (2023) yang membuat semakan menyeluruh terhadap prestasi sistem PV di Malaysia dan menekankan bahawa kecekapan sistem amat bergantung kepada konfigurasi teknikal dan kesesuaian reka bentuk dengan keadaan persekitaran. Sementara itu, Yeoh (2021) menunjukkan bahawa walaupun pengumpul tenaga suria plat rata mempunyai kecekapan tinggi dalam persekitaran terkawal, keupayaan penyesuaian kepada variasi suhu dan teduhan adalah cabaran utama yang menjejaskan prestasi sebenar.

2.2 Isu Pemilihan Teknologi Berdasarkan Aplikasi

Safari et al. (2020) menjalankan kajian kes di Mersing dan mendapati bahawa tahap penerimaan masyarakat luar bandar terhadap teknologi suria adalah tinggi apabila kos jangka panjang dan kestabilan bekalan menjadi faktor utama. Namun begitu, pemilihan teknologi yang tidak disesuaikan dengan konteks sosio-ekonomi setempat boleh menyebabkan ketidakefektifan pelaburan. Mohamed et al. (2022) turut mencadangkan bahawa penggunaan teknologi bifacial perlu disokong dengan reka bentuk pemasangan yang mengambil kira pantulan permukaan dan arah panel untuk memastikan kelebihan teknologi tersebut dapat dimanfaatkan secara maksimum.

2.3 Faktor Kesesuaian Teknologi sebagai Elemen Kritikal

Faktor-faktor seperti kos awal pelaburan, kesedaran pengguna, dan kecekapan sistem dalam pelbagai keadaan cuaca menjadi aspek utama dalam pemilihan teknologi tenaga suria (Zhao et al., 2018; Safari et al., 2020). Islam et al. (2019) menegaskan bahawa dalam konteks Malaysia, pemilihan teknologi seperti CSP harus berdasarkan kepada tahap Direct Normal Irradiance (DNI) dan keperluan penyimpanan tenaga haba, memandangkan teknologi ini hanya sesuai untuk aplikasi berskala besar dan kawasan terbuka yang menerima cahaya matahari langsung tanpa halangan.

2.4 Jurang Kajian dan Penyataan Masalah

Walaupun terdapat banyak kajian yang memfokuskan kepada satu-satu jenis teknologi, kajian perbandingan menyeluruh terhadap beberapa teknologi utama seperti PV, CSP, thermal, bifacial dan thin-film dalam konteks aplikasi tempatan masih terhad. Kebanyakan kajian terdahulu hanya memberi tumpuan kepada prestasi teknikal atau aspek pemasangan tanpa mempertimbangkan padanan optimum antara teknologi dan keperluan pengguna sebenar di Malaysia seperti kediaman, perindustrian, luar bandar, dan aplikasi mudah alih (Sulaiman et al., 2013; Rosnani, 2013). Oleh itu, wujud keperluan mendesak bagi satu kajian awal yang dapat menyusun dan membandingkan teknologi berdasarkan parameter praktikal untuk menyokong pemilihan teknologi yang lebih strategik.

3.0 Metodologi Kajian

3.1 Reka Bentuk Kajian

Kajian ini menggunakan pendekatan kualitatif deskriptif melalui analisis literatur dan perbandingan teknologi bagi menilai prestasi, kelebihan, kekangan serta kesesuaian aplikasi lima jenis teknologi tenaga suria utama. Pendekatan ini bersifat penerokaan (exploratory) yang sesuai digunakan untuk mengenal pasti pola, trend dan jurang

pengetahuan yang wujud berdasarkan data sekunder (Sarker et al., 2023; Sulaiman et al., 2013).

3.2 Kaedah Pengumpulan Data

Data bagi kajian ini diperoleh melalui dua sumber utama:

3.2.1 Kajian Literatur

Merangkumi artikel jurnal berwasit, laporan teknikal, dasar kerajaan seperti *Malaysia Renewable Energy Roadmap (MyRER)* serta dokumen dari agensi berkaitan seperti Suruhanjaya Tenaga, SEDA Malaysia dan IRENA. Dua artikel utama yang dijadikan rujukan utama ialah:

- i. Safari et al. (2020), yang membincangkan penerimaan masyarakat luar bandar terhadap teknologi solar dan faktor sosial yang menyumbang kepada pelaksanaan berjaya.
- ii. Zhao et al. (2018), yang menganalisis kos pemasangan dan penyelenggaraan sistem PV serta impaknya terhadap keberkesanan pelaburan.

3.2.2 Sumber Sekunder Tambahan

Kajian juga merujuk Sulaiman et al. (2013), yang menjalankan kaji selidik terhadap sikap rakyat Malaysia terhadap tenaga boleh diperbaharui, dan Yeoh (2021) yang menganalisis prestasi sistem pengumpul tenaga suria melalui pendekatan berangka. Pendekatan ini membolehkan triangulasi maklumat daripada pelbagai sumber.

4.0 Keputusan Kajian Dan Analisis

Kajian ini memfokuskan kepada penilaian komparatif lima teknologi tenaga suria utama yang sedang digunakan atau berpotensi untuk digunakan dalam konteks Malaysia. Penilaian dilakukan bagi mengenal pasti kekuatan, kelemahan dan kesesuaian setiap teknologi berdasarkan pelbagai kriteria teknikal dan praktikal yang relevan dengan keadaan persekitaran tempatan. Lima teknologi yang dianalisis dalam kajian ini ialah:

- i. Photovoltaic (PV) Solar Systems
- ii. Concentrated Solar Power (CSP)
- iii. Solar Thermal Systems
- iv. Bifacial Solar Panels
- v. Thin-Film Solar Panels

Setiap teknologi ini dianalisis berdasarkan indikator berikut:

- i. Kecekapan tenaga dan prestasi
- ii. Kos pemasangan dan penyelenggaraan
- iii. Keperluan infrastruktur dan ruang
- iv. Kesesuaian dengan iklim dan geografi Malaysia
- v. Kesesuaian dengan aplikasi seperti kediaman, industri, luar bandar dan sistem mudah alih

Melalui pendekatan ini, kajian bertujuan untuk mengenal pasti padanan teknologi-aplikasi yang paling optimum bagi menyokong pelaksanaan tenaga suria yang efisien dan lestari di Malaysia.

4.1 Analisis Perbandingan Teknologi

Analisis dilakukan secara perbandingan berdasarkan kriteria utama dan dibentangkan dalam bentuk jadual (Rujuk Jadual 1), seperti yang digunakan dalam pendekatan oleh Sarker et al. (2023).

Jadual 1: Kadar Pertumbuhan Ekonomi

Teknologi	Kecekapan (anggaran)	Kos Pemasangan	Kelebihan	Kekangan	Aplikasi Paling Sesuai
Photovoltaic (PV)	15–22%	Sederhana	Kos semakin menurun, mudah dipasang, sesuai untuk pelbagai skala	Prestasi menurun pada suhu tinggi, bergantung kepada cahaya terus	Kediaman, komersial, luar bandar
Concentrated Solar Power (CSP)	25–35%	Tinggi	Kecekapan tinggi, boleh simpan haba untuk penggunaan malam	Perlukan kawasan besar dan cahaya matahari langsung, kos tinggi	Loji kuasa berskala besar
Solar Thermal Systems	30–70% (pemanasan)	Rendah ke Sederhana	Sesuai untuk pemanasan air dan proses industri, sistem mudah	Tidak sesuai untuk penjaan elektrik berskala besar	Pemanasan air domestik, proses industri
Bifacial Solar Panels	+10–20% berbanding PV	Tinggi	Serap cahaya dari dua arah, lebih efisien di permukaan reflektif	Kos tinggi, perlukan orientasi dan permukaan khas	Ladang solar, kawasan bandar
Thin-Film Solar Panels	10–12%	Rendah	Fleksibel, ringan, sesuai untuk permukaan tidak rata	Kecekapan rendah, jangka hayat pendek	Permukaan reflektif, Peranti mudah alih, bumbung struktur ringan

Sumber: Disusun berdasarkan Zhao et al. (2018) dan Safari et al. (2020) serta perbandingan teknikal umum dalam pasaran semasa.

Anggaran kecekapan boleh berubah bergantung kepada model, jenama dan keadaan pemasangan sebenar.

4.2 Pemetaan Kesesuaian Aplikasi (Application-Technology Fit Mapping)

Kaedah ini digunakan untuk memadankan setiap teknologi dengan aplikasi paling sesuai, berdasarkan faktor tempatan seperti pencahayaan, bentuk muka bumi, dan tahap ekonomi pengguna (Yeoh, 2021; Sulaiman et al., 2013).

Jadual 2: Kadar Pertumbuhan Ekonomi

Konteks Aplikasi	PV Solar	CSP	Solar Thermal	Bifacial Panel	Thin-Film Panel
Kediaman (Individu / Lot Teres)	✓ Sesuai	✗ Tidak Sesuai	✓ Sesuai	✗ Perlukan permukaan reflektif	✓ Sesuai
Komersial (pejabat / kedai)	✓ Sesuai	✗ Tidak Sesuai	✓ Sesuai	✓ Jika ada permukaan reflektif	✗ Kurang Sesuai
Perindustrian / Kilang	✓ Sesuai	✓ Sesuai	✓ Sesuai	✓ Sesuai	✗ Kurang Sesuai
Ladang Solar Berskala Besar	✓ Sesuai	✓ Sangat Sesuai	✗ Tidak Sesuai	✓ Sesuai	✗ Tidak Sesuai

Kawasan Luar Bandar / Terpencil	✓ Sangat Sesuai	✗ Tidak Praktikal	✓ Sesuai	✗ Kos Tinggi	✓ Sesuai
Sistem Mudah Alih / Portable	✗ Tidak Praktikal	✗ Tidak Sesuai	✗ Tidak Sesuai	✗ Berat dan Mahal	✓ Sangat Sesuai

Penjelasan Simbol:

✓ **Sesuai:** Teknologi selaras dengan keperluan aplikasi dan persekitaran.

✗ **Tidak Sesuai:** Tidak praktikal dari aspek kos, keperluan ruang atau prestasi.

5.0 Kesimpulan

Kajian ini telah menjalankan penilaian awal terhadap lima teknologi tenaga suria utama iaitu sistem fotovoltai (PV), kuasa suria tertumpu (CSP), sistem suria terma, panel bifacial dan panel nipis (thin film). Melalui pendekatan kualitatif deskriptif dan kajian literatur, perbandingan dilakukan berdasarkan prestasi, kos, keperluan pemasangan dan kesesuaian konteks aplikasi di Malaysia.

Hasil perbandingan menunjukkan bahawa tiada satu teknologi yang paling unggul untuk semua situasi. Sebaliknya, setiap teknologi mempunyai kekuatan tersendiri bergantung kepada keperluan penggunaan dan keadaan persekitaran. Sebagai contoh, teknologi PV adalah paling fleksibel dan sesuai untuk pelbagai skala, manakala CSP lebih berkesan untuk loji berskala besar yang mempunyai pencahayaan langsung tinggi dan kawasan tanah luas. Panel bifacial pula menawarkan kecekapan tambahan di kawasan dengan permukaan reflektif, manakala panel nipis lebih sesuai untuk struktur ringan atau sistem mudah alih.

Secara keseluruhannya, pemilihan teknologi yang tepat mestilah dibuat berdasarkan padanan antara teknologi dan aplikasi sebenar. Ini bertepatan dengan dapatan dari Yeoh (2021) dan Sulaiman et al. (2013) yang menekankan bahawa keberkesanan sistem tenaga suria sangat bergantung kepada konteks pemasangan dan faktor persekitaran tempatan. Selain itu, Safari et al. (2020) juga menunjukkan bahawa faktor sosial seperti penerimaan komuniti turut memainkan peranan penting dalam kejayaan pelaksanaan sistem solar di Malaysia.

6.0 Cadangan Penambahbaikan

Bagi memperkukuh dapatan kajian ini, kajian lanjutan disarankan untuk dijalankan secara empirikal di tapak sebenar bagi menilai prestasi teknologi tenaga suria dalam keadaan sebenar iklim, orientasi pemasangan dan beban penggunaan. Selain itu, simulasi menggunakan perisian seperti PVsyst atau SAM juga dicadangkan untuk menganalisis output tenaga, keberkesanan dan pulangan pelaburan secara kuantitatif berdasarkan data iradiasi tempatan. Penilaian lanjut terhadap faktor sosioekonomi pengguna dan kesan dasar semasa seperti Feed-in Tariff (FiT) dan Net Energy Metering (NEM) perlu dilakukan bagi memahami tahap penerimaan serta halangan pelaksanaan sistem suria di pelbagai peringkat komuniti. Seterusnya, pembangunan satu garis panduan atau matriks pemilihan teknologi tenaga suria yang praktikal bagi kategori pengguna yang berbeza boleh membantu pemilik bangunan dan perancang tenaga membuat keputusan yang lebih strategik. Akhir sekali, kajian masa hadapan juga boleh meneliti potensi integrasi teknologi suria dengan sistem penyimpanan tenaga dan grid pintar bagi meningkatkan kecekapan sistem secara menyeluruh.

Penghargaan

Setinggi-tinggi penghargaan ditujukan kepada POLITEKNIK MERLIMAU, MELAKA atas sokongan berterusan, kemudahan yang disediakan serta peluang yang diberikan sepanjang pelaksanaan kajian ini. Sokongan daripada pihak institusi amat penting dalam memastikan kelancaran penyelidikan ini dan kejayaan pembangunan projek yang dijalankan.

Rujukan

- Ali, H. M., Saeed, M. S., & Rehman, S. (2024). Techno-economic analysis of thin-film solar modules in low irradiance regions: A case study from Southeast Asia. **Energy Reports*, 10*, 2034–2045. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2024.03.019>
- Ha, S., Zhou, Z., Im, E.-S., & Lee, Y.-M. (2023). Comparative assessment of future solar power potential based on CMIP5 and CMIP6 multi-model ensembles. *Renewable Energy*, 206, 324–335.
- Islam, M., Huda, N., & Saidur, R. (2019). Current energy mix and techno-economic analysis of concentrating solar power (CSP) technologies in Malaysia. *Renewable Energy*, 140, 107–121.
- Mohamed, N. S. S., Sulaiman, S. I., & Abdul Rahim, S. R. (2022). Energy yield prediction of a bifacial PV system with a miniaturized test array. *ResearchGate*.
- Rosnani, A. (2013). A review of concentrating solar power (CSP) in Malaysian environment. *International Journal of Engineering and Advanced Technology (IJEAT)*, 3(2), 378–382.
- Safari, M. A. M., Masseran, N., Jedi, A., Mat, S., Sopian, K., Bin Abdul Rahim, A., & Zaharim, A. (2020). Rural public acceptance of wind and solar energy: A case study from Mersing, Malaysia. *Energies*, 13(15), 3855.
- Sarker, M. T., Haram, M. H. S. M., Ramasamy, G., Al Farid, F., & Mansor, S. (2023). Solar photovoltaic home systems in Malaysia: A comprehensive review and analysis. *Energies*, 16(23), 7718.
- Shukla, A. K., Sudhakar, K., & Baredar, P. (2023). Performance analysis of bifacial photovoltaic module under varying albedo conditions in tropical environment. **Renewable Energy*, 212*, 856–865. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2023.05.011>
- SEDA. (2023). *Net energy metering programme overview*. Sustainable Energy Development Authority Malaysia.
- Sulaiman, M. Y., Hussain, H., Othman, M. Y., & Amin, N. (2013). Study on Malaysian's perspective towards renewable energy mainly in the solar energy sector by conducting a survey study. *Energy Procedia*, 42, 219–226.
- Yeoh, P. T. (2021). *Analisis persembahan pengumpul tenaga suria plat rata* [Tesis Sarjana, Universiti Sains Malaysia]. EPrints USM.
- Zhao, Y., Sun, H., & Wang, T. (2018). Cost analysis of solar PV systems: A case study on maintenance and installation factors. *International Journal of Energy Economics and Policy*, 8(4), 255–262.