

STUDI EKSPERIMENTAL PENGGUNAAN HALF-BRIDGE CONVERTER PADA SISTEM PENGHASIL LISTRIK THERMOELECTRIC GENERATOR

Fajar Maulana Yanuar ¹, Ibrohim ², Arif Widodo ³,
Hesti Khuzaimah Nurul Yusufiyah ⁴

S1 Teknik Elektro Universitas Negeri Surabaya

Alamat e-mail fajarmaulana.22028@mhs.unesa.ac.id

Abstract (English)

The application of Thermoelectric Generators (TEGs) for waste heat recovery is constrained by small and fluctuating output voltages. This quantitative experimental study aims to analyze the performance of a Half-Bridge Converter in boosting and stabilizing the output voltage of TEGs, as well as comparing its performance with a Boost Converter. Data were obtained from 10 series-connected SP1848-27145-SA TEG modules heated by a PTC heater (30°C–120°C) and cooled by a water block. Testing was conducted using a Half-Bridge Converter based on the TL494 IC controller, IRFZ44N MOSFETs, and an EE35 ferrite transformer under various resistive loads. The results showed that the Seebeck sensitivity of the TEG array was 140.9mV/°C. The Half-Bridge Converter exhibited Under-Voltage Lockout (UVLO) at $\Delta T < 51^\circ\text{C}$ ($V_{in} < 8.65\text{V}$) and precisely regulated the output voltage between 24.7V and 24.8V (a variation of 0.403%) for ΔT from 51°C to 90°C, achieving a maximum output power of 234.84mW. While the Boost Converter achieved higher efficiency under light loads, the Half-Bridge Converter demonstrated superior stability under heavy loads and better voltage regulation. In conclusion, the Half-Bridge Converter successfully boosted and stabilized the TEG output voltage. Further research is recommended to incorporate Maximum Power Point Tracking (MPPT) and optimize the transformer turn ratio to improve system efficiency at low input voltages.

Article History

Submitted: 27 Juli 2026

Accepted: 30 Juli 2026

Published: 31 Juli 2026

Key Words

Thermoelectric Generator, Half-Bridge Converter, Boost Converter, TL494 IC, Seebeck Effect, Voltage Regulation.

Abstrak (Indonesia)

Penggunaan *Thermoelectric Generator* (TEG) sebagai pemanfaat energi panas buangan terkendala oleh tegangan keluaran yang kecil dan fluktuatif. Penelitian eksperimental kuantitatif ini bertujuan menganalisis performa *Half-Bridge Converter* dalam menaikkan dan menstabilkan tegangan TEG serta membandingkannya dengan *Boost Converter*. Data diperoleh dari 10 modul TEG SP1848-27145-SA terhubung seri yang dipanaskan pemanas PTC (30°C–120°C) dan didinginkan *water block*. Pengujian menggunakan *Half-Bridge Converter* berbasis IC TL494, MOSFET IRFZ44N, dan transformator EE35 dengan variasi beban resistif. Hasil penelitian menunjukkan sensitivitas Seebeck TEG sebesar 140,9mV/°C. *Half-Bridge Converter* memiliki UVLO pada $\Delta T < 51^\circ\text{C}$ ($V_{in} < 8,65\text{V}$) dan mampu meregulasi tegangan keluaran secara presisi pada 24,7V–24,8V (variasi 0,403%) saat ΔT 51°C hingga 90°C dengan daya maksimum 234,84mW. *Boost Converter* lebih efisien pada beban ringan, sedangkan *Half-Bridge* lebih stabil pada beban berat dan regulasi tegangan. Simpulannya, *Half-Bridge Converter* berhasil menaikkan dan menstabilkan tegangan keluaran TEG. Disarankan penambahan MPPT dan optimasi rasio lilitan transformator untuk penelitian selanjutnya.

Sejarah Artikel

Submitted: 27 Juli 2026

Accepted: 30 Juli 2026

Published: 31 Juli 2026

Kata Kunci

Thermoelectric Generator, Half-Bridge Converter, Boost Converter, IC TL494, Efek Seebeck, Regulasi Tegangan.

Pendahuluan

Seiring meningkatnya kebutuhan energi dan dampak negatif bahan bakar fosil, pengembangan energi alternatif seperti *Thermoelectric Generator* (TEG) menjadi sangat krusial (Gielen et al., 2019). TEG memanfaatkan Efek Seebeck untuk mengonversi energi panas menjadi listrik, namun tegangan keluarannya relatif kecil sehingga membutuhkan konverter daya untuk menstabilkan dan memaksimalkan transfer energi ke beban (Jaziri et al., 2020; Andini et al., 2023). Salah satu topologi yang dapat digunakan adalah *half-bridge*

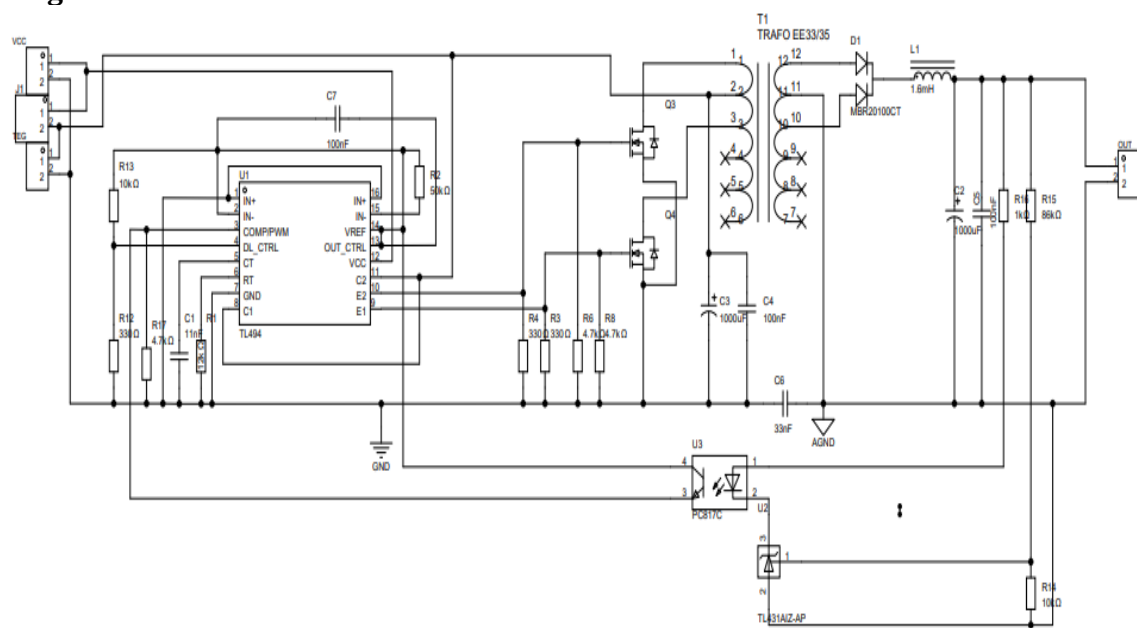
converter berbasis kontrol PWM dan sakelar ganda MOSFET (Zhu, 2021; Wang, 2023). Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja *half-bridge converter* dalam menaikkan serta mengatur daya listrik keluaran dari susunan modul TEG.

Metode Penelitian

A. Jenis atau desain penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian eksperimental dengan pendekatan kuantitatif. Eksperimen dilakukan melalui tahapan perancangan, pembuatan, dan pengujian rangkaian *Half-bridge converter* yang menggunakan tegangan masukan (*input*) dari susunan TEG. Hasil penelitian ini berupa analisis terhadap tegangan dan arus keluaran (*output*), yang kemudian digunakan untuk menentukan karakteristik performa dari *Half-bridge converter* tersebut saat disuplai oleh TEG.

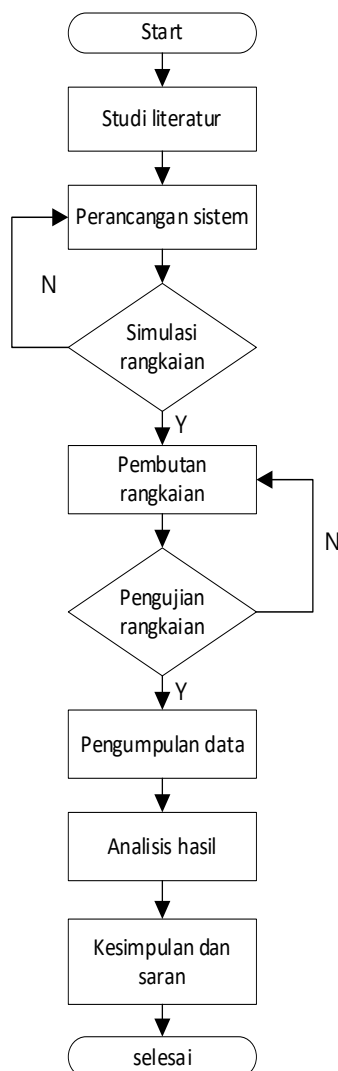
B. Rangkaian



Gambar 1 rancangan rangkaian

Rancangan rangkaian konverter *Half-bridge* yang akan digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar. *Input* dari rangkaian ini adalah TEG yang dirangkai secara seri sehingga tegangan yang dikeluarkan ± 12 V. Dalam pengujian ini, sisi panas pada modul TEG dikondisikan menggunakan elemen pemanas yang suhunya dikontrol menggunakan *microcomputer thermostat*, sementara sisi dinginnya menggunakan *water block*. Untuk mengolah energi yang dihasilkan, Sistem ini didukung oleh rangkaian konverter yang menggunakan IC TL494 sebagai pengendali *Pulse Width Modulation* (PWM). Selain itu, komponen MOSFET IRFZ44N digunakan sebagai sakelar daya (*switching component*) utama untuk mengoperasikan transformator pada frekuensi tinggi.

C. Diagram Alir Penelitian



D. Teknik analisis data

Analisis performa sistem dilakukan melalui dua tahapan utama:

1. Perhitungan Daya Keluaran Konverter

Pengukuran tegangan (V_{out}) dan arus (I_{out}) keluaran *Half-bridge converter* dilakukan menggunakan multimeter digital. Besarnya daya keluaran (P_{out}) kemudian dihitung menggunakan persamaan:

$$P_{out} = V_{out} \cdot I_{out}$$

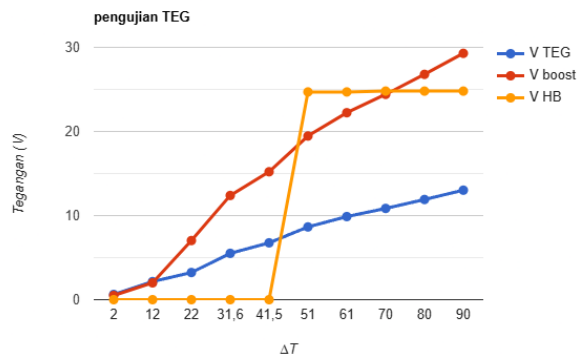
Keterangan: P_{out} adalah daya keluaran (W), V_{out} adalah tegangan keluaran (V), dan I_{out} adalah arus keluaran (A).

2. Evaluasi Kestabilan Tegangan dan Pengaruh Pembebanan

Kestabilan tegangan dinilai berdasarkan kemampuan konverter dalam mempertahankan tegangan referensi 24V pada batas toleransi $\pm 5\%$ (22,8 V - 25,2V). Pengujian dilakukan dengan memberikan variasi beban resistif secara logaritmik rentang $10k\Omega$ hingga 12Ω untuk merepresentasikan kondisi beban ringan hingga berat. Respon tegangan dan transfer daya dari TEG ke sisi keluaran konverter kemudian dianalisis untuk mengamati pengaruh fluktuasi beban.

Hasil dan Pembahasan

A. Pengujian TEG

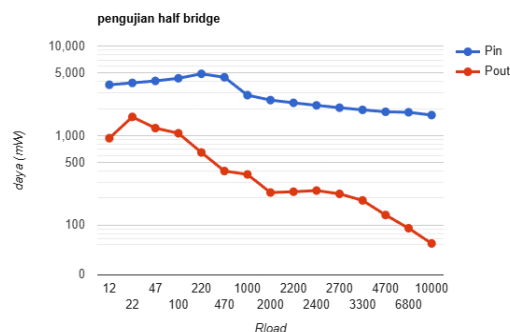


Gambar 2 pengujian TEG

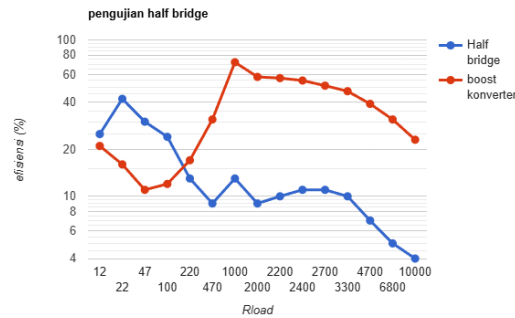
Pengujian menunjukkan bahwa tegangan keluaran dari susunan 10 modul TEG seri meningkat secara linier seiring kenaikan perbedaan suhu (ΔT), sesuai dengan prinsip Efek Seebeck. Berdasarkan kalkulasi rasio perubahan tegangan terhadap suhu, diperoleh nilai koefisien Seebeck gabungan (α_{avg}) sebesar $\approx 0,141$ V/°C (sensitivitas rata-rata $\approx 14,09$ mV/°C per modul), di mana tegangan masukan maksimum mencapai 13,02 V pada $\Delta T = 90,0^\circ\text{C}$. Boost converter memiliki keunggulan pada batas aktivasi minimum yang rendah karena mampu merespons sejak $\Delta T = 22,0^\circ\text{C}$ ($V_{in} = 3,23$ V), namun tegangannya terus melonjak tanpa regulasi (unregulated) hingga mencapai 29,29 V.

Sebaliknya, Half-Bridge converter memiliki daerah mati (cut-off region / 0 V) pada rentang $\Delta T = 2,0^\circ\text{C} - 41,5^\circ\text{C}$ ($V_{in} = 0,62$ V - 6,76 V) akibat kondisi Under-Voltage Lockout (UVLO) pada pengendali PWM dan gate driver. Konverter baru aktif pada $\Delta T = 51,0^\circ\text{C}$ ($V_{in} = 8,65$ V) dengan menghasilkan tegangan 24,7 V dan secara presisi mengunci (clamping) tegangan keluaran pada rentang 24,7 V - 24,8 V meskipun masukan TEG terus meningkat. Dengan variasi regulasi yang sangat kecil (0,403%), sistem kontrol PWM pada topologi Half-Bridge terbukti efektif menyesuaikan duty cycle secara dinamis untuk menyuplai keluaran terisolasi (galvanic isolation) yang stabil pada target ≈ 24 V DC.

B. Pengujian Half bridge konverter terhadap perubahan beban.



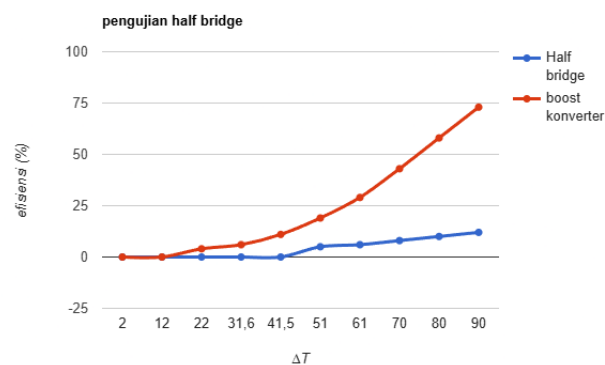
Gambar 3 pengujian terhadap beban



Gambar 4 efisiensi terhadap beban

Pengujian pembebanan konstan pada suhu uji 110°C ($\Delta T \approx 90^{\circ}\text{C}$) menunjukkan bahwa Half-Bridge converter mampu menjaga tegangan keluaran tetap teregulasi stabil pada rentang 24,7 V - 24,8 V mulai dari beban ringan 10 k Ω hingga 2,7 k Ω . Konverter ini mencapai kondisi daya kerja optimal pada pembebanan 2,2 k Ω dengan tegangan keluaran sebesar 22,8 V (masih masuk dalam batas toleransi target) yang menghasilkan daya keluaran puncak sebesar 234,84 mW pada konsumsi daya masukan 195 mW. Namun, ketika diberi beban resistif yang lebih berat (di bawah 100 Ω), tegangan keluaran mengalami penurunan (*drop*) hingga 3,2 V akibat keterbatasan arus masukan dari TEG serta batas saturasi pada komponen penyaklaran dan transformator ferit. Hasil perbandingan efisiensi menunjukkan bahwa Boost converter unggul pada kondisi beban ringan (mencapai efisiensi hingga 72% pada beban 1 k Ω) karena struktur kaskade komponennya yang sederhana dengan rugi penyaklaran (*switching losses*) yang minimal. Sebaliknya, Half-Bridge converter mencatatkan performa efisiensi yang lebih unggul saat menangani kondisi pembebanan berat (mencapai efisiensi hingga 42% pada beban 22 Ω , dibandingkan Boost converter yang hanya 16%). Hal ini membuktikan bahwa struktur Half-Bridge terbukti lebih handal dalam membagi beban tegangan (*voltage stress*) secara merata pada sakelar daya ketika menyuplai arus yang lebih besar.

C. Pengujian Half bridge konverter terhadap perubahan suhu dengan beban 2,2K Ω .



Gambar 5 pengujian terhadap suhu

Pengujian perubahan suhu pada beban puncak optimal 2,2 k Ω menunjukkan bahwa Half-Bridge converter membutuhkan tegangan aktivasi minimum (*start-up voltage*) sebesar 8,65 V (pada $\Delta T = 51^{\circ}\text{C}$) untuk mulai beroperasi, akibat tingginya konsumsi daya awal untuk mengatasi rugi penyaklaran (*switching losses*) serta *gate driver* pada dua sakelar MOSFET. Saat baru teraktivasi, konverter menyerap arus

masukannya sebesar 235 mA dengan efisiensi awal 5% (daya keluaran 99,6 mW pada tegangan 14,8 V). Seiring meningkatnya ΔT hingga 90°C ($V_{in} = 13,02$ V), kinerja Half-Bridge converter terus meningkat secara bertahap hingga mampu menghasilkan tegangan keluaran 24,5 V (mendekati target regulasi) dengan daya keluaran puncak sebesar 272,93 mW dan efisiensi maksimum 12%.

Sebaliknya, Boost converter menunjukkan tingkat responsivitas yang jauh lebih tinggi pada gradien suhu rendah karena sudah mampu aktif dan memanen energi sejak tegangan masukan 3,23 V (pada $\Delta T = 22^\circ\text{C}$) dengan efisiensi awal 4%. Pada tingkat tegangan masukan yang sama ($V_{in} = 8,65$ V), Boost converter membutuhkan arus masukan yang jauh lebih rendah (95 mA) dibandingkan Half-Bridge converter (235 mA), serta mampu mencatatkan efisiensi yang lebih tinggi sebesar 19% ($P_{out} = 155,58$ mW). Hal ini membuktikan bahwa Boost converter lebih unggul dalam memanen energi TEG pada kondisi beda suhu kecil, sementara Half-Bridge converter membutuhkan ambang batas suhu yang lebih tinggi untuk mencapai titik kerja regulasi tegangannya.

Kesimpulan dan Saran

A. Kesimpulan

Secara keseluruhan, penggunaan *Half-Bridge converter* pada sistem TEG menghasilkan efisiensi konversi yang relatif rendah (5% hingga 12%) dibanding *Boost converter* (mencapai puncak 73%), karena memerlukan tegangan penyalakan awal (*start-up voltage*) yang tinggi sebesar 8,65 V untuk memenuhi batas operasional minimum IC pengendali PWM (TL494). Pada tegangan masukan puncak 13,02 V, *Half-Bridge converter* mampu meregulasi tegangan dari 14,8 V hingga 24,5 V dengan daya keluaran maksimum 272,93 mW, sedangkan *Boost converter* lebih unggul dalam memanen energi sejak tegangan masukan rendah (3,23 V) dan menghasilkan daya puncak hingga 387,48 mW. Walaupun kurang efisien pada kondisi daya mikro dan beban ringan akibat tingginya rugi penyaklaran (*switching losses*), topologi *Half-Bridge* terbukti lebih unggul saat menangani beban berat karena mampu membagi tekanan tegangan (*voltage stress*) secara merata pada kedua sakelar dayanya sehingga menekan rugi konduksi dan thermal stress.

B. Saran

Untuk pengembangan penelitian selanjutnya, pengoptimuman sistem penerima panas TEG disarankan menggunakan plat penyebar panas tembaga/aluminium yang lebih tebal serta elemen pemanas dengan luas permukaan yang presisi sesuai dimensi total susunan modul. Pengendalian suhu uji sebaiknya menerapkan pengontrol berbasis PID atau *dimmer* (SSR) untuk meningkatkan akurasi dan kestabilan gradien suhu selama pengujian. Selain itu, penggunaan IC *driver* atau pengendali PWM dengan ambang batas tegangan operasional yang lebih rendah sangat direkomendasikan pada topologi *Half-Bridge*, agar sistem konverter tetap dapat teraktivasi dan bekerja optimal meskipun pada kondisi beda suhu yang masih rendah.

Daftar Pustaka

- Al-Badrani, H., Ameen, Y. M. Y., & Abdul Kadir, M. N. (2021). An AC/DC switch mode power supply based on half bridge DC/DC converter for low power applications. *2021 12th International Renewable Energy Congress, IREC 2021*. <https://doi.org/10.1109/IREC52758.2021.9624938>
- All About Circuits. (2015, June 6). *Analysis of Four DC-DC Converters in Equilibrium*.
- Almeida, J., Mendonça dos Santos, P., Caldinhas Vaz, J., Marques Lameirinhas, R. A., Pinho Correia Valério Bernardo, C., & Torres, J. P. N. (2024). Step-Up DC-DC Converter

- Supplied by a Thermoelectric Generator for IoT Applications. *Energies*, 17(21). <https://doi.org/10.3390/en17215288>
- Andini, D. P., Saefudin, D., Handayani, P., Sugiarta, Y. G., Vauzia, F., & Suyanto, S. (2023). Desain dan implementasi rangkaian konverter jenis non-isolated buck and boost DC-DC. *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, Dan Listrik Tenaga)*, 3(3). <https://doi.org/10.35313/jitel.v3.i3.2023.247-254>
- Arief Juarsah, M., Facta, M., & Nugroho, A. (2015). Perancangan DC Chopper tipe Buck-Boost Converter Penguatan Umpan Balik IC TL 494. *Transient (Jurnal Ilmiah Teknik Elektro)*, 4(3).
- Benmiloud, M., Belkhiri, M., & Benalia, A. (2025). Design and Evaluation of a Double-Loop ADRC Scheme for DC-DC Push-Pull Converters. *Proceedings - 2025 6th International Conference on Power Electronics and Their Applications, ICPEA 2025*. <https://doi.org/10.1109/ICPEA68903.2025.11453110>
- Dionova, B. W., Devan Junesco Vresdian, Dian Nugraha, Arief Janeul, Abir Oktaviani, & M.N.Mohammed. (2025). The Efficiency of MPPT in Mitigating the Effects of Partial Shading on Power Stability through the MPNO Method. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*. <https://doi.org/10.25077/jnte.v14n1.1249.2025>
- Flores, J. V, Pereira, L. F. A., da Silva Jr. J. M., Bonan, G., & Coutinho, D. F. (2010). {LMI}-Based designed of robust repetitive controllers for {UPS} systems. *Congresso Brasileiro Automática, 2010. {CBA} 2010.*, 4104–4109.
- Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy Strategy Reviews*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2019.01.006>
- Gina Maulina, N., Wiryajati, I. K., & Wahyu Satiawan, I. N. (2024). Peningkatan Kinerja Cuk Konverter Berbasis Kontroler Konvensional Dengan Metode Persamaan Linier. *Action Research Literate*, 8(5). <https://doi.org/10.46799/ar.v8i5.333>
- Hackatronic. (2026, June 15). *Comparison of Half-Wave, Center-Tapped Full-Wave, and Bridge Rectifiers*.
- Jagadeesh, I., & Indragandhi, V. (2022). Comparative Study of DC-DC Converters for Solar PV with Microgrid Applications. In *Energies* (Vol. 15, Issue 20). <https://doi.org/10.3390/en15207569>
- Jaziri, N., Boughamoura, A., Müller, J., Mezghani, B., Tounsi, F., & Ismail, M. (2020). A comprehensive review of Thermoelectric Generators: Technologies and common applications. In *Energy Reports* (Vol. 6). <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.12.011>
- Jouhara, H., Żabnieńska-Góra, A., Khordehgah, N., Doraghi, Q., Ahmad, L., Norman, L., Axcell, B., Wrobel, L., & Dai, S. (2021). Thermoelectric generator (TEG) technologies and applications. In *International Journal of Thermofluids* (Vol. 9). <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2021.100063>
- Mezouari, M., Megrini, M., & Gaga, A. (2025). High efficiency DC–DC converter for renewable energy integration and energy storage applications: A review of topologies and control strategies. *Control Engineering Practice*, 162, 106371. <https://doi.org/10.1016/J.CONENGPRAC.2025.106371>
- Mudawari, A. (2021). KONVERTER DC-DC PENURUN TEGANGAN DUA FASA. *Jurnal Teknik Energi*, 11(1). <https://doi.org/10.35313/energi.v11i1.3500>
- Priyanto, Y. T. K., Matarru, A. A., Dewanto, M. R., & Wahyudi, R. (2023). Desain dan Simulasi Konverter Tiga Fasa AC – DC pada Pico Hydro. *Jurnal Sistim Informasi Dan Teknologi*. <https://doi.org/10.37034/jsisfotek.v5i1.194>
- Prunet, G., Pawula, F., Fleury, G., Cloutet, E., Robinson, A. J., Hadziioannou, G., & Pakdel, A. (2021). A review on conductive polymers and their hybrids for flexible and wearable thermoelectric applications. *Materials Today Physics*, 18, 100402.

<https://doi.org/10.1016/J.MTPHYS.2021.100402>

- Zhang, B., Tang, W., Liang, J., Zhang, L., & Zhao, C. (2024). EV Integration-Oriented DC Conversion of AC Low-Voltage Distribution Networks and the Associated Adaptive Control Strategy. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 10(1), 213–223. <https://doi.org/10.1109/tte.2023.3254372>
- Zhu, B., Hu, S., Liu, G., Huang, Y., & She, X. (2020). Low-Voltage Stress Buck-Boost Converter with a High-Voltage Conversion Gain. *IEEE Access*, 8. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2995889>