

BAB II

Tinjauan Pustaka

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Thermoelectric Generator

Thermoelektrik Generator (TEG) adalah perangkat *solid-state* (tidak memiliki bagian yang bergerak) yang mampu mengubah energi panas (perbedaan suhu) secara langsung menjadi energi listrik arus searah (DC). Teknologi ini bekerja berdasarkan prinsip termodinamika di mana aliran panas yang melewati material semikonduktor akan membangkitkan pergerakan pembawa muatan listrik.

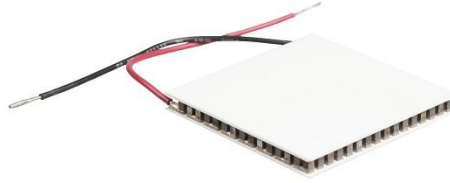
Berbeda dengan generator konvensional yang menggunakan sistem rotasi dan induksi elektromagnetik, TEG tidak memerlukan pemeliharaan tinggi, bebas emisi suara, dan memiliki dimensi yang ringkas, sehingga sangat ideal untuk aplikasi pemanenan energi (*energy harvesting*) dari panas buang.

Tabel 2. 1 Spesifikasi TEG

Spesifikasi	Keterangan
Model	SP1848-27145
Ukuran	40mm x 40mm x 4mm
Kisaran Suhu Operasional	-30°C hingga +120°C
Suhu Maksimum Sisi Panas	150°C (JANGAN MELEBIHI)
Kabel Timbal	~12 inci (30 cm), terisolasi (Merah +, Hitam -)
Identifikasi Sisi Dingin	Sisi dengan tulisan tercetak
Identifikasi Sisi Panas	Sisi kosong (tanpa tulisan)

Tabel 2. 2 Spesifikasi keluaran TEG

ΔT (°C)	Tegangan Sirkuit Terbuka (V)	Arus Hubung Singkat (mA)	Daya (mW)*
20	0.97 V	225 Ma	218.25 mW
40	1.8 V	368 mA	662.40 mW
60	2.4 V	469 mA	1125.60 mW
80	3.6 V	558 mA	2008.80 mW
100	4.8 V	669 mA	3211.20 mW



Gambar 2. 1 Thermoelectric Generator

1) Prinsip Efek Seebeck

Thermoelectric Generator (TEG) merupakan perangkat konversi energi yang mampu mengubah energi panas secara langsung menjadi energi listrik melalui fenomena termoelektrik. Teknologi ini bekerja tanpa komponen mekanik yang bergerak sehingga memiliki tingkat keandalan yang tinggi, kebutuhan perawatan yang rendah, serta umur operasi yang relatif panjang. Salah satu fenomena termoelektrik yang menjadi dasar kerja TEG adalah Efek Seebeck.

Efek Seebeck terjadi ketika dua material konduktor atau semikonduktor yang berbeda dihubungkan membentuk suatu rangkaian tertutup dan kedua sambungan material tersebut berada pada temperatur yang berbeda. Kondisi ini menyebabkan terjadinya perpindahan pembawa muatan dari daerah bertemperatur tinggi menuju daerah bertemperatur rendah sehingga menghasilkan beda potensial listrik pada terminal keluaran material tersebut.

Pada modul TEG, fenomena tersebut diperoleh melalui susunan pasangan semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang dihubungkan secara seri secara elektrik dan paralel secara termal. Ketika sisi panas (*hot side*) menerima energi panas dan sisi dingin (*cold side*) berada pada temperatur yang lebih rendah, maka elektron dan hole akan bergerak mengikuti gradien temperatur sehingga menghasilkan tegangan listrik.

Secara matematis hubungan antara tegangan keluaran TEG dan perbedaan temperatur dapat dituliskan sebagai:

$$V_{TEG} = \alpha \Delta T$$

dengan:

$$\Delta T = T_h - T_c$$

dimana:

V_{TEG} = tegangan keluaran TEG (V)

α = koefisien Seebeck ($V/^{\circ}C$)

T_h = temperatur sisi panas ($^{\circ}C$)

T_c = temperatur sisi dingin ($^{\circ}C$)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa tegangan keluaran TEG berbanding lurus terhadap perbedaan temperatur yang terjadi antara sisi panas dan sisi dingin. Semakin besar nilai ΔT yang terbentuk, maka semakin besar pula tegangan yang dihasilkan oleh modul TEG.

Dalam sistem pemanenan energi, kemampuan menghasilkan beda temperatur yang tinggi menjadi faktor utama yang menentukan potensi keluaran listrik TEG. Oleh karena itu pengukuran temperatur sisi panas dan sisi dingin menjadi parameter yang sangat penting untuk mengevaluasi performa TEG pada berbagai kondisi operasi.

1) Pengaruh Perbedaan Temperatur terhadap Keluaran TEG

Perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin merupakan salah satu parameter utama yang menentukan karakteristik keluaran sebuah TEG. Nilai ΔT menunjukkan besarnya gradien temperatur yang bekerja pada modul TEG. Dalam kondisi pengujian, perubahan temperatur pada sisi panas maupun sisi dingin akan menyebabkan perubahan nilai ΔT dan selanjutnya memengaruhi tegangan keluaran TEG.

Berdasarkan hubungan tersebut, peningkatan ΔT akan menyebabkan peningkatan tegangan keluaran TEG. Sebaliknya, ketika perbedaan temperatur semakin kecil, tegangan yang dihasilkan juga cenderung menurun. Namun, karakteristik TEG pada kondisi nyata tidak selalu mengikuti hubungan linear secara sempurna. Hal tersebut dapat disebabkan oleh resistansi internal TEG, perubahan sifat material terhadap temperatur, kondisi perpindahan panas, serta karakteristik beban yang terhubung pada TEG. Oleh karena itu, pengujian diperlukan untuk mengetahui karakteristik aktual TEG pada kondisi operasi sistem yang dirancang.

Selain memengaruhi tegangan, perubahan ΔT juga dapat memengaruhi kemampuan TEG dalam menghasilkan arus dan daya listrik. Oleh sebab itu, pengamatan terhadap tegangan, arus, dan daya keluaran diperlukan untuk

mengevaluasi kemampuan TEG sebagai sumber energi pada sistem pemanenan energi.

Dalam penelitian ini, pengaruh ΔT terhadap keluaran TEG dianalisis melalui pengukuran temperatur sisi panas dan sisi dingin serta pengukuran tegangan dan arus keluaran. Daya keluaran kemudian diperoleh berdasarkan hubungan antara tegangan dan arus. Dengan demikian, pengujian pada variasi ΔT menjadi dasar untuk menentukan kondisi operasi TEG yang mampu menghasilkan keluaran listrik yang sesuai dengan kebutuhan rangkaian DC-DC boost converter.

2) Karakteristik Tegangan, Arus, dan Daya TEG

Karakteristik keluaran TEG dalam penelitian ini ditinjau melalui tiga parameter utama, yaitu tegangan, arus, dan daya listrik. Ketiga parameter tersebut digunakan untuk mengetahui kemampuan TEG dalam menghasilkan energi listrik dari perbedaan temperatur yang diberikan.

a) Tegangan keluaran TEG

Tegangan keluaran TEG merupakan beda potensial listrik yang dihasilkan akibat adanya perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin. Nilai tegangan yang diukur pada penelitian digunakan untuk mengetahui perubahan keluaran TEG terhadap variasi ΔT serta untuk menentukan apakah tegangan yang dihasilkan telah berada pada rentang yang dapat digunakan sebagai masukan rangkaian boost converter.

b) Arus keluaran TEG

Arus keluaran merupakan besarnya aliran muatan listrik yang dihasilkan TEG ketika modul terhubung dengan beban. Berbeda dengan tegangan, nilai arus sangat dipengaruhi oleh kondisi beban dan karakteristik internal TEG. Dalam kondisi rangkaian terbuka, arus yang mengalir secara ideal mendekati nol sehingga tegangan yang terukur mendekati open-circuit voltage. Ketika TEG dihubungkan dengan beban, arus mulai mengalir dan tegangan terminal dapat berubah sesuai karakteristik beban dan resistansi internal TEG. Oleh karena itu, pengukuran arus diperlukan untuk mengetahui kemampuan TEG dalam memasok energi listrik kepada rangkaian yang terhubung.

c) Daya keluaran TEG

Daya listrik menunjukkan laju energi listrik yang dapat dihasilkan TEG dan disalurkan kepada beban. Daya keluaran dapat dihitung berdasarkan hasil pengukuran tegangan dan arus menggunakan persamaan:

dengan:

- Daya keluaran TEG (W),
- Tegangan keluaran TEG (V),
- Arus keluaran TEG (A).

Nilai daya menjadi parameter penting karena peningkatan tegangan saja belum menunjukkan peningkatan kemampuan pemanenan energi apabila arus yang tersedia sangat kecil. Oleh karena itu, tegangan, arus, dan daya dianalisis secara bersamaan untuk menggambarkan karakteristik keluaran TEG.

Dalam penelitian ini, ketiga parameter tersebut digunakan untuk mengevaluasi pengaruh ΔT terhadap kemampuan TEG menghasilkan energi listrik. Hasil pengukuran selanjutnya menjadi dasar dalam menentukan kesesuaian konfigurasi TEG sebagai sumber masukan bagi DC-DC boost converter.

1. Konfigurasi Seri TEG

Beberapa modul TEG dapat disusun dalam konfigurasi seri untuk meningkatkan tegangan keluaran total. Pada rangkaian seri, terminal keluaran satu modul dihubungkan dengan terminal modul berikutnya sehingga tegangan yang dihasilkan masing-masing modul akan terakumulasi.

Untuk beberapa modul TEG yang memiliki karakteristik relatif sama, tegangan total secara ideal dapat dinyatakan sebagai:

$$V_{\text{Total}} = V_1 + V_2 + \dots + V_n$$

dengan:

- V_{Total} = tegangan total konfigurasi TEG,
- V_{TEG} = tegangan satu modul TEG,
- n = jumlah modul TEG.

Sementara itu, pada hubungan seri, arus yang mengalir melalui setiap modul pada kondisi ideal memiliki nilai yang sama:

$$I_{\text{Total}} = I_{\text{TEG}}$$

Oleh karena itu, penyusunan TEG secara seri digunakan terutama untuk meningkatkan tegangan keluaran, bukan untuk meningkatkan kapasitas arus seperti pada konfigurasi paralel.

Dalam penelitian ini digunakan 16 modul TEG yang disusun secara seri. Konfigurasi tersebut dirancang untuk meningkatkan tegangan keluaran total sehingga dapat digunakan sebagai sumber masukan DC-DC boost converter.

Secara teoritis, apabila karakteristik setiap modul dianggap sama, tegangan konfigurasi dapat diperkirakan menggunakan:

$$V_{16,teori} \approx 16V_{TEG}$$

Namun, nilai tersebut merupakan pendekatan teoritis. Pada kondisi aktual, tegangan total dapat berbeda karena setiap modul tidak selalu memiliki kondisi temperatur, karakteristik, dan pembebanan yang benar-benar identik.

Oleh karena itu, pada tahap pengujian, tegangan aktual 16 TEG seri menjadi parameter utama yang dibandingkan dengan daerah operasi tegangan masukan DC-DC boost converter. Hal ini memungkinkan evaluasi apakah konfigurasi TEG yang digunakan benar-benar mampu menghasilkan tegangan yang dapat diterima oleh konverter. Konfigurasi seri dengan demikian tidak hanya dipandang sebagai cara untuk meningkatkan tegangan, tetapi juga sebagai bagian dari evaluasi kelayakan sumber energi pada sistem yang dirancang.

2.1.2 DC - DC Boost Converter

DC-DC boost converter merupakan rangkaian elektronika daya yang digunakan untuk menghasilkan tegangan DC keluaran yang lebih tinggi dibandingkan tegangan DC masukan. Pada sistem pemanenan energi berbasis TEG, boost converter digunakan karena tegangan yang dihasilkan TEG dapat berada pada tingkat yang relatif rendah dan berubah sesuai kondisi temperatur.

Prinsip kerja boost converter memanfaatkan proses switching yang melibatkan induktor, sakelar elektronik, dioda, dan kapasitor. Ketika sakelar berada pada kondisi ON, sumber masukan memberikan energi kepada induktor sehingga energi tersimpan dalam bentuk medan magnet. Ketika sakelar berubah ke kondisi OFF, energi yang tersimpan pada induktor dilepaskan menuju sisi keluaran melalui dioda sehingga tegangan yang dihasilkan dapat lebih tinggi dibandingkan tegangan masukan.

Proses switching berlangsung secara periodik dengan frekuensi tertentu. Besarnya waktu sakelar berada pada kondisi ON dibandingkan dengan satu periode switching dinyatakan melalui duty cycle. Duty cycle menjadi salah satu parameter penting yang menentukan besar tegangan keluaran boost converter.

Secara ideal, hubungan antara tegangan masukan dan keluaran boost converter dapat dinyatakan sebagai:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

dengan:

V_{out} = Tegangan keluaran (V),

V_{in} = Tegangan masukan (V),

D = Duty cycle.

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa tegangan keluaran dapat dinaikkan dengan mengatur nilai duty cycle.

1. Hubungan Duty Cycle dan Tegangan Keluaran

Duty cycle merupakan perbandingan antara lama waktu sakelar berada pada kondisi ON terhadap periode switching. Duty cycle dapat dinyatakan sebagai:

$$D = \frac{T_{on}}{T}$$

dengan:

D = Duty cycle,

T_{ON} = Waktu sakelar dalam kondisi ON,

T = Periode switching..

Pada boost converter ideal, hubungan duty cycle dengan tegangan keluaran diberikan oleh:

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1 - D}$$

Berdasarkan Persamaan di atas, nilai duty cycle berbanding lurus dengan rasio penguatan tegangan boost converter. Ketika duty cycle meningkat, nilai $(1-D)$ menjadi semakin kecil sehingga tegangan keluaran meningkat. Sebaliknya, ketika duty cycle menurun, nilai $(1-D)$ menjadi semakin besar sehingga tegangan keluaran menurun..

Hubungan tersebut menjadi dasar pengaturan tegangan pada boost converter. Ketika tegangan masukan dari TEG mengalami perubahan akibat perubahan ΔT ,

diperlukan pengaturan terhadap proses switching agar tegangan keluaran dapat dipertahankan pada nilai yang diinginkan.

Pada kondisi ideal, semakin tinggi tegangan masukan dengan duty cycle yang sama, semakin tinggi pula tegangan keluaran yang dihasilkan. Oleh karena itu, perubahan tegangan masukan TEG dapat menyebabkan perubahan tegangan keluaran boost converter apabila tidak diikuti dengan penyesuaian duty cycle.

Konsep tersebut menjadi dasar evaluasi pengendalian pada penelitian ini, yaitu membandingkan respons tegangan keluaran ketika sistem bekerja tanpa Fuzzy Logic Controller (FLC) dan ketika duty cycle dikendalikan menggunakan FLC.

2. Modul Boost Converter MT3608

MT3608 merupakan modul DC-DC boost converter yang digunakan untuk menaikkan tegangan DC masukan menjadi tegangan DC keluaran yang lebih tinggi. Modul ini menggunakan prinsip switching untuk mengatur proses transfer energi dari sisi masukan menuju sisi keluaran.

Dalam penelitian ini, MT3608 berfungsi sebagai tahap konversi antara keluaran TEG dan tegangan DC yang digunakan oleh sistem. Pemilihan modul perlu mempertimbangkan karakteristik tegangan masukan yang dihasilkan konfigurasi TEG serta kebutuhan tegangan pada sisi keluaran.

Parameter utama MT3608 yang perlu diperhatikan dalam penelitian meliputi rentang tegangan masukan, rentang tegangan keluaran, kemampuan arus, dan kondisi operasi modul. Parameter tersebut menjadi dasar untuk menentukan apakah tegangan yang dihasilkan oleh konfigurasi TEG dapat digunakan sebagai masukan modul.

Konsep daerah operasi pada penelitian ini mengacu pada rentang tegangan masukan yang dapat diterima oleh modul boost converter sesuai spesifikasi dan kondisi operasinya. Dengan demikian, hasil pengujian konfigurasi TEG dapat dibandingkan dengan rentang tersebut untuk menentukan kesesuaiannya sebagai sumber masukan.

Hal ini berkaitan langsung dengan rumusan masalah kedua, yaitu mengevaluasi kemampuan konfigurasi TEG dalam menghasilkan tegangan yang memenuhi daerah operasi DC-DC boost converter. Adapun Spesifikasi dan Gambar modul MT3608 ini dapat dilihat pada tabel dan gambar di bawah ini.

Tabel 2. 3 Spesifikasi DC-DC Boost Converter

Jenis Spesifikasi	Keterangan
Tegangan masukan	2 – 24 V
Tegangan keluaran	Max 28 V (Adjustable)
Arus keluaran	Max 2 Ampere
Arus saklar (SW Current)	Max 4 Ampere (Typical)
Frekuensi	1,2 MHz (1200 KHz)
Efisiensi	Max 93%
Dimensi	± 36 mm x 17 mm x 14 mm



Gambar 2. 2 DC-DC Boost Converter MT3608¹

3. Mekanisme Feedback pada MT3608

Pada sistem konverter DC-DC, mekanisme umpan balik (*feedback*) digunakan untuk mempertahankan tegangan keluaran pada nilai tertentu dengan membandingkan tegangan keluaran aktual terhadap nilai referensi. Informasi hasil pengukuran tersebut kemudian digunakan untuk menentukan tindakan pengaturan terhadap proses switching.

Pada penelitian ini, pembahasan feedback perlu dibedakan antara mekanisme pengaturan internal modul MT3608 dan Fuzzy Logic Controller yang digunakan pada sistem penelitian. Hal tersebut penting karena keberadaan rangkaian regulator internal MT3608 tidak secara otomatis berarti bahwa MT3608 merupakan sistem kendali FLC.

FLC pada penelitian digunakan sebagai pengendali eksternal yang menentukan aksi kendali berdasarkan kondisi tegangan sistem. Dengan demikian, evaluasi dilakukan dengan membandingkan kondisi ketika sistem bekerja tanpa

¹ DC-DC Boost Converter MT3608. Retrieved August 23, 2026, from <https://share.google/BrjbMXW0IbqQk9bvH>

FLC dengan kondisi ketika FLC digunakan untuk membantu meregulasi tegangan keluaran boost converter. Pembahasan mengenai struktur input FLC, fungsi keanggotaan, aturan (*rule base*), proses inferensi, defuzzifikasi, serta pembentukan sinyal kendali akan dibahas pada subbab Fuzzy Logic Controller.

2.1.3 Fuzzy Logic

Fuzzy Logic Controller (FLC) merupakan metode sistem kendali cerdas yang mengadopsi cara berpikir manusia dalam proses pengambilan keputusan. Berbeda dengan logika biner yang hanya mengenal dua kondisi yaitu benar (1) dan salah (0), logika fuzzy memungkinkan suatu variabel memiliki nilai keanggotaan pada rentang 0 hingga 1. Pendekatan ini memungkinkan sistem mengolah kondisi yang bersifat tidak pasti, nonlinier, dan dinamis secara lebih fleksibel dibandingkan metode kendali konvensional.

Pada sistem elektronika daya, khususnya *DC-DC Boost Converter*, penggunaan *Fuzzy Logic Controller* banyak diterapkan untuk meningkatkan kestabilan tegangan keluaran ketika terjadi perubahan tegangan masukan maupun perubahan kondisi operasi. Menurut Bhavana (2023), FLC mampu menghasilkan respon yang cepat dengan nilai *overshoot* yang rendah sehingga kualitas regulasi tegangan menjadi lebih baik. Selain itu, Bhat dan Patil (2020) menyatakan bahwa FLC memiliki struktur yang relatif sederhana namun efektif dalam mereduksi fluktuasi tegangan keluaran serta meningkatkan performa sistem pada kondisi nonlinier. Chandrashekar dkk. (2024) juga menjelaskan bahwa implementasi FLC pada sistem *closed-loop* mampu mengurangi *steady-state error* dan mempercepat pencapaian kondisi tunak (*settling time*).

Pada penelitian ini, FLC digunakan untuk mengendalikan *DC-DC Boost Converter* agar tegangan keluarannya tetap berada di sekitar nilai referensi yang telah ditentukan. Proses pengendalian dilakukan berdasarkan dua variabel masukan yaitu *Error* (E) dan *Delta Error* (ΔE), sedangkan variabel keluarannya berupa *Delta PWM* (ΔPWM) yang digunakan untuk menyesuaikan nilai *duty cycle* konverter secara dinamis.

Secara umum, prinsip kerja *Fuzzy Logic Controller* terdiri atas empat tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, basis aturan (*rule base*), inferensi, dan defuzzifikasi. Pada tahap fuzzifikasi, nilai masukan berupa *Error* dan *Delta Error* diubah menjadi

variabel linguistik yang memiliki derajat keanggotaan tertentu. Selanjutnya, nilai linguistik tersebut diproses menggunakan basis aturan (*rule base*) yang berisi sekumpulan aturan *IF-THEN* sebagai dasar pengambilan keputusan. Hasil evaluasi aturan kemudian diproses pada tahap inferensi untuk menentukan aksi kendali yang sesuai. Tahap terakhir adalah defuzzifikasi, yaitu proses mengubah hasil inferensi menjadi nilai numerik (*crisp output*) berupa *Delta PWM* yang dapat dieksekusi oleh sistem.

2.1.4 Pemanenan Energi

Thermoelectric Generator (TEG) merupakan perangkat yang mampu mengubah energi panas secara langsung menjadi energi listrik melalui efek Seebeck. Tegangan listrik akan dihasilkan ketika terdapat perbedaan temperatur antara sisi panas (*hot side*) dan sisi dingin (*cold side*) modul TEG. Besarnya tegangan yang dihasilkan dipengaruhi oleh nilai perbedaan temperatur (ΔT), karakteristik material termoelektrik, serta konfigurasi modul yang digunakan.

Pada penelitian ini, sumber panas yang dimanfaatkan berasal dari panas yang terakumulasi pada sisi belakang panel surya akibat paparan radiasi matahari. Sebagian energi radiasi yang diterima panel surya tidak dikonversi menjadi energi listrik, melainkan berubah menjadi energi panas yang menyebabkan peningkatan temperatur permukaan panel. Panas tersebut kemudian dimanfaatkan sebagai sumber energi termal pada sisi panas modul TEG yang dipasang pada bagian belakang panel surya.

Ketika sisi panas TEG menerima panas dari permukaan belakang panel surya dan sisi dingin berada pada temperatur yang lebih rendah, maka akan terbentuk perbedaan temperatur (ΔT) yang menghasilkan tegangan listrik melalui efek Seebeck. Semakin besar nilai ΔT yang terbentuk, maka semakin besar pula tegangan keluaran yang dihasilkan oleh modul TEG. Oleh karena itu, karakteristik hubungan antara ΔT dan tegangan keluaran menjadi salah satu parameter penting yang perlu dievaluasi untuk mengetahui kemampuan TEG sebagai sumber energi pada sistem yang dirancang.

Meskipun TEG mampu menghasilkan energi listrik dari sumber panas yang tersedia, tegangan keluarannya umumnya relatif rendah dan berfluktuasi mengikuti perubahan temperatur lingkungan. Oleh sebab itu, pada penelitian ini dilakukan

evaluasi karakteristik keluaran TEG terhadap perubahan perbedaan temperatur serta analisis kemampuan konfigurasi beberapa modul TEG yang disusun secara seri dalam menghasilkan tegangan yang memenuhi kebutuhan masukan *DC-DC Boost Converter*. Hasil evaluasi tersebut digunakan sebagai dasar untuk menilai potensi pemanfaatan TEG sebagai sumber energi pada sistem yang dikembangkan.

2.1.5 Baterai LiFePO₄

Baterai LiFePO₄ adalah tipe baterai lithium-ion yang memiliki beberapa fungsi yaitu menyimpan energi listrik untuk digunakan dalam berbagai aplikasi, seperti sistem tenaga surya, mobil listrik, peralatan portabel, dan banyak lagi. Baterai LiFePO₄ menyediakan sumber daya yang stabil, aman, dan memiliki umur pakai yang panjang, serta mampu menangani pengisian dan pengosongan berulang dengan kinerja yang konsisten. Baterai LiFePO₄ juga dapat diisi ulang dengan cepat dan memiliki toleransi terhadap suhu ekstrim, menjadikannya pilihan yang populer untuk berbagai keperluan energi listrik.



Gambar 2. 3 Baterai LiFePO₄²

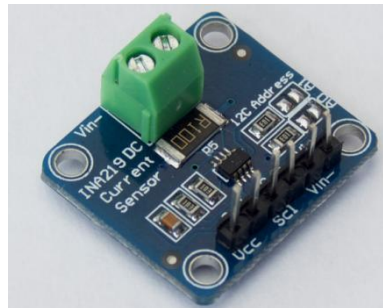
2.1.6 Sensor INA219

Sensor INA219 adalah salah satu sensor yang berbentuk modul yang dapat membaca tegangan, arus, dan daya sekaligus dengan menggunakan interface I2C. Sensor ini bekerja pada tegangan DC antara 3.3 sampai 5V. Sensor ini dapat mengukur tegangan sampai dengan 26V dan arus sebesar 3.2A. Sensor INA 219 sudah banyak di gunakan di aplikasikan untuk pembacaan dan monitoring alat kelistrikan(Nathasya, 2024).

INA 219 merupakan modul sensor presisi yang dirancang khusus untuk mengukur parameter arus dan tegangan pada suatu rangkaian listrik dengan antarmuka digital. Secara teknis, sensor ini bekerja dengan prinsip penginderaan

² *Baterai LiFePO₄*. Retrieved August 23, 2026, from <https://share.google/4Yniv7mWxO1wjyqX1>

tegangan jatuh (*voltage drop*) pada sebuah resistor *shunt* internal yang memiliki nilai resistansi sangat rendah. Perubahan arus yang mengalir melalui resistor tersebut akan menghasilkan tegangan *shunt* yang kemudian dikonversi oleh sirkuit ADC (*Analog-to-Digital Converter*) internal menjadi data digital berupa nilai arus dan tegangan bus. Seluruh data hasil konversi ini ditransmisikan menuju mikrokontroler melalui bus komunikasi I2C (*Inter-Integrated Circuit*) yang hanya memerlukan dua jalur kabel data (SDA dan SCL), sehingga memungkinkan pemantauan daya secara akurat dengan integrasi kabel yang sangat minimal.



Gambar 2. 4 Sensor INA219³

2.1.7 Sensor DS18B20

DS18B20 merupakan modul sensor suhu digital berbasis silikon yang dirancang untuk memberikan hasil pengukuran temperatur dengan presisi tinggi melalui konversi data langsung di dalam chip sensor. Sensor suhu DS18B20 tidak memerlukan rangkaian ADC karena sudah mempunyai output digital, dibandingkan dengan sensor LM35 sensor suhu DS18B20 mempunyai kestabilan lebih baik dari hal kecepatan untuk pengukuran dan akurasi nilai suhu. Protokol 1 wire communication digunakan untuk” pembacaan sensor DS18B20.” Sensor ini memiliki 3 pin yaitu +5 V, GND, dan data I/O (Fahruri *et al.*, 2021). Komunikasi data pada sensor ini menggunakan protokol One-Wire (Satu Kabel), di mana jalur data (DQ) berfungsi secara dua arah untuk mengirimkan alamat unik sensor serta hasil pembacaan suhu menuju mikrokontroler. Karena setiap unit DS18B20 memiliki kode identifikasi 64-bit yang unik, protokol ini memungkinkan banyak sensor dihubungkan secara paralel pada satu pin GPIO yang sama tanpa adanya tabrakan data. Selain itu, sensor ini membutuhkan resistor *pull-up* eksternal pada jalur datanya untuk menjaga stabilitas sinyal digital saat proses transmisi

³ Sensor INA219. Retrieved August 23, 2026, from <https://share.google/RqePgZXbMx1sSWmtD>

berlangsung, sehingga menjamin akurasi pembacaan tetap terjaga meskipun menggunakan kabel yang panjang.



Gambar 2. 5 Sensor DS18B20⁴

2.2 Penelitian Terdahulu

Penelitian terkait TEG merujuk pada beberapa studi terdahulu sebagai acuan. Salah satunya adalah penelitian yang dilakukan oleh Bonardo dan Hudaya (2021) dengan judul *"Rancangan Termoelektrik Generator (TEG) Portabel pada Knalpot Sepeda Motor dengan Material Aluminium sebagai Konduktor"* mengeksplorasi pemanfaatan limbah panas pada knalpot sepeda motor sebagai sumber energi listrik. Penelitian ini merancang sistem menggunakan delapan buah modul TEG tipe SP1848-27145 yang ditempelkan pada konduktor aluminium. Melalui perbandingan dua variasi konfigurasi, ditemukan bahwa konfigurasi seri mampu menghasilkan daya maksimal sebesar 9,0048 Watt (19,2 V dan 0,469 A) pada selisih suhu (ΔT) sebesar 60°C, sedangkan untuk Konfigurasi seri-paralel menghasilkan daya yang sama (9,0048 W) namun dengan arus lebih tinggi (1,876 A) dan tegangan lebih rendah (4,8 V). Penelitian ini menyimpulkan bahwa penggunaan material aluminium dan konfigurasi seri dengan tambahan *step-down converter* memberikan efisiensi dan keamanan yang optimal dalam mengubah energi panas buang kendaraan menjadi daya listrik yang stabil untuk pengisian daya baterai.

Selanjutnya terdapat Penelitian menggunakan TEG dan Boost Converter. Adapun Penelitiannya yaitu yang dilakukan oleh Baihaqi dkk. (2024) dalam jurnal berjudul *"Prototype Portable Solar Concentrated Thermoelectric Generator Charging System"* memfokuskan pada pengembangan sistem pembangkit listrik portabel berbasis energi panas matahari. Sistem ini memanfaatkan lensa resnel untuk

⁴ Sensor DS18B20. Retrieved August 23, 2026, from <https://share.google/mzQDa3C0XLFyEu6QE>

mengonsentrasikan panas matahari ke enam buah modul termoelektrik tipe TEC 1-12706 yang disusun secara seri. Untuk menjaga stabilitas tegangan keluaran agar dapat digunakan mengisi daya perangkat elektronik seperti ponsel dan *powerbank*, penelitian ini menggunakan *boost converter* dan baterai sebagai penyimpan energi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa alat ini mampu menghasilkan tegangan rata-rata sebesar 9,56V pada suhu modul 45,2°C, dan berhasil mengisi daya ponsel berkapasitas 5000 mAh dari 4% hingga 70% dalam waktu 95 menit.

Kemudian juga terdapat penelitian yang menggunakan konsep TEG, Boost Converter dan Pengendali *Fuzzy Logic Controller* yang dilakukan secara bersamaan. Adapun Penelitian tersebut dilakukan oleh Setiawan dkk. (2021) dengan judul “Perancangan Pembangkit Listrik Termoelektrik pada Proses Refrigerasi Air Conditioner dengan Metode Fuzzy Logic”. fokus utama studi ini adalah memanfaatkan energi panas buang dari kondensor *Air Conditioner* (AC) menggunakan 50 buah modul termoelektrik yang dikonfigurasi secara seri. Mengingat tegangan keluaran TEG sangat Fluktuatif terhadap perbedaan suhu (ΔT), peneliti mengintegrasikan algoritma *Fuzzy Logic* pada *DC-DC Converter* untuk meregulasi tegangan. Dengan parameter masukan berupa *error* dan *delta error*, sistem kendali cerdas ini terbukti efektif menjaga stabilitas pengisian daya ke baterai (aki). Hasil eksperimen menunjukkan sistem mampu mencapai tegangan *open circuit* sebesar 14 Volt pada ΔT 32,38°C, sekaligus membuktikan bahwa implementasi kontrol *Fuzzy* sangat krusial dalam menjamin kelayakan energi termoelektrik untuk beban elektronika yang sensitif.

Selanjutnya terdapat Penelitian yang menggunakan Solar Panel, Buck-Boost Converter dan Pengendali *Fuzzy Logic Controller*. Adapun Penelitian tersebut dilakukan oleh Chetan P. Ugale dan Dr. V. V. Dixit (2017) yang berjudul “*Buck-Boost Converter Using Fuzzy Logic for Low Voltage Solar Energy Harvesting Application*”. Penelitian ini berfokus pada implementasi solusi pemanenan energi (*energy harvesting*) untuk memaksimalkan tegangan keluaran panel surya guna aplikasi tegangan rendah. Masalah utama yang diangkat adalah ketidakefisienan sistem akibat variasi intensitas radiasi matahari dan suhu yang memengaruhi tegangan keluaran panel surya. Untuk mengatasi hal tersebut, peneliti mengusulkan

penggunaan konverter *buck-boost* yang dikendalikan oleh *Fuzzy Logic Controller* (FLC) berbasis mikrokontroler PIC16876A.

Sistem ini bekerja dengan cara mengubah energi matahari menjadi energi listrik melalui efek otovoltaik, di mana tegangan rendah yang dihasilkan masuk ke konverter *buck-boost*. Pengendali logika *Fuzzy* bertugas menghasilkan *duty cycle* variabel yang disesuaikan dengan fluktuasi tegangan panel surya untuk menghasilkan tegangan keluaran yang konstan sebesar 12V. Proses kontrol ini melibatkan tahapan *fuzzification*, mekanisme inferensi menggunakan aturan *IF-Then*, dan *defuzzification* untuk mendapatkan nilai numerik penggerak MOSFET pada konverter.

Hasil pengujian perangkat keras menunjukkan bahwa sistem mampu mempertahankan tegangan keluaran yang stabil terlepas dari perubahan iradiasi dan suhu. Sebagai contoh, saat tegangan panel berada pada 8V, 12V, atau 14V, sistem secara otomatis menyesuaikan *duty cycle* (masing-masing sekitar 70%, 50%, dan 40%) untuk tetap menghasilkan keluaran sekitar 12V.

Selanjutnya juga terdapat Penelitian terdahulu yang sudah melakukan eksperimen dengan menggabungkan dua sumber input untuk pemanenan energi. Adapun judul penelitian nya adalah “Hibridisasi Panel Surya Dengan Modul Termoelektik Sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Surya” yang ditulis oleh Ricky, Haizh Raihan Murniawan, Agus Fikri, Mohammad Mujirudin, dan Arry Avorizano. Penelitian ini menjadi rujukan teknis yang krusial, khususnya pada mekanisme integrasi fisik antara unit *Photovoltaic* (PV) dan modul *Thermoelectric Generator* (TEG). fokus utama studi tersebut adalah mengatasi penurunan efisiensi panel surya akibat akumulasi panas berlebih pada sel surya saat terpapar radiasi tinggi. Menggunakan panel surya *polycrystalline* 50 Wp dan 15 modul TEG tipe SP1848-27145 SA yang disusun paralel, eksperimen ini membuktikan bahwa panas buang (*waste heat*) pada bagian belakang panel dapat dikonversi menjadi listrik tambahan melalui efek Seebeck. Hasilnya, sistem hibrida ini mampu mendongkrak efisiensi total hingga 20%, jauh melampaui efisiensi panel konvensional yang hanya sebesar 9%. Temuan ini juga menekankan bahwa menjaga perbedaan suhu (ΔT) yang lebar melalui pendinginan aktif pada sisi dingin TEG adalah kunci untuk mencapai keluaran daya maksimal.

Berdasarkan kajian terhadap penelitian-penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa metode *Fuzzy Logic Controller* (FLC) memiliki potensi besar dalam pengembangan sistem konversi energi hibrida, khususnya pada optimasi keluaran *Boost Converter*. Metode ini mampu mengakomodasi sifat non-linearitas dan fluktuasi tegangan dari *Thermoelectric Generator* (TEG) yang sangat bergantung pada perbedaan suhu, sehingga menghasilkan keputusan kontrol yang lebih adapti.

Oleh karena itu, penerapan sistem kontrol berbasis *Fuzzy logic* pada Alat ini ini diharapkan mampu menjaga kestabilan tegangan keluaran pada *set point* yang ditentukan (misalnya 14V) meskipun kondisi perbedaan suhu pada modul TEG berubah-ubah. Hal ini sangat krusial untuk meningkatkan efisiensi pemanenan energi (*energy harvesting*) serta menjamin keamanan dan efektivitas proses pengisian daya pada baterai LiFePO₄, yang pada akhirnya akan meningkatkan performa sistem energi mandiri secara keseluruhan.