BAB II

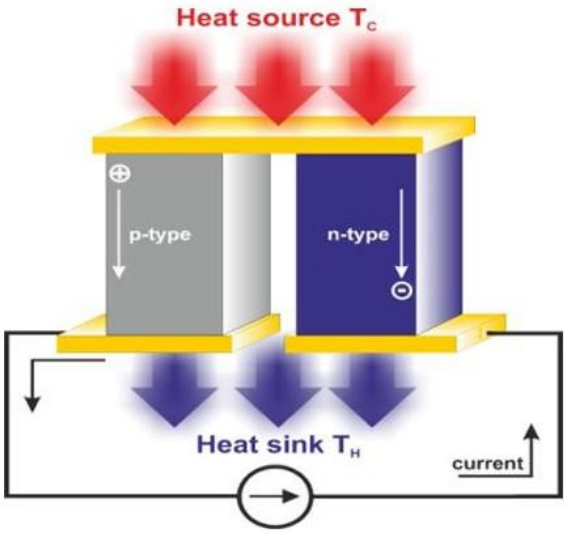
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Thermoelectric Generator* (TEG)

Thermoelectric Generator (TEG) merupakan suatu komponen atau modul yang berfungsi sebagai sumber masukan (*input*) dengan memanfaatkan *efek Seebeck*, yaitu fenomena munculnya beda potensial akibat adanya perbedaan temperatur pada kedua sisi elemen *termoelektrik*. Perbedaan potensial tersebut akan menghasilkan aliran arus listrik apabila rangkaian berada dalam kondisi tertutup (Krsimantoro dkk., 2026). Dengan demikian, TEG adalah perangkat *solid-state* yang dapat mengubah energi panas secara langsung menjadi energi listrik melalui *Efek Seebeck* . Ketika terdapat perbedaan suhu di antara dua sisi bahan semikonduktor, akan timbul perbedaan tegangan yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya listrik. TEG memiliki keuntungan karena tidak memiliki bagian yang bergerak, beroperasi secara senyap, dan berukuran kecil, namun efisiensinya relatif rendah. *Thermoelectric Generator* didasarkan pada *Efek Seebeck* . Jika panas di terapkan pada rangkaian di persambungan dari dua konduktor yang berbeda, arus listrik akan di hasilkan adalah perangkat *solit state* dan tidak seperti dinamo yang mempunyai bagian bergerak sehingga tidak menimbulkan suara saat bekerja prinsip kerja TEG.

Efek Seebeck menyatakan bahwa ketika dua bahan semikonduktor berbeda dihubungkan dan mengalami perbedaan suhu pada kedua sambungannya, akan terjadi aliran muatan listrik. Tegangan *output* TEG sebanding dengan perbedaan

suhu yang diterapkan dan koefisien *Seebeck* dari materialnya. Umumnya bahan semikonduktor yang digunakan pada susunan TEG adalah Bismuth dan Telluride (Sasmita dkk., 2019).



Gambar 2.1 struktur TEG
Sumber: *(Sasmita dkk., 2019)*

Struktur TEG dapat dilihat pada Gambar 2.1 menunjukkan struktur TEG yang terdiri dari susunan elemen tipe-N (material kekurangan electron) dan tipe-P (material kelebihan electron). Panas masuk pada salah satu sisi TEG dan panas tersebut dibuang melalui sisi lainnya. Proses transfer panas tersebut menghasilkan suatu tegangan yang melewati sambungan struktur TEG dan besarnya tegangan yang dihasilkan sebanding dengan perbedaan temperatur.

2.2 Efisiensi TEG

Efisiensi TEG didefinisikan sebagai rasio antara daya listrik keluaran dan daya panas yang diserap dari sumber panas. faktor utama yang mempengaruhi efisiensi adalah *figure of merit* (zt) dari bahan termolektrik, yang merupakan fungsi dari konduktivitas listrik, konduktivitas termal, dan koefisien *seebeck*

(snyder & toberer, 2008). Peningkatan dapat diperoleh melalui pengaturan beban dan optimalisasi konversi daya *output* TEG**.**

2.3 *Boost converter*

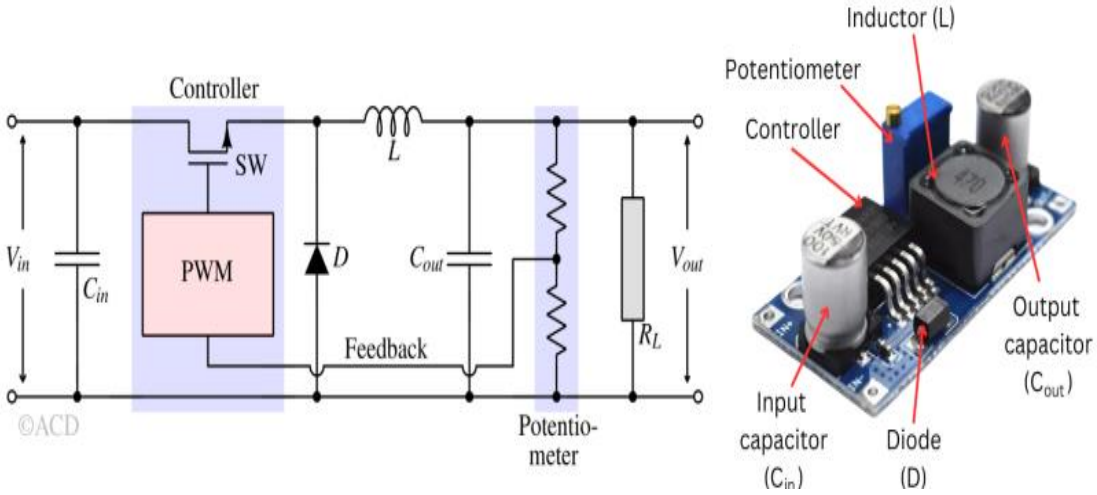
Boost converter adalah konverter penaik tegangan DC ke lebih tinggi dari tegangan yang tersedia, dimana keluaran tegangan yang dihasilkan lebih besar dari tegangan yang disediakan dengan mengendalikan sinyal kontrol PWM (*Pulse Width Modulation*), dan dikontrol sinyal masukan dan keluaran *boost converter* oleh *Proportional Integrative Derivative* (PID) (Pratama et dkk., 2023). Dalam sistem *Thermoelectric Generator* (TEG), tegangan *output* yang dihasilkan cenderung rendah dan berfluktuasi, sehingga penggunaan *Boost converter* sangat diperlukan agar tegangan yang diberikan ke beban menjadi sesuai dan stabil. *Boost converter* bekerja berdasarkan prinsip pensaklaran cepat (*switching*) menggunakan komponen aktif seperti transistor atau MOSFET, serta komponen pasif seperti dioda, induktor, dan kapasitor sebagai filter. Ketika saklar dalam keadaan ON, arus dari sumber mengalir melalui induktor dan menyimpan energi dalam bentuk medan magnet. Pada saat saklar OFF, energi yang tersimpan dalam induktor dilepaskan ke beban melalui dioda, sehingga menghasilkan tegangan *output* yang lebih tinggi dari *input*. Pengaturan waktu ON dan OFF saklar dikendalikan oleh sinyal *Pulse Width Modulation* (PWM) untuk menjaga kestabilan tegangan *output* meskipun terdapat fluktuasi pada *input* dari TEG.

Komponen utama pada *Boost converter* terdiri dari:

1. Saklar aktif (MOSFET atau transistor),
2. Dioda sebagai jalur arus saat saklar OFF,

3. Induktor untuk menyimpan energi,
4. Kapasitor untuk menyaring riak (*ripple*) tegangan pada *output*.

Penggunaan *Boost converter* dalam aplikasi TEG memberikan keuntungan dalam hal efisiensi, fleksibilitas tegangan, dan kestabilan suplai daya terhadap beban yang bervariasi. Dengan konfigurasi ini, sistem dapat mengoptimalkan energi listrik dari TEG yang memiliki tegangan rendah agar tetap dapat digunakan untuk sistem penyimpanan energi atau beban elektronik yang memerlukan tegangan lebih tinggi dan stabil (Puspa Jiwa Parahita Yunta dkk., 2022).



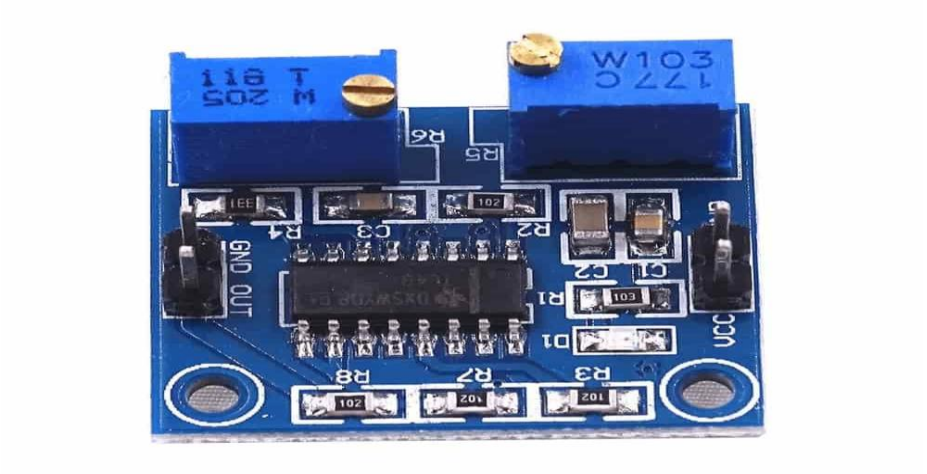
Gambar 2.2 *Boost converter* DC-DC

Sumber: *(Puspa Jiwa Parahita Yunta dkk., 2022)*

2.4 *Pulse Width Modulation* (PWM)

PWM adalah teknik pensaklaran yang digunakan untuk mengatur jumlah daya yang dikirim ke beban dengan cara mengontrol lebar pulsa dari sinyal digital. Dalam konteks konversi daya, PWM sangat penting karena mampu memberikan pengaturan tegangan secara efisien tanpa menghasilkan panas berlebih seperti pada pengatur tegangan linier. Pada *Boost converter* , *duty cycle* dari sinyal PWM berperan langsung dalam menentukan besarnya tegangan *output*.

duty cycle adalah rasio antara waktu ON saklar terhadap total periode sinyal. . Cara pengontrolan tegangan output pada *Konverter Boost* menggunakan *Pulse Width Modulation* (PWM), dimana yang dikontrol adalah lebar pulsa (*duty cycle*) (Tri dkk., 2024). Semakin besar *duty cycle*, semakin lama saklar berada dalam keadaan ON, yang menyebabkan energi yang tersimpan dalam induktor semakin besar, sehingga tegangan *output* yang dihasilkan akan semakin tinggi. Sebaliknya, *duty cycle* yang rendah akan menghasilkan tegangan *output* yang lebih kecil. Penggunaan PWM dalam *Boost converter* untuk *Thermoelectric Generator* TEG menjadi krusial karena tegangan yang dihasilkan TEG sangat bergantung pada perbedaan suhu, sehingga tidak stabil. Dengan mengatur *duty cycle* PWM secara dinamis, sistem dapat menyesuaikan tegangan *output* agar tetap konstan meskipun terjadi perubahan pada tegangan *input* TEG. PWM banyak digunakan dalam sistem kendali *converter* karena memiliki efisiensi tinggi, respon cepat terhadap perubahan beban, dan kemampuan pengaturan tegangan *output* yang fleksibel. Dalam *Boost converter* , pengaturan *duty cycle* PWM sangat berpengaruh terhadap kestabilan dan efisiensi daya yang disuplai ke beban (Puspa Jiwa Parahita Yunta dkk., 2022).



Gambar 2.3 *TLI494 PWM Controller Module*
Sumber: *(Puspa Jiwa Parahita Yunta dkk., 2022)*

2.5 Dasar Konversi Energi Dc-Dc

Perkembangan ilmu teknologi dalam bidang elektronika daya telah menghasilkan ketersediaan pasokan tegangan searah (DC), yang mana keluaran dari tegangan searah (DC) tersebut dapat dirubah menjadi lebih besar atau lebih kecil. Konversi tegangan searah ini biasa disebut dengan DC *Chopper*. Pada penerapannya DC *Chopper* bisa memungkinkan suatu sumber penghasil tegangan searah seperti baterai dapat dirubah keluarannya menjadi lebih besar agar bisa dimanfaatkan untuk berbagai perangkat elektronika sesuai kebutuhan. Kebutuhan akan tegangan keluaran searah yang bervariasi dapat terpenuhi dengan adanya *converter boost* (regulator DC *non-isolated*). *Converter boost* adalah jenis *ikonverter* daya DC ke DC dimana tegangan keluaran sama atau lebih tinggi dari tegangan masukan. Tegangan keluaran *converter* ini disesuaikan dengan lembar *pulse* PWM (Badri & Krismadinata, 2020). DC-DC *converter* berfungsi mengubah tegangan DC masukan menjadi tegangan DC keluaran dengan level tertentu, baik lebih tinggi maupun lebih rendah dari tegangan masukan.

Berdasarkan karakteristik perubahan tegangannya, konverter DC-DC diklasifikasikan menjadi *buck*, *boost*, dan *buck-boost converter* (Ma'sum, 2026).

2.6 Energi Terbarukan

Energi terbarukan adalah energi yang berasal dari proses alam yang berkelanjutan dan dikenal pada tahun 1970-an. Sebagai upaya untuk membuat suatu inovasi agar energi tidak cepat habis dan untuk membantu mengimbangi pengembangan energi berbahan bakar nuklir dan fosil. Pengertian paling umum energi terbarukan adalah sumber energi yang dapat dengan cepat di perbarui kembali secara alami, dan prosesnya berkelanjutan. Dengan pengertian ini maka bahan bakar nuklir dan fosil tidak termasuk didalamnya. Penelitian ini dilakukan berdasar pemanfaatan sumber panas untuk menghasilkan energi listrik, yaitu menggunakan *Generator Termoelektrik* (TEG) sebagai sumber energi alternatif. mencapai 70^{o}c dapat menghasilkan *output* sebesar 1,49v, sedangkan ketika suhu semakin rendah maka tegangan yang dihasilkan semakin rendah. *Generator Termoelektrik* dapat mengkonversikan perbedaan temperatur menjadi besaran listrik secara langsung. Teknologi termoelektrik merupakan alternatif dalam menjawab kebutuhan energi listrik. Namun, pengembangan teknologi termoelektrik sebagai energi alternatif perlu diperhatikan baik dari pemerintah, industri, perguruan tinggi, dan masyarakat (Mohamad Diki dkk., 2022).

2.7 Penelitian terkait

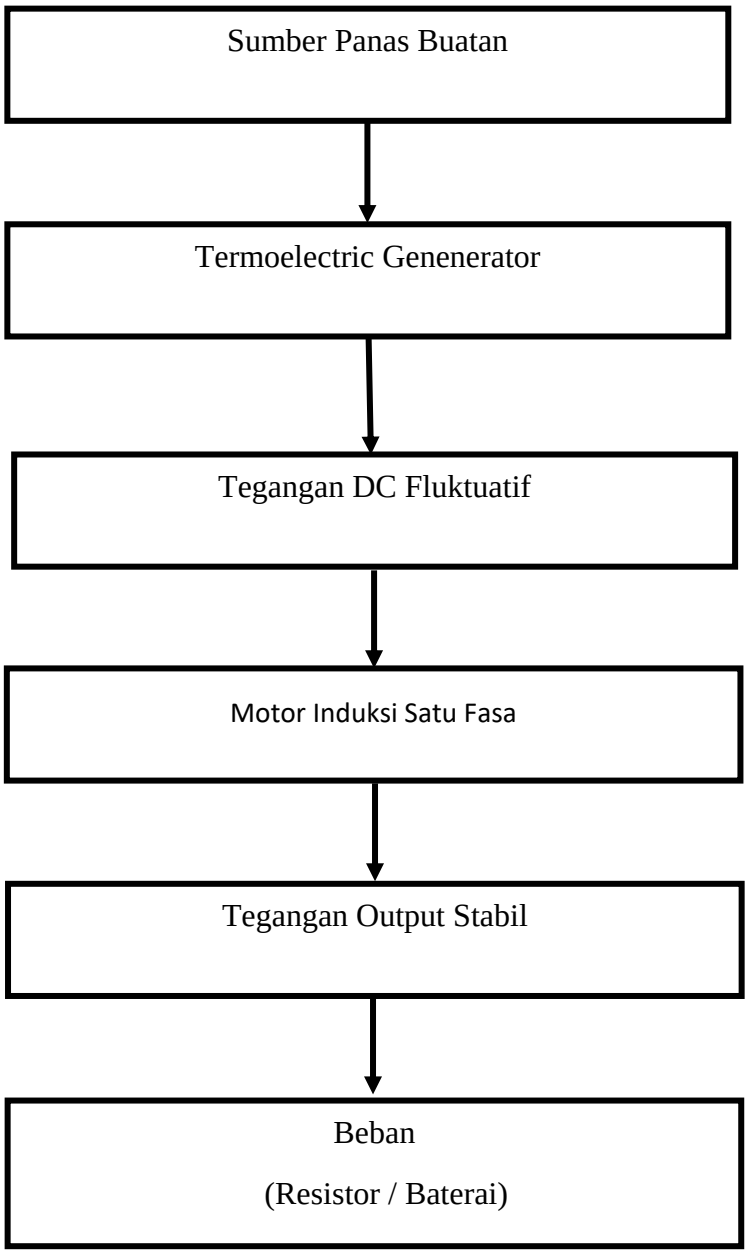
Tabel 2.1
Penelitian Terkait

No	Peneliti	Judul Penelitian	Variabel Ukur	Hasil Penelitian
1	Masaji, Saputra, & Hidayat (2019)	*Boost converter* meningkatkan tegangan TEG secara signifikan dan efisien	Rancang bangun sistem TEG menggunakan panas buangan industri	*output* TEG rendah dan tidak stabil, disarankan penggunaan konverter untuk menyesuaikan tegangan
2	Badri & Krismadinata (2020)	Analisis Rancang Bangun Konverter DC-DC Boost Berbasis PWM untuk Sistem Energi Terbarukan	*Boost converter* dengan kendali PWM untuk menaikkan tegangan dari sumber energi terbarukan	*Duty cycle* PWM sangat memengaruhi kestabilan tegangan dan efisiensi sistem
3	Puspa Jiwa Parahita Yunta et al. (2022)	Rancang Bangun DC-DC *Boost converter* pada Sistem Energi Terbarukan	*Boost converter* dikendalikan mikrokontroler dengan variasi *duty cycle*	Meningkatkan kestabilan *Output*, efisiensi konversi tinggi
4	Sanjaya, R. (2021)	Desain dan Implementasi *Boost converter* untuk Meningkatkan Tegangan *output Thermoelectric Generator*	Desain IC *switching* + pengujian langsung	*Boost converter* meningkatkan tegangan TEG secara signifikan dan efisien

5	Snyder & Toberer (2008)	Complex Thermoelectric Materials	Studi karakteristik material termoelektrik	Nilai ZT memengaruhi efisiensi TEG, tapi tetap dibutuhkan konversi tegangan dengan sistem *switching*
7	Marpaung & Al Hafiz (2021)	Pengendalian Kecepatan Motor DC Menggunakan PWM Berbasis Mikrokontroler	Pengaturan PWM untuk motor DC menggunakan mikrokontroler	Menjelaskan prinsip kerja PWM & pengaruh *duty cycle* dalam kendali beban elektronik
8	Rizal, M. A. & Fadhilah, L. (2021)	Analisis Kinerja *Boost converter* pada Sumber Energi Terbarukan Berbasis Tegangan Rendah	Analisis *Boost converter* terhadap variasi tegangan *input*	*Boost converter* efektif untuk menstabilkan tegangan dari TEG dan sumber energi sejenis lainnya

2.8 Kerangka Pikir

Kerangka pikir penelitian Analisis Kinerja *Boost converter* berbasis *Pulse Width Modulation* (PWM) pada *Termoelectric Generator* dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut ini:



Gambar 2.4 Kerangka Pikir