

Prototipe Sistem Generator Termoelektrik Sebagai Pembangkit Listrik Memanfaatkan Limbah Panas Pabrik Semen

Satria Syah Putra^{1*}, Habibullah²

^{1,2}Teknik Elektro Industri, Fakultas Teknik Universitas Negeri Padang, Indonesia

Corresponding author, email: satriasyahputra02@gmail.com

Abstrak

Energi listrik merupakan elemen penting bagi manusia dalam melaksanakan kegiatan sehari-hari. Salah satu sektor utama yang bergantung pada energi listrik adalah industri semen. *Rotary Kiln* adalah alat produksi di industri semen yang membutuhkan energi listrik yang paling tinggi. *Rotary kiln* digunakan untuk proses pembakaran hingga temperature 1400°C. Efisiensi energi panas pada *rotary kiln* yang tidak optimal sehingga menaikkan emisi udara dan efek rumah kaca pada pemanasan global. Oleh karena itu dibuatlah inovasi yang bertujuan untuk memanfaatkan limbah panas yang terbuang sia-sia menjadi energi listrik menggunakan generator termoelektrik (TEG) tipe SP 1848. TEG memanfaatkan efek *seebeck* atau perbedaan suhu dalam proses membangkitkan energi listrik. Untuk membangkitkan energi listrik TEG memanfaatkan *waterblock* pada sisi dingin dan panas daripada *ducting suspension preheater* pada sisi panas pada penelitian ini menggunakan *heater*. *Suspension preheater* merupakan alat produksi semen sebagai pemanasan awal material sebelum masuk ke pemanasan utama yaitu *rotary kiln*. TEG dirangkai 10 buah dengan rangkaian seri-paralel menghasilkan tegangan 8.7 V dan arus 0.08 A. dalam waktu 60 menit dapat mengisi baterai 5 V sebesar 500 mAh. Energi listrik pada baterai dapat digunakan sebagai penerangan pabrik maupun kebutuhan lainnya.

INFO.

Info. Artikel:

No. 451

Received. July, 24, 2023

Revised. August, 05, 2023

Accepted. August, 07, 2023

Page. 573 – 583

Kata kunci:

- ✓ *Thermoelectric Generator*
- ✓ *Seebeck effect*
- ✓ *Cement plant*
- ✓ *Renewable Energy*
- ✓ *Suspension Preheater*

Abstract

Electricity is an essential element for humans to carry out daily activities. One of the main sectors that heavily relies on electricity is the cement industry. Rotary Kiln is a production tool in the cement industry that requires the highest electricity consumption. It is used for the combustion process up to a temperature of 1400°C. The energy efficiency of heat in the rotary kiln is not optimal, leading to increased air emissions and greenhouse effects on global warming. Therefore, an innovation was made to utilize the waste heat that is discarded into generating electricity using a thermoelectric generator (TEG) of type SP 1848. TEG utilizes the Seebeck effect or temperature difference in the process of generating electricity. To generate electricity, TEG uses a waterblock on the cold side and heat from the ducting suspension preheater on the hot side, using a heater in this research. The suspension preheater is a cement production tool for the initial heating of materials before entering the main heating process in the rotary kiln. The TEG is assembled with 10 pieces in a series-parallel arrangement, producing a voltage of 8.7 V and a current of 0.08 A. In 60 minutes, it can charge a 5 V battery with a capacity of 500 mAh. The electricity stored in the battery can be used for factory lighting and other needs.

PENDAHULUAN

Energi merupakan elemen penting bagi makhluk hidup [1] dalam melaksanakan kegiatan sehari-hari. Penggunaan energi terus meningkat sejalan dengan perkembangan zaman. Saat ini, jenis energi yang paling umum digunakan berasal dari sumber fosil. Namun, persediaan bahan bakar fosil ini terus menurun seiring berjalannya waktu [2]. Energi fosil adalah jenis energi yang tidak dapat diperbarui, sehingga seiring berjalannya waktu, jumlah energi fosil semakin berkurang. Penggunaan fosil sebagai bahan bakar untuk pembangkit listrik juga memiliki dampak negatif terhadap lingkungan. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengembangkan sumber energi baru dan terbarukan (EBT) yang

ramah lingkungan guna mengurangi ketergantungan kita pada sumber daya fosil yang semakin menipis [3].

Energi listrik memainkan peran yang sangat penting dalam sebuah negara, termasuk di Indonesia. Penggunaan energi listrik telah menjadi sangat vital dalam kehidupan sehari-hari [4]. Salah satu sektor yang sangat bergantung pada energi listrik di Indonesia adalah industri semen, di mana proses produksi semen membutuhkan jumlah energi listrik yang besar, termasuk dalam operasional rotary kiln [5]. Rotary Kiln adalah alat yang digunakan untuk proses pembakaran material hingga temperature 1400°C, efisiensi panas pada Rotary Kiln bervariasi karena tergantung pada desain, ukuran, kondisi operasional, dan jenis kiln yang digunakan, umumnya efisiensi termal kiln dapat mencapai sekitar 50-70 %. Ada beberapa faktor yang menyebabkan banyak energi panas yang terbuang sia-sia ke alam sekitar yang diakibatkan oleh kebocoran udara panas, hilangnya panas melalui dinding kiln yang tak terisolasi dengan baik, atau hilangnya panas dalam gas buang, akibatnya efisiensi energi pada rotary kiln tidak optimal serta menaikkan emisi udara dan efek rumah kaca pada pemanasan global [6]. Karena itu, penting untuk mengambil manfaat dari energi panas yang terbuang dan mengubahnya menjadi energi listrik yang dapat digunakan untuk keperluan lainnya.

Limbah panas atau heat loss yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik dengan menggunakan teknologi generator termoelektrik (TEG) [7]. TEG adalah teknologi yang digunakan untuk secara langsung mengubah energi panas menjadi energi listrik dengan memanfaatkan perbedaan suhu [8]. Thermoelectric generator (TEG) beroperasi berdasarkan prinsip yang dikenal sebagai efek Seebeck. Efek Seebeck ini pertama kali ditemukan oleh ilmuwan Jerman, Thomas Johann Seebeck, pada tahun 1821 [9]. Thomas Seebeck melakukan percobaan dengan menggabungkan tembaga dan besi dalam satu rangkaian, kemudian meletakkan sebuah jarum kompas di antara kedua logam tersebut. Salah satu sisi logam dipanaskan, dan akibatnya jarum kompas bergerak. Fenomena ini menunjukkan adanya medan listrik yang dihasilkan di antara kedua logam tersebut, yang dikenal sebagai efek Seebeck [10]. Prinsip kerja TEG didasarkan pada efek *Seebeck*, di mana jika dua material semikonduktor yang berbeda disambungkan pada salah satu ujungnya, dan suhu yang berbeda diberikan pada sambungan tersebut, akan terjadi perbedaan tegangan antara ujung satu dan ujung lainnya [11]. Adapun karakteristik output tegangan dari efek seebeck memiliki beberapa ciri khas yaitu tergantung perbedaan suhu, bergantung pada material termoelektrik, non-linearitas hubungan antara perbedaan suhu dan tegangan, dan rentang tegangan terbatas. Dan tentunya bahwa karakteristik output tegangan efek seebeck dapat berbeda-beda tergantung pada material termoelektrik, suhu, dan kondisi eksperimental yang digunakan dalam aplikasi tertentu [12].

Artikel ini bertujuan untuk menggali potensi pemanfaatan limbah panas pabrik semen sebagai sumber energi alternatif dalam bentuk listrik melalui prototipe sistem generator termoelektrik [13]. Dengan demikian, penelitian ini memiliki tujuan untuk merancang dan menguji prototipe yang mampu mengubah limbah panas menjadi energi listrik yang berguna. Manfaat dari artikel ini sangat beragam. Pertama, pemanfaatan limbah panas sebagai sumber energi terbarukan akan dijelaskan dan berkontribusi pada upaya mengurangi ketergantungan pada sumber energi fosil dan mengurangi emisi gas rumah kaca. Kedua, implementasi prototipe sistem termoelektrik di pabrik semen akan meningkatkan efisiensi proses produksi, membantu mengurangi kehilangan energi, dan menghemat biaya operasional. Selain itu, pengurangan dampak lingkungan juga merupakan manfaat penting dari artikel ini, karena pemanfaatan limbah panas akan mengurangi emisi panas yang mencemari lingkungan. Dalam jangka panjang, penelitian ini berpotensi mendorong pengembangan teknologi termoelektrik yang lebih efisien dan efektif dalam memanfaatkan limbah panas dari berbagai sumber industri. Seiring dengan itu, artikel ini juga dapat memberikan data dan informasi relevan bagi kebijakan publik terkait pemanfaatan energi terbarukan dan pengelolaan limbah industri. Bukti empiris dari penelitian ini dapat menjadi pijakan dalam menyusun aturan dan insentif yang mendorong adopsi teknologi termoelektrik di pabrik-pabrik industri di masa depan.

Dasar Teori

Efek *Seebeck* merupakan efek yang digunakan oleh Generator Termoelektrik (TEG) untuk mengubah panas menjadi energi listrik. Efek *Seebeck* terdiri dari dua jenis kaki, yaitu kaki tipe p- dan n-

(dapat berupa semikonduktor atau logam), yang diatur dalam susunan seri dan paralel. Ketika terdapat gradien suhu (ΔT) antara kedua kaki TEG, panas akan berdifusi dari sisi panas (TH) ke sisi dingin (TC), menghasilkan perbedaan potensial atau $\Delta V = S\Delta T$. Di sini, S mewakili koefisien efek Seebeck, yang bernilai positif untuk tipe p dan negatif untuk konduksi tipe n [14].

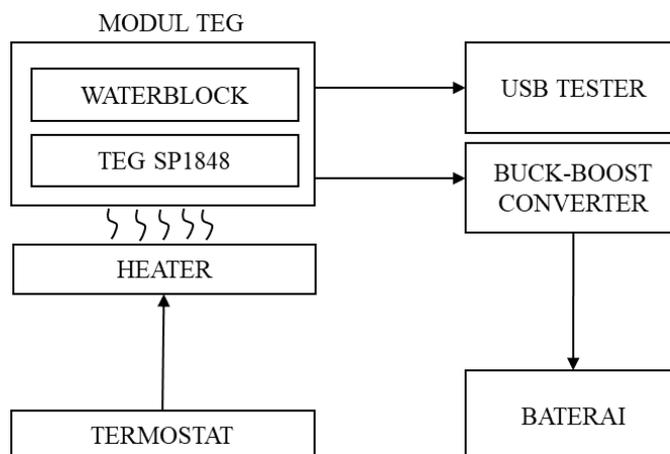
METODE PENELITIAN

Penelitian mengenai Modul Termoelektrik Generator (TEG) ini dilakukan dalam bentuk eksperimen yang melibatkan beberapa tahap, dimulai dari perancangan, perakitan alat, pengujian alat, pengumpulan data, dan analisis data yang dihasilkan oleh modul. Perancangan menjadi langkah awal yang krusial dalam proses pembuatan dan pengembangan alat ini [15]. Tujuannya adalah untuk memudahkan dan menyelaraskan proses pembuatan, serta mempertimbangkan material, komponen mekanik, dan hardware yang diperlukan. Proses perancangan sistem terdiri dari perancangan mekanik, perancangan waterblock, perancangan heater dan thermostat, perancangan rangkaian peltier, hingga akhirnya menjadi sebuah modul TEG.

Dalam penelitian ini, TEG SP 1848 digunakan sebagai sistem untuk mengkonversi limbah panas yang terbuang sia-sia dari suspension preheater pada pabrik semen menjadi energi listrik melalui efek Seebeck. Pada prototipe ini, sisi panas yang seharusnya diimplementasikan pada ducting suspension preheater, digantikan dengan menggunakan heater dengan suhu yang sama dengan suhu limbah panas yang dihasilkan suspension preheater. Sebelum melakukan pengujian Modul TEG, terlebih dahulu akan dilakukan pengujian awal untuk membandingkan efektivitas penggunaan media pendingin antara *heatsink* fan 12v dan waterblock, dengan perbedaan suhu yang sama pada setiap pengujian. Setelah media yang akan digunakan ditetapkan, maka dilanjutkan ke tahap pengujian utama. Energi listrik yang dihasilkan oleh Modul TEG akan diinputkan ke baterai 5v dalam interval waktu 1 jam, sebanyak 6 kali. Selama pengujian, tegangan, arus, dan daya yang masuk ke baterai akan terus dipantau dan ditampilkan pada mini USB Tester.

Blok Diagram

Sebelum memulai perancangan dan perakitan alat, langkah awal yang diambil adalah membuat blok diagram untuk menggambarkan sistem kerja alat yang akan dibuat. Diagram blok adalah bentuk diagram berbentuk kotak (blok) yang berfungsi untuk mengilustrasikan proses kerja tertentu [16]. Gambar 1 di bawah ini menunjukkan blok diagram *Thermoelectric Generator* (TEG) dalam mengkonversikan panas menjadi energi listrik.



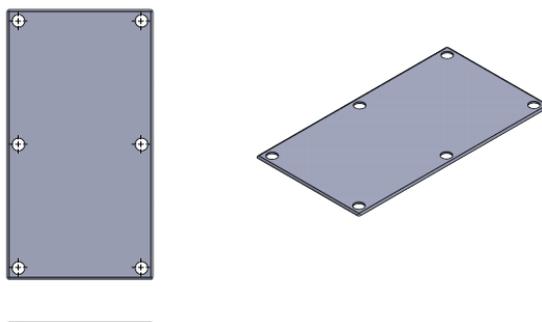
Gambar 1. Blok Diagram Perancangan Alat

Penelitian ini menggunakan sebuah blok diagram sistem yang terdiri dari beberapa komponen yang berperan penting dalam proses konversi energi pada Modul Termoelektrik Generator (TEG).

Pertama, Modul TEG merupakan unit TEG utama yang menyediakan sistem pendukung untuk proses pengkonversian energi. Selanjutnya, Waterblock berfungsi sebagai media pendingin pada sisi dingin Modul TEG, membantu menjaga suhu agar tetap rendah untuk meningkatkan efisiensi. Di sisi panas Modul TEG, terdapat Heater, yang berperan sebagai elemen pemanas untuk menghasilkan perbedaan suhu yang diperlukan dalam proses konversi energi. Untuk mengendalikan suhu pada Heater dan mempermudah pengambilan data, digunakan sebuah Thermostat sebagai pengatur suhu. Thermostat ini memastikan bahwa suhu pada Heater tetap sesuai dengan parameter yang diinginkan selama pengujian. Selama proses pengujian, pengukuran tegangan, arus, resistansi, dan daya dilakukan dengan menggunakan USB Tester. USB Tester ini berfungsi sebagai pengganti fungsi multimeter dan menampilkan semua parameter tersebut secara bersamaan dalam waktu konstan melalui LED pada display. Selanjutnya, untuk mengisi baterai dengan daya yang dihasilkan oleh Modul TEG, digunakan Buck-Boost Converter. Buck-Boost Converter berperan dalam menaikkan dan menurunkan tegangan output dari TEG sehingga cocok untuk pengisian baterai. Akhirnya, Baterai digunakan sebagai penyimpan daya hasil konversi energi oleh Modul TEG. Baterai ini akan mengumpulkan dan menyimpan daya listrik yang dihasilkan, sehingga dapat digunakan untuk kepentingan lainnya pada industri.

Rancangan Mekanik

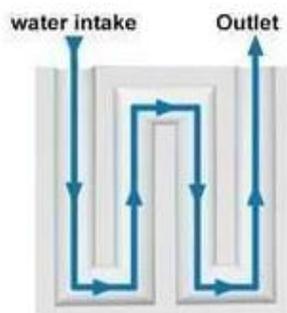
Penelitian ini menggunakan plat besi dengan ukuran 15cm x 30cm dengan ketebalan 2mm dapat dilihat pada gambar 3.



Gambar 2. Perancangan Plat besi

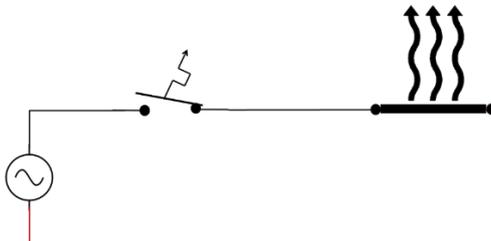
Plat besi dilubangi dengan menggunakan bor untuk menjadi lubang mur yang digunakan sebagai perekat dan penguat komponen-komponen yang ada di dalam Modul TEG. Plat dibuat menjadi 2 buah bagian yaitu sebagai plat sisi dingin dan plat sisi panas.

Waterblock digunakan sebagai pendingin pada sisi dingin Modul TEG. Pada waterblock terdapat dua saluran diantara lain berfungsi untuk water intake dan outlet. Adapun rangkaian aliran air pada waterblock dapat dilihat pada gambar 3.



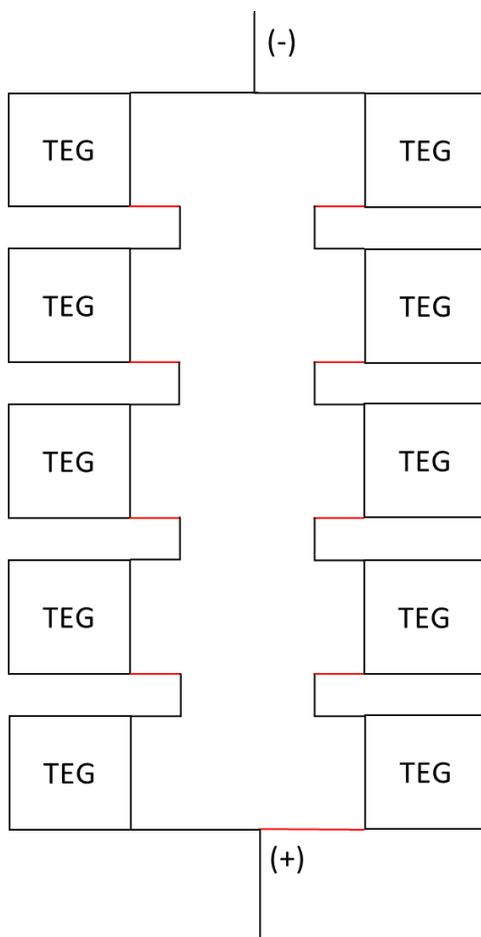
Gambar 2. Perancangan Waterblock

Heater dan thermostat digital berperan penting dalam tugas akhir ini, heater berfungsi sebagai pemanas sisi panas dan thermostat berfungsi sebagai pengontrol suhu panas yang akan dihasilkan heater supaya penulis mudah dalam mengambil data yang dihasilkan oleh Modul TEG [17]. Heater dihubungkan seri dengan rangkaian thermostat seperti gambar 4.



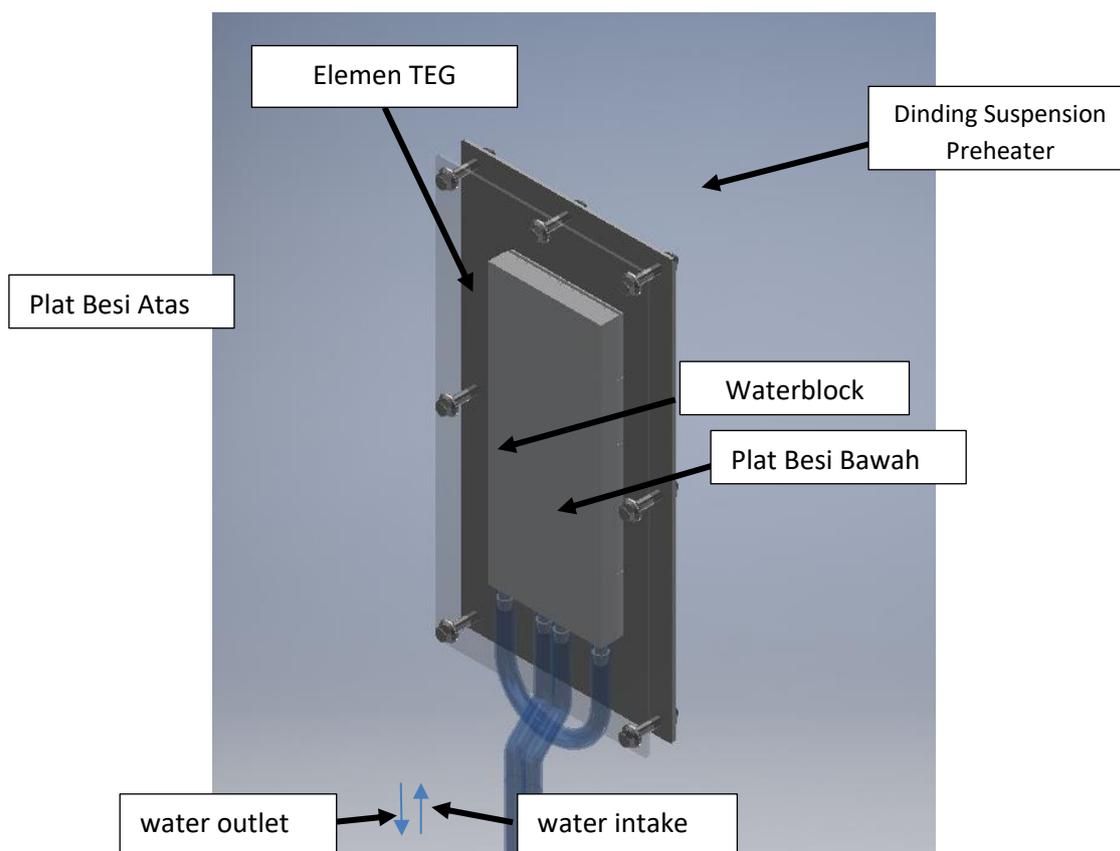
Gambar 3. Perancangan Heater dan Thermostat

Rangkaian TEG dirangkai menggunakan 10 buah elemen TEG yang dirangkai secara seri-paralel.



Gambar 4. Perancangan Rangkaian TEG

Pada Modul TEG terdapat 10 buah elemen TEG yang pada sisi panas terdapat plat besi yang akan mengkonduksikan panas ke sisi panas TEG sedangkan pada sisi dingin akan diberi waterblock sebagai pendingin sisi dingin TEG, kemudian TEG di tutup lagi dengan plat dan dikuatkan dengan baut dan mur sehingga jadilah sebuah Modul TEG seperti gambar 5.



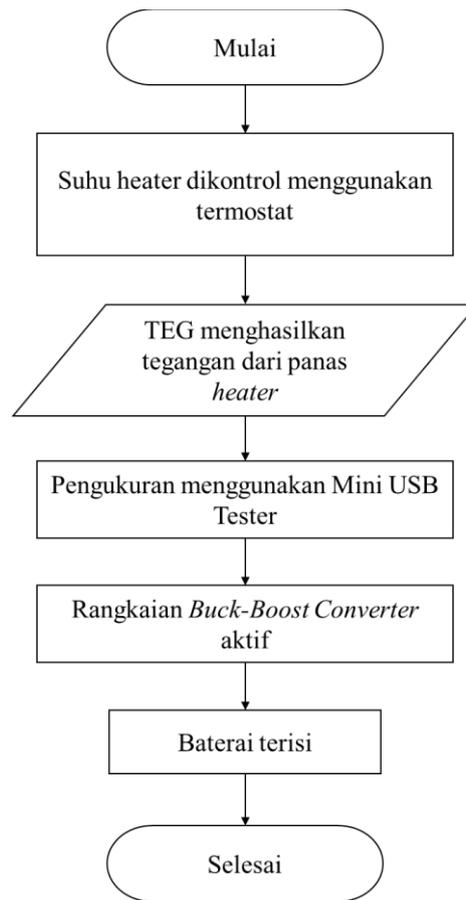
Gambar 5. Desain Modul TEG

Prinsip Kerja

Prinsip kerja alat ini untuk membangkitkan listrik, pada mulanya waterblock dialiri air, kemudian heater dihidupkan dan suhu heater dikontrol dengan menggunakan Termostat. Setelah kondisi perbedaan suhu stabil maka dipasangkan Mini USB Tester, Mini USB Tester ini berfungsi sebagai pengganti Multimeter yang nantinya akan langsung menampilkan tegangan, arus, resistansi, daya, dan penggunaan daya (wh) pada displaynya. Setelah tegangan yang didapatkan stabil kemudian keluaran Modul TEG dihubungkan pada Buck-Boost Converter (DC-DC Converter). Buck-Boost Converter pada alat ini berfungsi untuk menstabilkan, menurunkan dan menaikkan tegangan yang dihasilkan oleh Modul TEG agar menyesuaikan tegangan masukkan dari pada baterai. Selanjutnya baterai pada penggunaan aktual dilapangan yaitu tepatnya di Pabrik Semen akan digunakan sebagai baterai alternatif untuk alat-alat inspeksi pengecekan seperti Vibrator, Thermal Imager, dll.

Flowchart

Pada perancangan Modul Termoelektrik Generator (TEG) ini agar dapat beroperasi dengan baik dan sesuai yang diinginkan, dibutuhkan pembuatan flowchart sebagai konsep dari Modul TEG dapat menghasilkan output berupa daya yang ditampung oleh baterai. Flowchart atau diagram alir sendiri adalah sebuah algoritma yang dibuat untuk menggambarkan alur kerja dari mikrokontroler. Berikut merupakan flowchart untuk Modul TEG. Pada gambar 6 menunjukkan diagram alir penelitian ini bertujuan untuk modul TEG dapat menghasilkan listrik dan disimpan di dalam baterai dengan proses pengkonversian menggunakan heater.



Gambar 6. Flowchart Sistem

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bagian ini, akan diuraikan hasil dari perancangan dan pengujian sistem yang bertujuan untuk mengevaluasi kinerja peralatan yang dirancang, apakah dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan perancangan yang telah dibuat. Sebagai karakteristik penting, dengan memperhatikan tegangan output yang dihasilkan oleh modul TEG, yang sangat dipengaruhi oleh perbedaan suhu dan jumlah serta tipe Peltier yang digunakan. Efisiensi modul TEG juga menjadi perhatian utama, karena hal ini menentukan seberapa baik panas dapat dikonversi menjadi listrik. Oleh karena itu, dengan melakukan perhitungan dan pengujian secara menyeluruh untuk mengoptimalkan kinerja modul TEG dan memastikan kehandalannya dalam menghasilkan daya listrik. Hasil dari konversi energi yang dihasilkan oleh modul TEG akan diinputkan ke baterai 5 volt, yang akan digunakan untuk berbagai kepentingan lainnya, seperti penerangan dan pengisian perangkat elektronik. Pendekatan berkelanjutan dalam memanfaatkan limbah panas produksi semen sebagai sumber panas menunjukkan komitmen untuk menggunakan sumber daya terbarukan dan ramah lingkungan dalam upaya memperoleh energi listrik tambahan.

Pada perancangan penelitian ini menggunakan TEG SP-1848 sebagai komponen yang mengkonversikan perbedaan suhu menjadi energi listrik. Sebelum dirancang menjadi sebuah modul, akan dilakukan pengujian awal dimana dilakukan pengujian dengan menggunakan 1 buah peltier TEG untuk mengetahui penggunaan media pendingin yang efektif digunakan sebagai sisi dingin pada modul teg nantinya. Pengujian ini dilakukan dengan membuktikan penggunaan media pendingin *waterblock* lebih efektif digunakan dibandingkan *heatsink fan 12v*. Setelah ditetapkan maka 10 buah peltier dirancang menjadi sebuah modul seperti tampak pada gambar 7. Modul TEG selanjutnya akan dilakukan pengujian dengan menggunakan *heater* dan *waterblock*. tegangan yang dihasilkan oleh modul teg akan di turunkan menggunakan *buck-boost converter* menjadi 5v menyesuaikan masukan baterai.

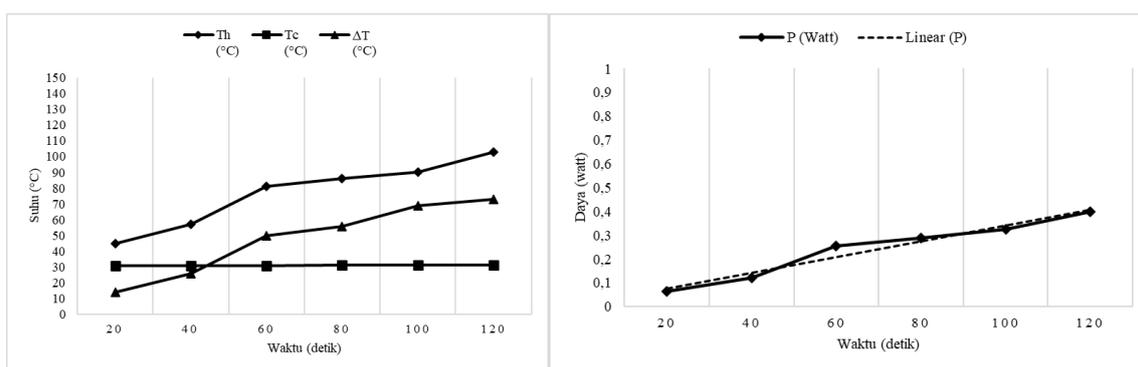


Gambar 7. Tampilan Modul TEG

Heatsink fan 12v dc merupakan salah satu media pendingin yang digunakan untuk mendukung pengkoversian energi panas menjadi energi listrik. Berdasarkan hasil dari percobaan pengujian dapat diambil data sebagai berikut.

Tabel 1. Pengujian 1 buah Peltier TEG

No	Pengujian	Waktu (detik)	Th (°C)	Tc (°C)	ΔT (°C)	Voc (Volt)	V (Volt)	I (A)	P (Watt)
1	1 Buah Peltier	20	45	31.0	14	1.2	0.8	0.08	0.064
	(Pengujian 1)	40	57	31.0	26	2.0	1.1	0.11	0,121
	Hotside :	60	81	31.0	50	2.3	1.6	0.16	0.256
	heater	80	86	31.1	55.9	2.6	1.7	0.17	0,289
	ColdSide :	100	90	31.1	68.9	2.8	1.8	0.18	0.324
	heatsink dan Kipas	120	103	31.1	72.9	3.0	2	0.2	0.4



(a)

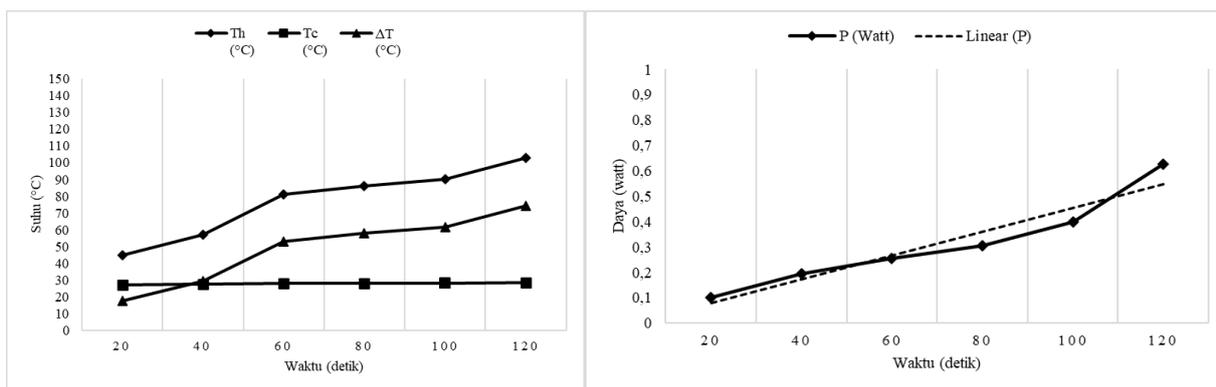
(a)

Gambar 8. (a) Grafik Kenaikan Suhu Pengujian 1, (b) Grafik Pengujian Daya Pengujian 1

Settelah dilakukan pengujian dengan menggunakan heatsink fan, maka akan dilakukan pengujian dengan menggunakan waterblock. Dapat dilihat pada tabel data berikut.

Tabel 2. Pengujian Tahap 2

No	Pengujian	Waktu (detik)	Th (°C)	Tc (°C)	ΔT (°C)	Voc (Volt)	V (Volt)	I (A)	P (Watt)
2	1 Buah Peltier (Pengujian 2) HotSide : heater ColdSide : Waterblock	20	45	27.2	17.8	1.2	1	0.1	0.1
		40	57	27.5	29.5	2	1.4	0.14	0.196
		60	81	27.9	53,1	3	1.6	0.16	0.256
		80	86	28.0	58	3.2	1.8	0.18	0.306
		100	90	28.2	61,8	3.4	2	0.2	0.4
		120	103	28.5	74,5	3.6	2.5	0.25	0.625



(a)

(a)

Gambar 9. (a) Grafik Kenaikan Suhu Pengujian 1, (b) Grafik Pengujian Daya Pengujian 2

Pada dua tahap pengujian (1, 2) yang telah dilakukan, penggunaan waterblock sebagai pendingin pada cold side lebih efektif digunakan daripada menggunakan heatsink dan kipas. Daya yang dihasilkan oleh 1 peltier dengan pendingin waterblock lebih tinggi dibandingkan dengan menggunakan heatsink dan kipas. Ini dikarenakan waterblock dapat menyalurkan dingin yang dihasilkan lebih stabil dibandingkan heatsink dan kipas, sehingga perbedaan suhu atau ΔT yang dihasilkan besar.



Gambar 10. Pengujian 1 Buah Modul TEG



Gambar 11. Hasil Tegangan , Arus, Daya, dan waktu secara Realtime menggunakan *Mini USB Tester*

Tabel 3. Pengujian Tahap 3

No	Pengujian	Waktu (Menit)	Th (°C)	Tc (°C)	ΔT (°C)	Voc (Volt)	V (Volt)	I (A)	E (Watt hour)	Batt (mAh)
3	1 Buah	60	92.5	38	54.5	8.7	4.87	0.08	0.4	83
	Modul TEG	120	92.5	38	54.5	8.7	4.87	0.08	0.8	166
	(Pengujian	180	92.5	38	54.5	8.7	4.87	0.08	1.2	249
	3) <i>Hotside</i> :	240	92.5	38	54.5	8.7	4.87	0.08	1.6	332
	<i>heater</i>	300	92.5	38	54.5	8.7	4.87	0.08	2.0	415
	<i>ColdSide</i> :	360	92.5	38	54.5	8.7	4.87	0.08	2.4	500
	<i>Waterblock</i>									

Pada tahap ketiga dilakukan dengan waktu yang cukup lama untuk mengisi baterai dengan input 5 volt, karena arus yang dihasilkan sangat kecil. Dengan rangkaian seri parallel 1 Modul TEG mampu menghasilkan tegangan bukaan (Voc) 8.7 Volt, setelah diturunkan menjadi 5 volt menyesuaikan tegangan input baterai arus yang dihasilkan oleh 1 modul TEG adalah 0.08 Volt. Setelah diamati, hal ini disebabkan oleh perbedaan suhu yang rendah pada saat pengujian dan pengambilan data 1 modul TEG, dengan suhu tinggi yang dihasilkan heater (200°C - 300°C namun setelah melalui plat besi pada sisi panas menjadi 92.5°C) mempengaruhi suhu waterblock dengan aliran air normal yang tidak dapat mengkonduksikan panas dengan lebih cepat. Sehingga suhu pada *cold side* naik dari 29°C menjadi 38°C.

Hasilnya dapat dilihat pada tabel 3 bahwa dengan waktu kurang lebih 1 jam dapat mengisi baterai 5 volt sebesar 83 mAh. Untuk dapat mengisi penuh baterai dengan kapasitas 3000 mAh dengan arus yang dihasilkan 1 modul TEG 0.08 A butuh waktu 36 jam.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil dan pembahasan dalam penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa Modul Termoelektrik Generator (TEG) berhasil mengkonversikan panas menjadi energi listrik dengan menggunakan efek Seebeck dan didukung oleh penggunaan pendingin waterblock. Pengujian yang dilakukan menunjukkan bahwa dengan memberikan perbedaan suhu (ΔT) sebesar 54.5 °C selama kurun waktu 360 menit, Modul TEG menghasilkan tegangan bukaan sebesar 8.7 volt, yang kemudian dapat disesuaikan menjadi 4.87 volt setelah tegangan diinputkan ke baterai 5 volt. Selain itu, arus sebesar 0.08 A berhasil menghasilkan kapasitas 500 mAh pada baterai.

Penerapan alat ini pada pabrik semen yang beroperasi selama 24 jam memiliki potensi yang menjanjikan. Energi listrik yang dihasilkan dapat disimpan dan dijadikan sebagai alternatif sumber daya pada berbagai keperluan di pabrik, seperti penerangan, pengisian baterai pada alat inspeksi pabrik, dan

kebutuhan lainnya. Dengan adanya Modul TEG yang efisien dan berkelanjutan, pabrik semen dapat memanfaatkan limbah panas yang sebelumnya terbuang sia-sia menjadi sumber daya listrik yang berguna.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sujiwa, A. Atmiasri, and E. Purwanto, "Sistem Kontrol Efisiensi Daya Otomatis Pada Perangkat Prototipe Desalinasi Dual Output Bertenaga Sel Surya," *WAKTU J. Tek. UNIPA*, vol. 17, no. 1, pp. 26–31, 2019, doi: 10.36456/waktu.v17i1.1839.
- [2] E. Roza and M. Mujirudin, "Perancangan Pembangkit Tenaga Surya Fakultas Teknik UHAMKA," *Ejournal Kaji. Tek. Elektro*, vol. 4, no. 1, pp. 16–30, 2019, [Online]. Available: [http://download.garuda.ristekdikti.go.id/article.php?article=984946&val=11994&title=Perancangan Pembangkit Tenaga Surya Fakultas Teknik Uhamka](http://download.garuda.ristekdikti.go.id/article.php?article=984946&val=11994&title=Perancangan%20Pembangkit%20Tenaga%20Surya%20Fakultas%20Teknik%20Uhamka)
- [3] M. Z. Ridlo, B. Setiawan, and Suhanan, "Pengembangan Model Desa Mandiri Energi dengan Memanfaatkan Sumber Energi Terbarukan Studi Kasus Desa Sasiil," *Semin. Nas. INOBALI*, no. 3, pp. 517–524, 2019.
- [4] V. Vincent, J. V. Harryanto, A. M. Lubis, and J. W. Simatupang, "Kotak Kendali Perangkat Elektronik Nirkabel untuk Aplikasi Smart Home," *J. Telekomun. dan Komput.*, vol. 10, no. 2, p. 67, 2020, doi: 10.22441/incomtech.v10i2.8264.
- [5] Teguh Sasono, Tjatur Udjiyanto, "Optimasi siklus termodinamika integrasi boiler AQC dan PH pada desain WHRPG di industri semen," *J. Tek. Energi*, vol. 9, no. 1, pp. 51–57, 2019, doi: 10.35313/energi.v9i1.1645.
- [6] B. C. Pamungkas, D. Pembimbing, P. Magister, B. Keahlian, R. Energi, and D. T. Fisika, "Tesis-TF5471," 2019.
- [7] H. Firmansyah, *Studi Optimalisasi Konversi Panas Sisa Gas Buang HRSG PLTGU Keramasan ke Energi Listrik Dengan Teknologi Termoelektrik Generator*, vol. 4, no. 1. Palembang, 2023.
- [8] muhammad ady Pradana, "Prototipe Pembangkit Listrik Termoelektrik Generator Menggunakan Penghantar Panas Aluminium, Kuningan dan Seng," *Pap. Knowl. . Towar. a Media Hist. Doc.*, vol. 5, no. 2, pp. 40–51, 2014.
- [9] A. SETIAWAN, N. A. ZAKARIA, A. MUSAFA, and S. SUJONO, "Perancangan Pembangkit Listrik Termoelektrik pada Proses Refrigerasi Air Conditioner dengan Metode Fuzzy Logic," *ELKOMIKA J. Tek. Energi Elektr. Tek. Telekomun. Tek. Elektron.*, vol. 9, no. 1, p. 1, 2021, doi: 10.26760/elkomika.v9i1.1.
- [10] M. Wiranda, "Analisis Performa Kinerja Termoelektrik Generator Pada Kompor Sebagai Pembangkit Listrik," 2021.
- [11] S. Samsugi, Ardiansyah, and A. Suwanto, "Pemanfaatan Peltier dan Heater Sebagai Alat Pengontrol Suhu Air Pada Bak Penetasan Telur Ikan Gurame," *Conf. Inf. Technol. Inf. Syst. Electr. Eng.*, pp. 295–299, 2018, [Online]. Available: <http://arduino.cc>
- [12] B. Oktavianus, "Analisa Pengaruh Jumlah dan Susunan Termoelektrik Generator Terhadap Karakteristik Termoelektrik Generator Pada Motor Bensin 4 Cylinder," p. 6, 2021.
- [13] F. Nasrillah, F. Teknik, and U. B. Surabaya, "Prototype Hybride Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Panas dan Angin Dengan Kompor Listrik dan Exhaust," vol. 1, no. 2, pp. 103–114, 2021.
- [14] F. Nuraida, E. Taryana, and N. Winanti, "Pemanfaatan Panas Pada Kompor Gas Sebagai Energi Alternatif Menggunakan Generator Termoelektrik," pp. 23–29.
- [15] A. Wijaya, "Rancang Bangun Robot Pembersih Lantai Menggunakan Arduino Nano Dengan Sistem Pengendali Berbasis Android," vol. 8, pp. 98–107, 2021.
- [16] M. S. Hasan, M. N., Wahid, H., Nayan, N., & Mohamed Ali, "Inorganic thermoelectric materials: A review. International Journal of Energy Research," vol. 8, p. 44, 2020.
- [17] M. M. Ali, "Pengaruh Thermostat dan Thermal Fuse Pada Produk Penanak Nasi Terhadap Keselamatan Pengguna on User Safety," vol. 3, pp. 502–514, 2022.