



YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL
Jl. Moh. Kahfi II, Bhumi Srengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640
Telp. 021-7270090 (hunting), Fax 021-7866955, hp: 081291030024
Email: humas@istn.ac.id Website: www.istn.ac.id

SURAT PENUGASAN TENAGA PENDIDIK

Nomor : 091-IV/03.1-F/IX/2025

SEMESTER GANJIL TAHUN AKADEMIK 2025/2026

Nama	: Ariman, ST, MT	Status Pegawai	: Dosen Tetap
NIK/ NIDN/ NIDK	: 313026703	Program Studi	: Teknik Elektronika
Jabatan Akademik	: Lektor		

Bidang	Perincian Kegiatan	Tempat	Jam	Kredit (SKS)	Hari
I. PENDIDIKAN & PENGAJARAN	1. Pengajaran di kelas termasuk laboratorium				
	1. Dasar Tenaga Listrik	0	20:00 s.d 21:00	2	Selasa
	2. Fisika 1	R-D4	18:40 s.d 20:20	2	Kamis
	3. Sistem Instrumentasi Elektronik	MTE1	13:00 s.d 14:20	2	Sabtu
	4. Teknologi MEMS - NEMS	R-D5	18:00 s.d 19:00	2	Selasa
	2. Pembimbing				
	1. Seminar				
	2. Kerja Praktek				
	3. Tugas Akhir/Tesis			1	
	4. Pembimbing Akademik			1	
	3. Penguji				
	1. Tugas Akhir/Tesis			1	
	2. Kerja Praktek				
	4. Tugas Tambahan				
	1. Menjabat Sebagai Ka. Prodi Teknik Elektronika D3			1	
II. PENELITIAN	1. Penelitian Ilmiah			1	
	2. Penulisan Karya Ilmiah				
	3. Penulisan Diktat Kuliah				
	4. Menerjemahkan Buku Kuliah				
	5. Pengembangan Program Kuliah Kurikulum				
	6. Pengembangan Bahan Ajar			1	
III. PENGABDIAN PADA MASYARAKAT	1. Menduduki jabatan di Pemerintahan				
	2. Pengembangan Hasil Pendidikan dan Penelitian				
	3. Memberikan penyuluhan/pelatihan/penataran/ceramah			1	
	4. Memberikan Pelayanan Kepada Masyarakat				
	5. Menulis karya Pengmas yang tidak dipublikasikan				
	6. Pengelolaan Jurnal Ilmiah				
IV. PENUNJANG	1. Menjadi anggota/panitia pada badan/lembaga suatu PT				
	2. Menjadi anggota Badan Lembaga Pemerintah				
	3. Menjadi anggota organisasi profesi				
	4. Mewakili PT/lembaga pemerintah, duduk dalam panitia antar lembaga				
	5. Menjadi anggota delegasi nasional ke pertemuan internasional				
	6. Berperan Serta Aktif dalam pertemuan ilmiah/seminar			1	
	7. Anggota dalam tim layanan pendidikan				
Jumlah Total				16	

Kepada yang bersangkutan akan diberikan gaji/honorarium sesuai dengan peraturan penggajian yang berlaku di Institut Sains dan Teknologi Nasional. Penugasan ini berlaku dari tanggal 01 September 2025 sampai dengan 28 Februari 2026

Tembusan :

1. Wakil Rektor 1 - ISTN
2. Wakil Rektor 2 - ISTN
3. Ka. Biro Sumber Daya Manusia - ISTN
4. Arsip



Jakarta, 01 September 2025
Dekan FST

Dr. Ir. Kun Wardana Abyoto, M.T.
NIDN: 0311086903



YAYASAN PERGURUAN CIKINI
INSTITUTSAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL

Jl. Moh. Kahfi II, Bhumi Srengseng Indah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640

Telp. 021-7270090 (hunting), Fax. 021-7866955, hp: 081291030024

Email : humas@istn.ac.id Website : www.istn.ac.id

SURAT TUGAS DOSEN PEMBIMBING SKRIPSI

Nomor : 46 - TA/02.1-Gse/X/2025

Semester : Ganjil 2025/2026

Ketua Program Studi S-1 Teknik Elektro – Fakultas Sains Teknik Dan Terapan – Institut Sains dan Teknologi Nasional Jakarta, memberikan tugas kepada :

Nama dan gelar dosen : Dr.Ing.H.Agus Sofwan,M.Eng.Sc.
NIDN/NUPTK : 2063740641100053
Program Studi : Teknik Elektro S1
Jabatan Akademik : Dosen
Sebagai : Dosen Pembimbing 1

Nama dan gelar dosen : Ariman,ST,MT
NIK/NUPTK : 1545745646130062
Program Studi : Teknik Elektro S1
Jabatan Akademik : Dosen
Sebagai : Dosen Pembimbing 2

Sebagai Pembimbing Skripsi atas nama :

Nama : Magdalena Gultom
NIM : 24224708
Judul Skripsi : Pemodelan dan Simulasi Sistem Termoelektrik Peltier Untuk Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik

Surat Tugas ini berlaku selama 1 (satu) semester, terhitung mulai :

Semester/Tahun Akademik : Ganjil 2025/2026

Periode Bulan : Oktober 2025 – Februari 2026

Kepada mahasiswa diberikan hak untuk melakukan konsultasi bimbingan minimal 6 x sepanjang semester yang telah ditetapkan, dengan jadwal yang telah disepakati dengan mengisi formulir bimbingan yang disediakan dan mematuhi seluruh ketentuan yang berlaku.

Kepada dosen pembimbing wajib memberikan bimbingan sesuai dengan bidang keilmuan yang dimilikinya dan waktu yang telah disepakati, dengan menjaga kode etik profesional dosen, mengisi formulir bimbingan yang telah disediakan pada setiap kunjungan, menandatangani lembar pengesahan dan mendokumentasikan karya ilmiah mahasiswa dalam soft file yang telah dibimbingnya.

Demikian, Surat Tugas ini dibuat untuk dapat dilaksanakan dengan penuh tanggungjawab.

Dikeluarkan di : Jakarta Pada
Tanggal : Oktober 2025
Ketua Program Studi,

Ir. Irmayani, MT
NUPTK/NIK: 6342743644230203

Tembusan Yth. :

1. Mahasiswa Ybs.;
2. Arsip;

Note:

1. Surat Tugas diserahkan ke Pembimbing
2. Sebelum diserahkan ke Pembimbing Surat Tugas di *Photocopy* dan disimpan untuk syarat daftar sidang



**PEMODELAN DAN SIMULASI SISTEM TERMOELEKTRIK *PELTIER*
UNTUK KONVERSI ENERGI PANAS MENJADI ENERGI LISTRIK**

Nama : Magdalena Gultom

NIM : 24224708

**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS TERAPAN DAN TEKNOLOGI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL
JANUARI 2026**

**PEMODELAN DAN SIMULASI SISTEM TERMoeLEKTRIK *PELTIER*
UNTUK KONVERSI ENERGI PANAS MENJADI ENERGI LISTRIK**

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik Elektro

Nama : Magdalena Gultom

NIM : 24224708



**PROGRAM STUDI TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS SAINS TERAPAN DAN TEKNOLOGI
INSTITUT SAINS DAN TEKNOLOGI NASIONAL
JANUARI 2026**

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Magdalena Gultom

NIM : 24224708

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Pemodelan Dan Simulasi Sistem Termoelektrik *Peltier*
Untuk Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik

Dengan ini saya menyatakan bahwa Skripsi ini merupakan hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar. Pernyataan ini dibuat secara sukarela dan tanpa paksaan dari pihak manapun. Jika dikemudian hari pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya memahami sepenuhnya bahwa pihak Fakultas memiliki hak untuk memberlakukan sanksi.

Jakarta, 27 Januari 2026

Magdalena Gultom

24224708

LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI / TUGAS AKHIR

Nama : Magdalena Gultom
NIM : 24224708
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Pemodelan Dan Simulasi Sistem Termoelektrik *Peltier*
Untuk Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik

Skripsi ini telah disetujui dan disahkan sebagai salah satu syarat menyelesaikan Pendidikan Program Sarjana Teknik Elektro (S1) Fakultas Sains Terapan dan Teknologi

Jakarta, 27 Januari 2026

Menyetujui

Ketua Program Studi Teknik Elektro

Dr. (Han), Dipl.-Ing. Hj. Lilly S. Wasitova, M.PM.

LEMBAR PERSETUJUAN

Nama : Magdalena Gultom
NIM : 24224708
Program Studi : Teknik Elektro
Judul Skripsi : Pemodelan Dan Simulasi Sistem Termoelektrik Peltier
Untuk Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik

Skripsi ini telah disetujui dan disahkan sebagai salah satu syarat menyelesaikan Pendidikan Program Sarjana Teknik Elektro (S1) Fakultas Sains Terapan dan Teknologi

Jakarta, 27 Januari 2026

Pembimbing 1

Pembimbing 2

Dr._ing. AGUS SOFWAN, M.Eng.Sc.

ARIMAN, ST., MT.

PERSETUJUAN PUBLIKASI

KATA PENGANTAR

ABSTRAK

Pemanfaatan energi panas buang sebagai sumber energi baru terbarukan merupakan salah satu upaya untuk meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Pada proses industri, khususnya di plant Refinery PT MNA Serang, terdapat panas buang dari pipa kapiler (*steam tracing*) pada jalur pipa *steam* yang belum dimanfaatkan secara optimal. Panas buang tersebut berpotensi dikonversi menjadi energi listrik menggunakan sistem termoelektrik generator (TEG) berbasis modul *Peltier* yang bekerja berdasarkan efek Seebeck.

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan pemodelan dan simulasi sistem termoelektrik *Peltier* dalam mengonversi energi panas menjadi energi listrik serta mengetahui karakteristik tegangan, arus, dan daya keluaran yang dihasilkan. Modul *Peltier* yang digunakan adalah tipe SP 1848 27145 SA yang dirangkai dalam suatu sistem termoelektrik generator dengan perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin. Metode penelitian yang digunakan pemodelan dan simulasi. Data yang dikumpulkan berupa suhu, tegangan, dan arus keluaran, yang selanjutnya dianalisis untuk mengetahui kinerja sistem.

Hasil penelitian menunjukkan efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik pada sistem TEG berbasis modul *Peltier* SP1848-27145SA diperoleh sebesar $\pm 0,22\%$. Energi listrik hasil konversi modul *Peltier* menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pengisian baterai Li-ion 3S dengan tegangan pengisian 12,0–12,6 VDC, arus pengisian berkisar 0,8–0,15 A, serta estimasi waktu pengisian penuh sekitar 48 jam. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem TEG lebih sesuai digunakan untuk pengisian lambat (*trickle charging*) dibandingkan pengisian cepat.

Kata kunci: termoelektrik generator, modul *Peltier*, efek *Seebeck*, konversi energi

DAFTAR ISI

PERNYATAAN ORISINALITAS.....	3
LEMBAR PERSETUJUAN SKRIPSI / TUGAS AKHIR.....	4
LEMBAR PERSETUJUAN	5
PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	6
KATA PENGANTAR.....	7
ABSTRAK	8
DAFTAR ISI.....	9
DAFTAR GAMBAR.....	12
DAFTAR TABEL	13
BAB I PENDAHULUAN.....	14
1.1 Latar Belakang.....	14
1.2 Rumusan Masalah.....	16
1.3 Tujuan Penelitian	17
1.4 Manfaat Penelitian	17
1.5 Batasan Masalah	18
1.6 Metode Penelitian	19
1.7 Sistematika Penulisan	20
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	21
2.1 Hasil Penelitian Terdahulu.....	21
2.2 Konversi Energi	30
2.2.1 Perpindahan Panas Konduksi.....	30
2.2.2 Perpindahan Panas Konveksi.....	31
2.2.3 Perpindahan Panas Radiasi	31
2.3 Motor Listrik.....	31
2.3.1 Motor Listrik Arus Bolak Balik (AC).....	32
2.3.2 Motor Listrik Arus Searah (DC).....	33
2.4 <i>Thermoelectric</i>	35
2.5 Modul Peltier SP 1848 27145SA.....	36
2.6 Inverter.....	37
2.7 DC-DC <i>Step Up</i> Konverter	38

2.8	Baterai 12V 4,8Ah	39
2.9	Efek <i>Seebeck</i>	41
2.10	Kerangka Berpikir.....	42
BAB III METODE PENELITIAN		44
3.1	Tempat dan Waktu Penelitian.....	44
3.2	Diagram Alir	45
3.3	Metode dan Desain Penelitian	46
3.3.1	Studi Literature dan Observasi lapangan	46
3.3.2	<i>Design</i> Penelitian	46
3.3.3	Perlengkapan dan Bahan Penelitian.....	48
3.4	Populasi dan Sampel Penelitian	49
BAB IV PENGUJIAN DAN ANALISA		51
4.1	Hasil Perancangan Alat.....	51
4.1.1	Konfigurasi Rangkaian dan Fungsi Komponen Sistem TEG ...	52
4.2	Hasil Pengukuran Kinerja Sistem Termoelektrik Generator	55
4.2.1	Hasil Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-0)	56
4.2.2	Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-5).....	59
4.2.3	Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-10).....	61
4.2.4	Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-15).....	64
4.2.5	Pengujian panas pada Objek Sumber Panas	68
4.2.6	Hubungan Suhu Terhadap Arus Output Modul Peltier	69
4.2.7	Analisis Konfigurasi Modul <i>Peltier</i> Seri dan Paralel	70
4.3	Validasi Karakteristik Sistem TEG.....	73
4.3.1	Validasi Hasil Pengukuran Sistem TEG	74
4.3.2	Validasi Pengujian Panas pada Objek Sumber Panas.....	79
4.3.3	Validasi Hubungan Suhu Terhadap Arus Modul <i>Peltier</i>	81
4.3.4	Validasi Analisa Konfigurasi Modul <i>Peltier</i> Seri dan Paralel...83	
4.4	Efisiensi Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik	85
4.5	Karakteristik Kinerja Sistem <i>Thermoelectric Generator</i> (TEG)	87
4.6	Karakteristik Pengisian Baterai Hasil Energi listrik Konversi TEG... 90	
4.6.1	Konfigurasi Pengisian Baterai	90
4.6.2	Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus Pengisian	92

4.7	Validasi Analisa Pengisian Baterai Berbasis TEG	94
4.8	Analisa Kelayakan Sistem TEG Untuk Menggerakkan Beban Motor AC 125W Menggunakan Baterai dan Inverter.....	99
4.8.1	Kebutuhan Daya dan Arus Motor AC 125W.....	99
4.8.2	Kapasitas dan Kemampuan Baterai 12V 60Ah	100
4.8.3	Kemampuan Sistem TEG Menopang Beban Motor	101
4.8.4	Pengaruh Arus Awal (<i>Starting Current</i>) Motor AC	101
4.8.5	Kesimpulan Analisis Kelayakan.....	102
4.9	Validasi Analisis Kelayakan Sistem TEG Menggerakkan Beban Motor AC 125W.....	102
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		107
5.1	Kesimpulan	107
5.2	Saran	108
DAFTAR PUSTAKA.....		110
LAMPIRAN.....		116

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Motor AC (Febrian Fatahillah, 2022)	32
Gambar 2.2 Konstruksi Motor Listrik DC (Ambabunga et al., 2023)	34
Gambar 2.3 Struktur Pembangkit Data <i>Thermoelectric</i> (Putra et al., 2009).....	35
Gambar 2.4 Struktur Modul Peltier (http://ixbtlabs.com).....	36
Gambar 2.5 Inverter	38
Gambar 2.6 DC-DC <i>Step Up Booster</i>	39
Gambar 2.7 Diagram Sel Li-Ion Lilitan Spiral Silinder (Linden's Hanbook)	40
Gambar 2.8 Efek <i>Seebeck</i>	41
Gambar 3.1 Diagram Alir	45
Gambar 3.2 <i>Design</i> Penelitian	47
Gambar 3.3 Pipa Kapiler atau <i>Steam Tracing</i>	49
Gambar 3.4 Sample pengukuran Suhu Pipa Kapiler.....	50
Gambar 4.1 Hasil Perancangan Alat	51
Gambar 4.2 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-0)	57
Gambar 4.3 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-5)	60
Gambar 4.4 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-10)	63
Gambar 4.5 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-15)	66

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Jurnal Penelitian Terkait	25
Tabel 2.2 Tabel Tegangan dan Arus Modul Peltier	37
Tabel 3.1 <i>Timeline</i> Penelitian.....	44
Tabel 4.1 Konfigurasi Rangkaian dan Fungsi Komponen Sistem (TEG).....	53
Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-0).....	56
Tabel 4.3 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-5)	59
Tabel 4.4 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-10)	62
Tabel 4.5 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-15)	65
Tabel 4.6 Pengukuran suhu sumber panas	68
Tabel 4.7 Hubungan suhu terhadap arus	69
Tabel 4.8 Perbedaan Konfigurasi Modul <i>Peltier</i>	70
Tabel 4.9 Validasi Hasil Pengukuran.....	74
Tabel 4.10 Validasi Pengujian Panas pada Sumber Panas.....	79
Tabel 4.11 Validasi Hubungan Suhu Terhadap Arus.....	81
Tabel 4.12 Hasil Efisiensi Konversi Energi Panas Menjadi Listrik.....	85
Tabel 4.13 Karakteristik Kinerja Sistem <i>Thermoelectric Generator</i> (TEG)	88
Tabel 4.14 Hasil Pengisian Baterai	92
Tabel 4.15 Validasi Analisis Pengisian Baterai Berbasis TEG.....	95
Tabel 4.16 Validasi Analisis Kelayakan Sistem TEG	103

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi saat ini menuntut inovasi di bidang energy terbarukan untuk mengurangi ketergantungan pada sumber energy fosil yang semakin menipis dan berdampak negatif terhadap lingkungan. Energi baru dan terbarukan (EBT) merupakan salah satu pengelolaan energi dari proses alam yang berkelanjutan dan dijadikan sebagai energi alternatif. Selain itu energi baru dan terbarukan juga mempunyai sifat ramah lingkungan, sehingga berkontribusi dalam mengatasi pemanasan global dan mengurangi emisi (pemancaran cahaya, panas, atau elektron dari suatu permukaan benda padat atau cair) pada karbon dioksida. Berdasarkan pada Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang kebijakan Energi Nasional, Indonesia akan menargetkan penggunaan energi baru dan terbarukan minimum 23% pada Tahun 2025 dan 31% di Tahun 2050. Pemerintah melalui Dewan Energi Nasional (DEN) mencatat, persentase bauran energi tertinggi di Indonesia pada tahun 2023 masih dipegang oleh batubara, yaitu sebesar 40,46%. Namun, persentase tersebut terus menurun dari tahun sebelumnya yang sebesar 42,38%. Berdasarkan data DEN, persentase bauran energi tertinggi tahun 2023 masih didominasi Batubara (40,46%), Minyak Bumi (30,18%), Gas Bumi (16,28%), EBT (13,09%). Prosentase energi baru terbarukan (EBT) meningkat 0,79% sehingga menjadi 13,09% pada tahun 2023. Namun realisasi tersebut masih di bawah target yang ditetapkan sebesar 17,87%.

Menurut Prof. Dr. Kuntoro Mangkusubroto selaku Ketua Dewan Pengarah Indonesia Clean Energy Forum (ICEF), menegaskan bahwa energi terbarukan tengah menjadi isu yang memiliki potensi yang berdampak bagi geopolitik. Perkembangan teknologi yang pesat dan penurunan biaya produksi telah mendorong pertumbuhan energi terbarukan lebih cepat dibandingkan dengan sumber energi fosil lainnya karena secara ekonomis memiliki keunggulan mencakup manfaat dalam mengurangi

pencemaran udara, serta mengatasi dampak perubahan iklim. Sehingga, menjadikan energi terbarukan sebagai bagian penting dari peta energi global. Kemudian, berdasarkan laporan dari The International Renewable Energy Agency (IRENA) yang dilansir dari laman Institute for Essential Services Reform (IESR) dijelaskan bahwa secara garis besar, proses transisi energi global dapat dibagi ke dalam tiga tahapan utama. Tahap pertama ditandai dengan pertumbuhan pesat energi terbarukan yang telah berlangsung sejak tahun 2015. Tahap kedua menunjukkan bahwa seiring meningkatnya pemanfaatan energi terbarukan, permintaan terhadap bahan bakar fosil diperkirakan akan mencapai titik tertinggi dalam beberapa tahun mendatang diproyeksikan terjadi pada tahun 2025. Tahap ketiga adalah saat energi terbarukan mulai mendominasi dan secara bertahap menggantikan energi fosil, yang penggunaannya akan terus menurun secara global setelah melewati puncak permintaan pada pertengahan abad ini, yakni sekitar tahun 2050. Menurut Bauran Energi Nasional 2020 Dewan Energi Nasional Sekretariat Jenderal, ketersediaan energi fosil semakin berkurang dan diperkirakan akan habis dalam beberapa tahun kedepan. Cadangan energi yang berasal dari energi fosil seperti minyak bumi diperkirakan akan habis dalam 34 tahun, gas bumi 31,5 tahun dan batubara 71 tahun yang menyebabkan pemerintah berusaha mencari cadangan energi baru dengan mengembangkan Energi Baru Terbarukan seperti energi air, energi angin, juga energi surya dari energi matahari dan energi panas.

Panas merupakan sumber energi yang bisa didapatkan dari berbagai sumber. Salah satu contoh yang dapat dilihat secara langsung yaitu panas yang berasal dari gas buang sisa pembakaran adalah bahan bakar kendaraan bermotor, sisa uap panas kondensor, dan panas gas buang dari jalur pipa *steam* pada pabrik. Suhu gas buang yang dihasilkan dalam sekali operasi cukup panas sehingga bisa membangkitkan listrik dengan memanfaatkan TEG atau Termoelektrik Generator. Panas terbuang ini dapat dimanfaatkan kembali menjadi sumber energi dengan dibantu oleh Termoelektrik Generator (TEG). Termoelektrik generator bekerja berdasarkan prinsip kerja dari efek seebeck yang pertama kali ditemukan oleh Thomas Johann

Seebeck pada tahun 1821, prinsip efek seebeck ini terjadi saat ada perbedaan temperature antara dua material semi konduktor yang berbeda maka arus listrik akan mengalir dan ketika salah satu kawatnya diputuskan lalu disambung dengan sebuah alat ukur, maka akan terlihat perbedaan tegangan dari kedua ujung tersebut.

Melihat kondisi pada pabrik minyak goreng khususnya di Plant Refinery PT MNA Serang, Banten, yang hampir semua proses produksinya menggunakan *steam*, dimana disetiap jalur – jalur pipa *steam* tersebut terdapat pipa kapiler yang digunakan sebagai media untuk pembuangan uap panas berlebih untuk menghindari terjadinya kondensasi pada pipa, panas terbuang tersebut bisa dimanfaatkan sebagai sumber energy baru terbarukan. Oleh karena itu penulis mempunyai ide dalam tugas akhir dengan memanfaatkan TEG modul Peltier tipe SP 1848 27145 SA, yang berjudul “*Pemodelan dan simulasi Sistem Termoelektrik Peltier untuk Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik*”. Dari tugas akhir ini, harapannya dapat memanfaatkan panas buang sebagai energy baru dari sumber lain, yakni Uap atau panas yang terbuang. Penulis juga berharap penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pemanfaatan energi terbarukan berbasis *thermoelectric generator* (TEG) serta menjadi dasar pengembangan sistem energi mandiri yang ramah lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pemodelan dan simulasi sistem termoelektrik *peltier* untuk konversi energi panas menjadi energi listrik?
2. Bagaimana pengaruh perbedaan suhu modul *peltier* SP1848 27145SA terhadap nilai tegangan yang dihasilkan?
3. Bagaimana efisiensi konversi panas menjadi energi listrik menggunakan modul *peltier* SP1848 27145SA?

4. Bagaimana karakteristik pengisian energi listrik hasil konversi modul *peltier* ketika ditampung ke dalam baterai (tegangan, arus, dan waktu pengisian)?
5. Bagaimana kinerja dan kestabilan ssitem termoelektrk *peltier* SP1848 27145SA dalam menyuplai beban motor AC berdaya hingga 125W, baik secara langsung maupun melalui penyimpanan energi dalam baterai?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini berdasarkan uraian dari latar belakang dan rumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pemodelan dan simulasi sistem termoelektrik *peltier* untuk konversi energi panas menjadi energi listrik.
2. Mengetahui pengaruh perbedaan suhu modul *peltier* SP1848 27145SA terhadap nilai tegangan yang dihasilkan.
3. Mengetahui efisiensi konversi panas menjadi energi listrik menggunakan modul *peltier* SP1848 27145SA.
4. Mengetahui karakteristik pengisian energi listrik hasil konversi modul *peltier* ketika ditampung ke dalam baterai (tegangan, arus, dan waktu pengisian).
5. Mengetahui kinerja dan kestabilan sistem termoelektrik *peltier* SP1848 27145SA dalam menyuplai beban motor AC berdaya hingga 125W, baik secara langsung maupun melalui penyimpanan energi dalam baterai.

1.4 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat bagi penulis, akademisi, masyarakat, dan industri skala kecil sebagai berikut:

1. Bagi Peneliti

Penelitian ini diharapkan dapat menambah pemahaman dan wawasan penulis mengenai prinsip kerja serta karakteristik modul termoelektrik Peltier sebagai media konversi energi panas menjadi energi listrik. Selain itu, penelitian ini memberikan pengalaman dalam melakukan pemodelan, simulasi, dan pengujian simulasi sistem termoelektrik, termasuk proses pengisian baterai dan pemberian beban listrik.

2. Bagi Akademisi

Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi ilmiah dalam pengembangan dan penelitian lanjutan terkait pemanfaatan energi panas buangan (*waste heat*) menggunakan modul termoelektrik Peltier. Hasil penelitian juga menyediakan data simulasi mengenai pengaruh perbedaan suhu, efisiensi konversi, serta karakteristik keluaran listrik modul *peltier* SP1848 27145SA.

3. Bagi Masyarakat dan Industri Skala Kecil

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran penerapan energi terbarukan alternatif untuk memenuhi kebutuhan listrik pada perangkat berdaya kecil. Selain itu, penelitian ini dapat menjadi solusi awal dalam pemanfaatan energi panas lingkungan sebagai sumber energi listrik tambahan melalui sistem penyimpanan baterai.

1.5 Batasan Masalah

Untuk menjaga agar penelitian ini lebih fokus dan terarah, maka diberikan batasan masalah sebagai berikut:

1. Penelitian ini dibuat dalam skala kecil (*prototype*).
2. Jenis modul *peltier* yang digunakan adalah *peltier* tipe SP1848 27145SA.
3. Parameter yang dianalisis meliputi perbedaan suhu (ΔT), tegangan, arus, daya, dan efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik.

4. Sistem penyimpanan energi dibatasi pada pengisian baterai DC dengan kapasitas terbatas.
5. Pengujian difokuskan pada analisis kemampuan dan keterbatasan modul peltier dalam menyuplai daya arus yang dibutuhkan oleh motor 125W, bukan pada perancangan system agar motor dapat beroperasi secara kontinu.
6. Penelitian tidak membahas optimasi material termoelektrik, kontrol canggih, maupun analisis ekonomi secara mendalam.

1.6 Metode Penelitian

Metode yang dilakukan untuk menyelesaikan masalah dari pemodelan dan simulasi sistem *thermoelectric peltier* untuk konversi energi panas menjadi energi listrik adalah sebagai berikut:

1. Sumber Data
 - a. Studi literatur, penulis memecahkan masalah dengan membaca buku-buku dan jurnal yang berhubungan dengan permasalahan
 - b. Studi lapangan, yang mengamati pemanfaatan beda temperatur untuk menghasilkan tegangan.

2. Metode Pengumpulan Data

Metode pengumpulan data yang relevan sebagai dasar penyusunan laporan diperoleh dengan beberapa metode, yaitu:

- a. Metode pemodelan, yakni melakukan perancangan alat.
- b. Metode simulasi, yakni dengan melakukan percobaan terhadap kinerja dari alat untuk dapat sinergis mencapai tujuan yang dirancang.
- c. Metode observasi, yakni dengan pengamatan objek secara langsung.

- d. Metode dokumentasi, yakni mengumpulkan sumber data dari hasil kinerja alat dan pengambilan gambar.

1.7 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan pada tugas akhir ini secara umum terbagi menjadi:

1. BAB I : Pendahuluan yang berisikan latar belakang pemilihan topik, perumusan masalah, tujuan, pembatasan masalah, metode yang digunakan, manfaat yang akan diperoleh, dan sistematika penulisan secara keseluruhan tugas akhir.
2. BAB II : Tinjauan Pustaka yang berisikan tentang rangkuman studi pustaka yang menunjang penyelesaian masalah pada tugas akhir ini.
3. BAB III : Metodologi Penelitian menguraikan tentang metode yang digunakan untuk menyelesaikan masalah pada penelitian, meliputi prosedur dalam diagram alir, penjelasan diagram alir, pengambilan *sample*, dan pengumpulan data.
4. BAB IV : Pengujian dan Analisa berisikan pengujian dan analisis data yang telah diambil dalam penelitian dan pembahasan hasil perhitungan.
5. BAB V : Kesimpulan dan Saran berisikan kesimpulan dari seluruh pembahasan yang telah dipaparkan. Isi kesimpulan harus menjawab permasalahan dan tujuan yang telah ditetapkan dalam tugas akhir. Selain itu, pada bab ini berisikan saran-saran yang berkaitan dengan tugas akhir supaya dapat menjadi panduan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Hasil Penelitian Terdahulu

Hasil penelitian terdahulu dalam bab ini merupakan kajian dari penelitian-penelitian terdahulu yang berhubungan dengan penelitian yang dilakukan. Kajian tersebut digunakan sebagai pembandingan dalam menyelesaikan permasalahan yang diangkat pada penelitian ini. Berikut merupakan daftar penelitian-penelitian terdahulu yang diambil dari referensi jurnal-jurnal ilmiah dan menjadi acuan dalam penelitian tugas akhir ini.

- a. Penelitian yang dilakukan oleh Sukarno, R. (2016) yang berjudul “Pemanfaatan Panas Gas Buang Sepeda Motor sebagai Sumber Energi Alternatif Menggunakan Teknologi Termoelektrik” dari Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur UNJ, Edisi terbit III– Oktober 2016 membahas tentang konstruksi TEG menggunakan dua modul TEG yang disambungkan secara seri. Pengujian konstruksi TEG dilakukan pada sepeda motor automatic 110 cc fuel injection satu silinder empat langkah dengan 3 variasi kecepatan putaran mesin 1600, 2000 dan 3000 rpm dan waktu pengukuran mulai detik ke-0 sampai detik ke-1500.
- b. Penelitian yang dilakukan oleh Rodif, M. (2020) yang berjudul ”Pemanfaatan Sensor Peltier Sebagai Penghasil Energi Listrik Pada Media Knaplot Motor Injeksi Revo FI 110 CC” dari Naskah Publikasi tahun 2020 membahas tentang peltier sebagai termoelektrik generator (TEG) dengan menggunakan satu keping sensor peltier sehingga mendapatkan hasil energy dari knalpot sepeda motor injeksi Revo FI 110 CC yang nantinya dimanfaatkan sebagai penyuplai listrik pada smartphone.
- c. Penelitian yang dilakukan oleh Batu, K. L., Dermawan, Y., & Rahardja, I. (2020) yang berjudul “Pemanfaatan Panas Buang Boiler Mini Menjadi Listrik Dengan Menggunakan Peltier Element (Pe)” dari Jurnal ASIIMETRIK: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi Volume

membahas tentang pengujian 2 buah elemen peltier TEG SP1848 21745SA yang dirangkai secara parallel pada silencer knalpot dan boiler mini sebagai sumber panas pengujian alat menghasilkan arus maksimum 35,7 mA dengan lama waktu pengujian selama 10 menit.

- d. Penelitian yang dilakukan oleh Febriansyah, F., Pratiwi, Y. R., & Putra, H. S. (2021) yang berjudul “Pemanfaatan Efek Seebeck Pada Peltier Sebagai Generator Darurat Dengan dan Tanpa Step Up DC to DC” dari JSNu : Journal of Science Nusantara Vol.1, No.2, Desember 2021, pp. 30~35 membahas tentang pemanfaatan efek seebeck pada peltier sebagai generator darurat daya rumahan melalui proses perancangan alat dengan metode eksperimen dengan menggunakan step up DC to DC yang menunjukkan bahwa generator darurat yang telah dirancang menggunakan 14 modul peltier menghasilkan daya yang stabil sebesar +24 Volt dengan perbedaan suhu 65°C pada kedua sisi peltier, dengan output tersebut generator termoelektrik ini dapat digunakan sebagai input DC to DC converter dan bias digunakan untuk memenuhi kebutuhan listrik. Penelitian ini memiliki kesamaan dengan penelitian yang dilakukan penulis yaitu dengan menggunakan efek seebeck sebagai metode dalam penelitian yang akan dilakukan oleh penulis. Sedangkan untuk perbedaan dari penelitian yang akan dilakukan oleh penulis yaitu penelitian menggunakan inverter DC ke AC sebagai pengubah tegangan DC yang dihasilkan oleh peltier menjadi tegangan AC untuk menggerakkan beban yang akan digunakan.
- e. Penelitian yang dilakukan oleh Rimbawati, Billy Prandika, Cholish, (2022) yang berjudul “Rancang Bagun Energi Listrik Sebagai Alat Charger Baterai Menggunakan Termoelektrik” dari CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro, Vol.6, No.1, Februari 2022 membahas tentang Sistem konversi energi panas dari api unggun menjadi energi listrik untuk mengisi ulang baterai seperti baterai HT, senter, GPS dan lainnya. Menggunakan IC LM317 sebagai regulator

untuk mengolah tegangan keluar sistem konversi dan peltier sebagai pengubah energi panas menjadi listrik.

- f. Penelitian yang dilakukan oleh Rizaldi, R., & Edahwati, L. (2022) yang berjudul “Analisa Termoelektrik Generator Dan Motor DC+ Kipas Dengan Perbedaan Alas Konduktor Dari Sumber Energi Panas” dari JURNAL FLYWHEEL, November 2022, Vol 13 (2), 14-22 membahas tentang Percobaan efek seebeck termoelektrik generator dan motor DC kipas pada perbedaan alat penghantar yang digunakan adalah kaleng, seng dan aluminium.
- g. Penelitian yang dilakukan oleh Siregar, A. R. (2022) yang berjudul “Analisis Pengaruh Karakteristik Termoelektrik Generator Sebagai Peubah Energi Panas” dari Jurnal Pendidikan Sains dan Komputer Volume 2, Number 2, October 2022 membahas tentang Mengetahui pengaruh karakteristik Termoelektrik Generator tipe TEC1-12706 sebagai elemen pengubah energi panas menjadi energi listrik dengan konfigurasi tunggal, dua elemen tersusun secara seri dan dua elemen tersusun secara paralel.
- h. Penelitian yang dilakukan oleh Muharnif, M., Umuani, K., & Nasution, F. A. (2022) yang berjudul “Analisis termoelektrik generator (TEG) sebagai pembangkit listrik bersekala kecil terhadap perbedaan temperature” dari Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi Vol. 5, No.1, Maret 2022, Halaman 26-32 membahas tentang Menganalisis pengaruh perbedaan suhu yang terjadi pada energi listrik yang dihasilkan dalam sebuah termoelektrik. Dilakukan dengan membandingkan perbedaan panas yang dihasilkan dari 1, 2, dan 3 lilin dengan elemen Peltier yang dihubungkan secara seri terhadap daya dan efisiensi yang dihasilkan dengan durasi waktu 120 detik.
- i. Penelitian yang dilakukan oleh Widipratama, K., Wijaya, I. W. A., & Janardana, I. G. N. (2023) yang berjudul “Rancang Bangun Incinerator Pembakaran Sabut Dan Tempurung Kelapa Di UD. Nadi Utama Sebagai Pembangkit Listrik Menggunakan Peltier TEG SP1848

27145SA” dari NNOVATIVE: Journal Of Social Science Research Volume 3 Nomor 3 Tahun 2023 membahas tentang Memanfaatkan panas dari pembakaran sabut dan tempurung kelapa dengan Incinerator yang memiliki perangkat konverter yang dapat mengkonversi panas yang dihasilkan dari pembakaran tersebut menjadi energi listrik menggunakan efek seebeck melalui modul peltier TEG SP 1848 27145 SA.

- j. Penelitian yang dilakukan oleh Indrayana, I. W., Dharmawan, I. M. D., Kumara, I. N. S., & Setiawan, I. N. (2024) yang berjudul “Rancang Bangun Pembangkit Listrik Termoelektrik Panas Matahari Berbasis Data Logger” dari Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan, April 2024, 10 (7), 606-617 membahas tentang Perancangan TEG untuk memantau suhu, arus dan tegangan berbasis IoT menggunakan aplikasi Blynk.
- k. Penelitian yang dilakukan oleh Sari, N., Sugriwan, I., & Sari, N. D. (2024) yang berjudul “Rancang Bangun Generator Termoelektrik Dengan Metode Efek Seebeck Sebagai Alternatif Pembangkit Energi Listrik” dari Jurnal Natural Scientiae Vol.4 No. 1 Mei 2024 membahas tentang Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh pengukuran sudut dan jarak terhadap nilai koefisien Seebeck. Desain ini terdiri dari enam TEC tipe Peltier TEC1-12706 yang disusun secara seri dan paralel, dua multimeter digital untuk membaca tegangan dan arus yang diberikan oleh resistor 10 ohm, dua sensor DS18B20 tahan air untuk membaca suhu dari kedua sisi termolistrik dengan pelat aluminium di sisi panas dan heatsink yang dilengkapi kipas DC 12 volt di sisi dingin, LCD karakter 20 x 4, modul kartu SD, modul RTC, dan mikrokontroler Arduino UNO R3.

Tabel 2.1 Jurnal Penelitian Terkait

No	Penulis	Judul	Konsep Dasar
1	Sukarno, R. (2016)	Pemanfaatan Panas Gas Buang Sepeda Motor sebagai Sumber Energi Alternatif Menggunakan Teknologi Thermoelektrik	Konstruksi TEG menggunakan dua modul TEG yang disambungkan secara seri. Pengujian konstruksi TEG dilakukan pada sepeda motor automatic 110 cc fuel injection satu silinder empat langkah dengan 3 variasi kecepatan putaran mesin 1600, 2000 dan 3000 rpm dan waktu pengukuran mulai detik ke-0 sampai detik ke-1500.
2	Rodif, M. (2020)	Pemanfaatan Sensor Peltier Sebagai Penghasil Energi Listrik Pada Media Knaplot Motor Injeksi Revo FI 110 CC	Pada penelitian ini memanfaatkan sensor peltier dengan sumber suhu panas pada knalpot motor dan es batu sebagai pendinginannya sehingga menghasilkan energi listrik dengan perbedaan suhu antar kedua sisi peltier, hasil penelitian ini mendapatkan tegangan listrik DC menggunakan satu keping sensor peltier dengan pemasangan pada knalpot standar sepeda motor injeksi Revo FI 110 CC, pengujian dengan cara motor dinyalakan dan diberikan 4 kondisi yakni kondisi standby,

			putaran roda gigi 1000 RPM, 2000 RPM, dan 3000 RPM
3	Batu, K. L., Dermawan, Y., & Rahardja, I. (2020)	Pemanfaatan Panas Buang Boiler Mini Menjadi Listrik Dengan Menggunakan Peltier Element (Pe)	Penelitian ini memanfaatkan panas buangan menjadi aliran listrik dengan menggunakan silencer knalpot, 2 buah elemen Peltier TEG SP1848 21745 SA, dan boiler mini sebagai sumber panas pengujian alat. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan 2 buah elemen Peltier TEG SP1848 21745 SA yang disusun secara paralel menghasilkan arus maksimum 35,7 mA
4	Febriansyah, F., Pratiwi, Y. R., & Putra, H. S. (2021)	Pemanfaatan Efek Seebeck Pada Peltier Sebagai Generator Darurat Dengan dan Tanpa Step Up DC to DC	Pemanfaatan efek seebeck pada peltier sebagai generator darurat daya rumahan melalui proses perancangan alat dan juga perhitungan jumlah voltase yang dihasilkan menggunakan step up DC to DC, generator darurat yang telah dirancang menggunakan 14 modul peltier menghasilkan daya yang stabil sebesar +24 Volt dengan perbedaan suhu 65°C.

5	Rimbawati, Billy Prandika, Cholish, (2022)	Rancang Bagun Energi Listrik Sebagai Alat Charger Baterai Menggunakan Termoelektrik	Sistem konversi energi panas dari api unggun menjadi energi listrik untuk mengisi ulang baterai seperti baterai HT, senter, GPS dan lainnya. Menggunakan IC LM317 sebagai regulator untuk mengolah tegangan keluar sistem konversi dan peltier sebagai pengubah energi panas menjadi listrik.
6	Rizaldi, R., & Edahwati, L. (2022)	Analisa Termoelektrik Generator Dan Motor DC+ Kipas Dengan Perbedaan Alas Konduktor Dari Sumber Energi Panas	Percobaan efek seebeck termoelektrik generator dan motor DC kipas pada perbedaan alat penghantar yang digunakan adalah kaleng, seng dan aluminium
7	Siregar, A. R. (2022).	Analisis Pengaruh Karakteristik Termoelektrik Generator Sebagai Peubah Energi Panas.	Mengetahui pengaruh karakteristik Termoelektrik Generator tipe TEC1-12706 sebagai elemen pengubah energi panas menjadi energi listrik dengan konfigurasi tunggal, dua elemen tersusun secara seri dan dua elemen tersusun secara paralel.
8	Muharnif, M., Umuani, K., & Nasution, F. A. (2022).	Analisis termoelektrik generator (TEG) sebagai pembangkit listrik bersekala kecil terhadap perbedaan temperatur.	Menganalisis pengaruh perbedaan suhu yang terjadi pada energi listrik yang dihasilkan dalam sebuah termoelektrik. Dilakukan dengan membandingkan perbedaan panas yang dihasilkan dari 1, 2,

			dan 3 lilin dengan elemen Peltier yang dihubungkan secara seri terhadap daya dan efisiensi yang dihasilkan dengan durasi waktu 120 detik.
9	Widipratama, K., Wijaya, I. W. A., & Janardana, I. G. N. (2023)	Rancang Bangun Incinerator Pembakaran Sabut Dan Tempurung Kelapa Di UD. Nadi Utama Sebagai Pembangkit Listrik Menggunakan Peltier TEG SP1848 27145SA.	Memanfaatkan panas dari pembakaran sabut dan tempurung kelapa dengan Incinerator yang memiliki perangkat konverter yang dapat mengkonversi panas yang dihasilkan dari pembakaran tersebut menjadi energi listrik menggunakan efek seebeck melalui modul peltier TEG SP 1848 27145 SA
10	Indrayana, I. W., Dharmawan, I. M. D., Kumara, I. N. S., & Setiawan, I. N. (2024)	Rancang Bangun Pembangkit Listrik Thermoelektrik Panas Matahari Berbasis Data Logger	Perancangan TEG untuk memantau suhu, arus dan tegangan berbasis IoT menggunakan aplikasi Blynk

11	Sari, N., Sugriwan, I., & Sari, N. D. (2024)	Rancang Bangun Generator Termoelektrik Dengan Metode Efek Seebeck Sebagai Alternatif Pembangkit Energi Listrik	Penelitian ini bertujuan untuk menentukan pengaruh pengukuran sudut dan jarak terhadap nilai koefisien Seebeck. Desain ini terdiri dari enam TEC tipe Peltier TEC1-12706 yang disusun secara seri dan paralel, dua multimeter digital untuk membaca tegangan dan arus yang diberikan oleh resistor 10 ohm, dua sensor DS18B20 tahan air untuk membaca suhu dari kedua sisi termolistrik dengan pelat aluminium di sisi panas dan heatsink yang dilengkapi kipas DC 12 volt di sisi dingin, LCD karakter 20 x 4, modul kartu SD, modul RTC, dan mikrokontroler Arduino UNO R3.
Usulan Skripsi		Pemodelan dan simulasi sistem termoelektrik peltier untuk konversi energi panas menjadi energi listrik	Pemodelan dan simulasi konversi energi panas menjadi energi listrik menggunakan modul peltier SP 1848 27145SA untuk menganalisis kemampuan modul peltier dalam menyuplai daya dan arus yang dibutuhkan oleh motor 125W.

2.2 Konversi Energi

Konversi energi adalah proses perubahan satu bentuk energi menjadi bentuk energi lain, seperti energi kimia batubara menjadi energi listrik, atau energi matahari menjadi listrik melalui panel surya, yang tetap mematuhi hukum kekekalan energi. Tujuannya adalah mengubah energi yang tersedia menjadi bentuk yang lebih mudah dimanfaatkan untuk aktivitas sehari-hari, seperti energi mekanik, panas, listrik, cahaya, kimia, atau nuklir, dengan efisiensi dan meminimalkan kerugian.

Konversi energi panas menjadi listrik umumnya memanfaatkan perbedaan suhu untuk menghasilkan arus listrik, bisa melalui prinsip termoelektrik (efek Seebeck) menggunakan modul Peltier untuk mengubah panas langsung menjadi listrik, atau secara tidak langsung dengan memanaskan air menjadi uap bertekanan tinggi untuk memutar turbin yang menggerakkan generator seperti pada [PLTU](#) atau [PLTP](#), menghasilkan listrik melalui prinsip elektromagnetik. Energi panas bisa diubah menjadi listrik melalui beberapa cara, paling umum menggunakan prinsip termoelektrik seperti pada panas atau steam terbuang pada suatu industri yang menghasilkan listrik dari panas sisa menggunakan modul Peltier. Perpindahan panas terjadi dengan beberapa proses perpindahan panas yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi (Buchori, 2004)

2.2.1 Perpindahan Panas Konduksi

Konduksi adalah proses perpindahan panas yang terjadi pada benda solid yang mengalir dari tempat yang suhunya tinggi ke tempat yang suhunya lebih rendah (Lumban Batu et al., 2020). Perpindahan panas konduksi dapat dilihat dalam kehidupan sehari-hari contohnya pada saat membakar sebatang besi yang dipanaskan dengan jarak tertentu dari ujung besi yang dipanaskan secara terus menerus panas akan merambat ke temperature yang lebih rendah.

2.2.2 Perpindahan Panas Konveksi

Konveksi adalah proses transport dengan kerja gabungan dari konduksi panas, penyimpanan energy dan gerakan mencampur (Lumban Batu et al., 2020). Mekanisme perpindahan panas konveksi adalah perpindahan energy antara permukaan benda padat dan cairan, gas dan udara. Contoh dari perpindahan panas konveksi adalah sebuah plat logam panas akan lebih cepat mendingin jika ditempatkan di depan sebuah kipas angin dibandingkan dibiarkan dalam udara diam.

2.2.3 Perpindahan Panas Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah perpindahan energy panas yang terjadi tanpa melalui media atau zat perantara, dan panas akan dipindahkan melalui vakum. Mekanisme ini disebut dengan radiasi thermal. (Rahardja, 2016). Contoh dari perpindahan panas radiasi ini adalah seperti panas matahari sampai ke bumi atau rasa hangat atau panas dari api unggun, yang terjadi karena benda memancarkan energy panas dan dapat diserap atau dipantulkan. Karakteristik utama dari perpindahan panas radiasi ini adalah tanpa medium yakni terjadi diruang hampa karena energy panas diangkut oleh gelombang elektromagnetik, lebih cepat dibanding konduksi dan konveksi karena tidak bergantung pada partikel medium atau perantara dan bergantung warna, permukaan gelap akan menyerap radiasi lebih baik daripada permukaan terang.

2.3 Motor Listrik

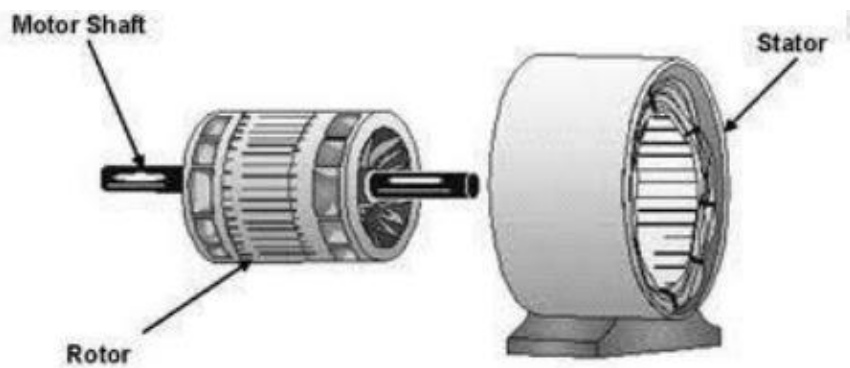
Motor listrik adalah mesin listrik yang berfungsi untuk merubah energi listrik menjadi energi gerak mekanik, energi tersebut berupa putaran dari motor. Dibandingkan dengan mesin pembangkit energi mekanik yang lain, motor listrik memiliki beberapa kelebihan, antara lain kemudahan dalam pengoperasian serta perawatan dan perbaikan. Di dunia industri,

penggunaan motor listrik menjadi andalan karena dapat bekerja dalam waktu yang lama dan dapat dilakukan perawatan walaupun masih dalam keadaan beroperasi (*running maintenance*). Berdasarkan sumber tegangan kerjanya motor listrik dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu:

- a. Motor Listrik Arus Bolak-balik (AC) adalah jenis motor listrik yang beroperasi dengan sumber tegangan arus listrik bolak balik.
- b. Motor Listrik Arus Searah (DC) adalah jenis motor listrik yang beroperasi dengan sumber tegangan arus listrik searah.

2.3.1 Motor Listrik Arus Bolak Balik (AC)

Motor arus bolak balik merupakan arus listrik yang membalikkan arahnya secara teratur pada rentang waktu tertentu. Motor listrik ini memiliki dua buah bagian dasar listrik yaitu stator dan rotor. Stator merupakan komponen listrik statis dan rotor merupakan komponen listrik berputar untuk memutar arah motor. Berikut ini adalah gambar konstruksi dari stator dan rotor.



Gambar 2.1 Motor AC (Febrian Fatahillah, 2022)

Keistimewaan umum dari semua motor ac adalah medan magnet putar yang diatur dengan lilitan stator. Kecepatan medan magnet putar tergantung pada jumlah kutub stator dan frekuensi sumber daya. Kecepatan itu disebut kecepatan sinkron, yang ditentukan dengan rumus berikut (Febrian Fatahillah, 2022).

$$N_s = 120 F/P$$

Dimana:

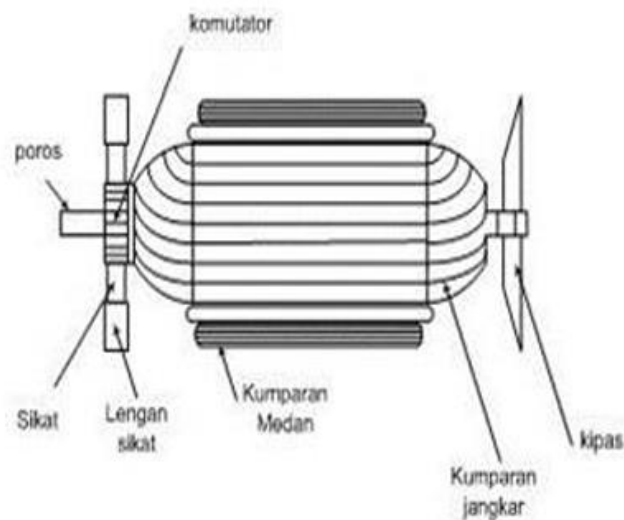
S = Kecepatan sinkron (rpm)

F = Frekuensi (Hz)

P = Jumlah kutub pada tiap lilitan fasa

2.3.2 Motor Listrik Arus Searah (DC)

Motor listrik DC (*Direct Current*) merupakan salah satu jenis motor yang banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri. Motor DC dapat dibagi menjadi tiga tipe utama, yaitu motor DC seri, shunt, dan kompond, masing-masing dengan karakteristik uniknya. Pemodelan matematis dari ketiga jenis motor DC ini melibatkan persamaan-persamaan yang menggambarkan hubungan antara torsi, kecepatan, dan arus. Motor DC menghasilkan energi mekanik dengan menggabungkan energi listrik dan magnet. Interaksi dua magnet diperlukan untuk pengoperasian motor. Secara umum, gagasan dibalik cara kerja motor listrik adalah bahwa dua medan magnet dapat bergabung untuk menciptakan gerakan. (Ambabunga et al., 2023)



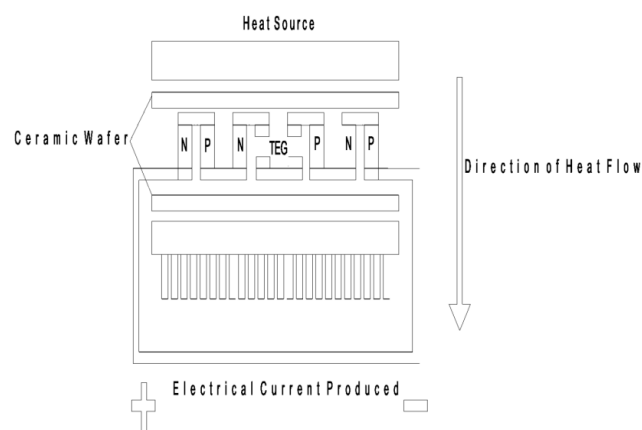
Gambar 2.2 Konstruksi Motor Listrik DC (Ambabunga et al., 2023)

Pada gambar 2.2 adalah bagian-bagian dari motor listrik arus searah, ada stator yang dikelilingi oleh satu atau lebih bidang bidang dan memiliki tiang jagung. kumparan lapangan dibangun dari kawat tembaga yang telah terluka dengan ukuran tertentu di sekitar besi cor atau inti baja cor. Meskipun kumparan jangkar (rotor) memiliki bentuk seperti permata, peregangannya biasa adalah 1800 volt, yang berarti bahwa satu sisi kumparan selalu di tengah satu polaritas dan yang lainnya selalu di tengah-tengah yang lain. Setiap kali kumparan 1800 volt diregangkan, tegangan di antara sisinya dan dalam arah yang berlawanan adalah konstan. Komutator terdiri dari batang tembaga yang dihancurkan yang dipisahkan oleh zat yang menyerupai mika. Tugas komutator ini adalah mengumpulkan arus listrik induksi dari konduktor jangkar dan mengubahnya melalui sikat menjadi arus searah. Di sisi lain, sikat terdiri dari karbon, grafit, atau grafit kombinasi karbon yang memiliki kotak sikat dan pegas tekanan. (Ambabunga et al., 2023)

2.4 *Thermoelectric*

Thermoelectric adalah suatu fenomena konversi dari energi listrik menjadi energi panas atau dari energi panas menjadi energi listrik. *Thermoelectric* yang mengubah panas menjadi listrik disebut dengan *Thermoelectric Generator* (TEG), sedangkan perubahan energi listrik menjadi energi panas disebut dengan *Thermoelectric Cooler* (TEC) (Lumban Batu et al., 2020).

Elemen *thermoelectric* terdiri dari semikonduktor tipe N dan tipe P yang bagian atas dan bawah dilapisi dengan konduktor tembaga sebagai penghubung satu sama lain antara tipe N dan tipe P. Dengan perbedaan temperatur panas antara sisi panas dan sisi dingin pada thermoelektrik generator, pada elemen ini akan mengalir arus sehingga terjadi beda tegangan. Prinsip kerja dari *thermoelectric generator* adalah jika satu sisi dipanaskan dan terjadi pelepasan panas pada sisi yang lain maka akan menghasilkan tegangan. *Thermoelectric* bisa dikatakan bekerja dengan efek seebeck dimana terdapat dua buah lempeng logam yang tersambung pada lingkungan dengan suhu yang berbeda maka akan menimbulkan aliran arus listrik pada material tersebut.



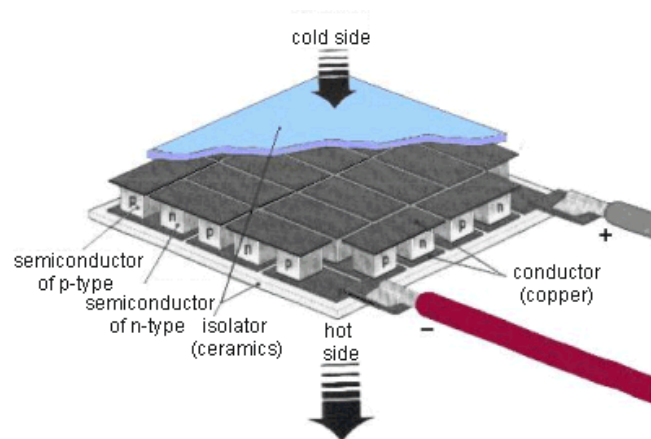
Gambar 2.3 Struktur Pembangkit Data *Thermoelectric* (Putra et al., 2009)

Pada gambar Gambar 2.3 adalah struktur TEG yang terdiri dari suatu susunan elemen tipe-n dan tipe-p. Panas yang masuk pada satu sisi

dan sisi lainnya untuk pembuangan panas, menghasilkan suatu yang melewati sambungan *thermoelectric*.

2.5 Modul Peltier SP 1848 27145SA

Modul SP 1848-27145 SA adalah salah satu jenis *Thermoelectric Generator* (TEG) berbasis efek *Seebeck* yang mampu mengonversi perbedaan suhu menjadi energi listrik. Modul ini bekerja berdasarkan efek Seebeck, di mana perbedaan suhu antara sisi panas (*hot side*) dan sisi dingin (*cold side*) menghasilkan tegangan listrik DC. Modul SP 1848-27145 SA memiliki keunggulan tahan terhadap suhu tinggi (hingga 120°C), sehingga cocok untuk aplikasi pada knalpot atau mesin industri., ukurannya yang kecil dan ringan memudahkan integrasi dengan berbagai system, dan modul ini memiliki respons yang cepat terhadap perubahan.



Gambar 2.4 Struktur Modul Peltier (<http://ixbtlabs.com>)

Pada gambar 2.4 adalah struktur modul peltier dimana biasanya untuk Modul Peltier ini sisi dengan tulisan (kata-kata) adalah sisi yang harus didinginkan, dan sisi lainnya (tanpa tulisan) adalah sisi yang dipanaskan. Lapisan modul peltier ini menggunakan isolator keramik dan memiliki semikonduktor tipe N dan P. Untuk mencapai keluaran tegangan dan arus maksimum, sisi dingin dari modul ini harus dipasang heatsink atau pelat dingin agar panas dapat dibuang sehingga terjadi perbedaan suhu pada

kedua sisi modul peltier. Tanpa pendinginan yang memadai, modul akan cepat panas, daya keluaran akan menurun dan modul akan rusak jika dibiarkan terlalu panas. Seperti halnya semua TEG dan TEC, modul ini harus dipasang pada heatsink sebelum diberi panas.

Berikut ini adalah tabel spesifikasi keluaran tegangan dan arus modul peltier SP 1848 27145SA yang didapatkan dari www.electracool.com/install.htm

Tabel 2.2 Tabel Tegangan dan Arus Modul Peltier

Temperatue Differential (°C)	20	40	60	80	100
Tegangan (V)	0.97	1.8	2.4	3.6	4.8
Arus (mA)	225	368	469	558	669

Sedangkan untuk spesifikasi dari modul peltier SP 1834 274145SA memiliki ukuran 40mm x 40mm x 4mm dengan suhu operasi mulai dari -30°C sampai dengan 120°C, tetapi biasanya untuk modul peltier tipe ini tidak dianjurkan untuk memakai suhu operasi maksimal karena dapat merusak modul.

2.6 Inverter

Inverter adalah suatu alat yang dapat mengubah tegangan bolak-balik menjadi tegangan searah dengan frekuensi dan tingkat tegangan yang dapat diatur (Rashid, 1993). Rangkaian inverter terdiri dari tiga bagian yaitu, pertama sebuah rangkaian yang terbentuk dari rangkaian converter yang mengubah sumber tegangan bolak-balik jala-jala menjadi tegangan searah, yang kedua adalah rangkaian inverter yang mengubah tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik satu dasa dengan frekuensi yang beragam. Bagian yang ketiga adalah sebuah rangkaian control yang

berfungsi sebagai pengendali rangkaian utama. Gabungan keseluruhan rangkaian ini disebut unit inverter (FATEC, 2006). Berikut ini adalah gambar unit inverter



Gambar 2.5 Inverter

2.7 DC-DC Step Up Konverter

Penguat DC-DC step-up (atau konverter *boost*) adalah perangkat yang meningkatkan tegangan DC input menjadi tegangan output yang lebih tinggi. Ini bekerja dengan menyimpan energi dalam induktor selama fase saklar menyala dan melepaskannya ke beban selama fase saklar mati. Berbagai konfigurasi DC-DC converter telah banyak dikembangkan, diantaranya adalah jenis DC-DC boost converter yang tidak memiliki isolasi dielektrik antara tegangan masukan dan keluaran, atau biasa disebut sebagai *non-isolated* DC-DC converter (Buntulayuk et al., 2018). *Boost* modul yang akan digunakan adalah *non-isolated booster* dengan input tegangan 4,3V – 32V. Penerapan DC-DC converter dalam perkembangannya telah memungkinkan suatu perangkat elektronika berfungsi dengan menggunakan sumber energi baterai yang bertegangan kecil di mana tegangan keluarannya dapat diubah ubah sesuai kebutuhan pemakaian.



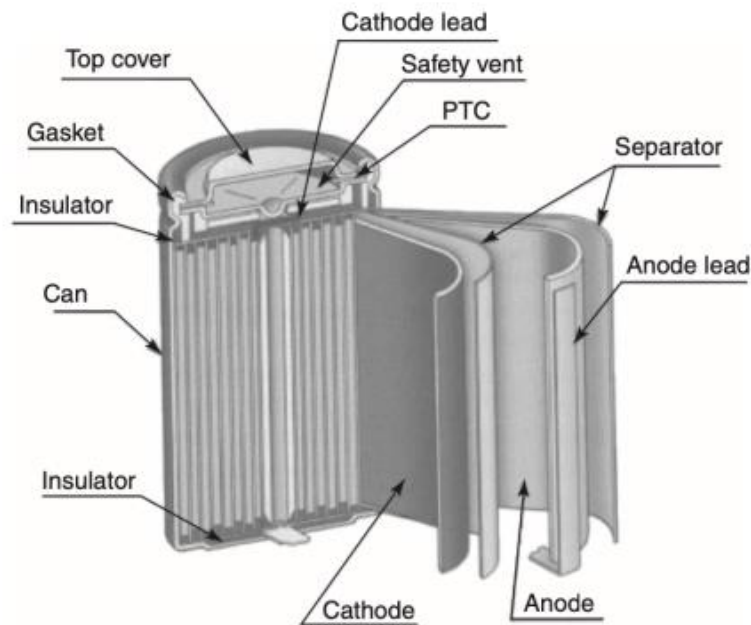
Gambar 2.6 DC-DC *Step Up Booster*

Pada gambar 6 DC-DC *step up booster* yang digunakan tipe XL6009 yang dilengkapi dengan voltmeter. Tegangan keluaran yang dihasilkan oleh modul ini dalah 5V hingga 52V.

2.8 Baterai 12V 4,8Ah

Baterai merupakan komponen utama dalam sistem penyimpanan energi listrik yang berfungsi menyimpan energi dari sumber energi terbarukan sebelum disalurkan ke beban atau ke inverter. Dalam sistem energi terbarukan, pemilihan baterai harus mempertimbangkan kapasitas penyimpanan yang dinyatakan dalam satuan ampere-hour (Ah), karena parameter ini menunjukkan kemampuan baterai dalam menyuplai arus listrik selama periode waktu tertentu. Konsep kapasitas baterai dalam Ah digunakan secara luas dalam perancangan sistem penyimpanan energi dan menjadi dasar dalam menentukan ukuran baterai yang sesuai dengan kebutuhan sistem energi terbarukan.(Apa et al., 2025)

Dalam aplikasi sistem energi terbarukan, baterai berperan sebagai buffer energy yang menyimpan energi listrik ketika sumber energi tersedia dan melepaskannya saat sumber energi tidak tersedia atau tidak mencukupi. Penelitian mengenai sistem panel surya dengan penyimpanan energi menunjukkan bahwa baterai digunakan sebagai media penyimpanan energi yang kemudian disalurkan ke inverter untuk dikonversi dari tegangan DC menjadi AC sesuai kebutuhan beban listrik (Subekti et al., 2025).

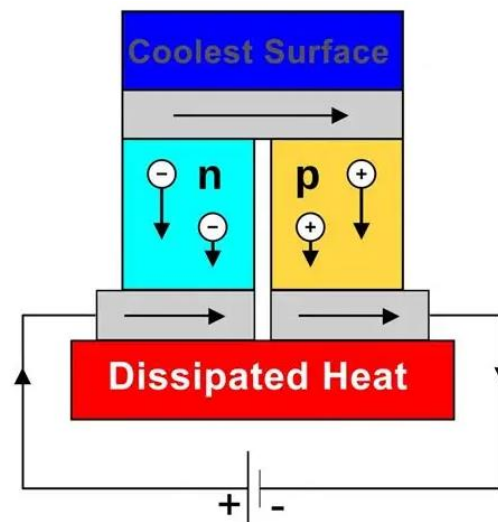


Gambar 2.7 Diagram Sel Li-Ion Lilitan Spiral Silinder (Linden's Handbook)

Pada gambar 2.7 menunjukkan diagram skema sel lilitan spiral silinder. Dalam setiap faktor bentuk, sel menggunakan elektrolit cair atau elektrolit polimer atau polimer gel. Aplikasi yang sekarang dialamatkan untuk baterai Li-ion meliputi barang elektronik seperti telepon genggam, komputer jinjing, kamera digital, perkakas daya, sepeda dan skuter listrik, maupun peralatan militer. Aplikasi berikutnya yang besar adalah kendaraan listrik. (Setyawan, H at., 2017)

2.9 Efek Seebeck

Efek Seebeck pertama kali ditemukan oleh Thomas Johann Seebeck pada tahun 1821. Prinsip kerja dari efek Seebeck yang bekerja pada pembangkit termoelektrik adalah jika ada dua buah material atau lempeng logam yang tersambung berada pada lingkungan dengan suhu yang berbeda maka di dalam material atau lempeng logam tersebut akan mengalir arus listrik searah. Efek Seebeck menjelaskan, bahwa GGL akan timbul dalam rangkaian dari dua buah material yang berbeda (sisi dingin dan sisi panas) dirangkai seperti pada Gambar 2.8, dan masing-masing sisinya diletakkan pada suhu yang berbeda, maka akan terjadi arus listrik pada rangkaian tersebut. Arus listrik tersebut akan tetap mengalir selama kedua sisi tersebut berada pada suhu yang berbeda (Haryanto et al., 2015).



Gambar 2.8 Efek Seebeck

Koefisien Seebeck adalah sifat material dan memberikan kecepatan perubahan antara tegangan termoelektrik (V) dan (T) yang ditunjukkan dengan persamaan berikut;(Haryanto et al., 2015)

$$S = \frac{dV}{dT}$$

Dimana;

S = Koefisien Seebeck (V/°C)

dV = Perbedaan tegangan (V)

dT = Perbedaan suhu ($^{\circ}\text{C}$)

Efek seebeck terjadi jika terdapat perbedaan suhu atau temperature antar sisi, maka akan dihasilkan tegangan listrik. Peristiwa sebaliknya, perbedaan temperature akan dihasilkan jika ada arus yang mengalir disebut efek peltier.

2.10 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir dalam penelitian ini disusun berdasarkan alur logis yang menghubungkan permasalahan nyata di lapangan dengan solusi teknologi yang diusulkan.

Di PT MNA Serang khususnya pada plant Refinery, banyak jalur pipa *steam* yang diinstal pipa kapiler atau yang biasa disebut oleh tim lapangan sebagai *steam tracing*. Pipa kapiler tersebut mengeluarkan uap panas dan kondensat. Kondensasi pada pipa timbul akibat perbedaan suhu atau temperature pada lingkungan sekitar serta kondisi operasional pada jalur *steam* dengan tekanan yang cukup tinggi. Panas uap buangan pada pipa kapiler tersebut bisa mencapai $\pm 120^{\circ}\text{C}$ berpotensi menimbulkan bahaya keselamatan bagi personil disekitar area kerja dan pemborosan energi termal dan penurunan efesiensi system.

Berdasarkan identifikasi masalah tersebut, penelitian ini mengembangkan suatu solusi dengan memanfaatkan panas buangan pada pipa tersebut sebagai sumber energy baru menggunakan *thermoelectric generator* menjadi energi listrik. Secara konseptual sistem ini bekerja dengan prinsip sebagai berikut:

1. Efek Seebeck. Prinsip kerja dari efek seebeck yaitu dimana perbedaan suhu antara sisi panas yang terhubung ke pipa kapiler (sebagai sumber panas) dan sisi dingin (didinginkan oleh heat sink) untuk menghasilkan tegangan listrik.

2. Modul Peltier merupakan thermoelectric generator (TEG) yang berfungsi sebagai elemen termoelektrik inti yang mengonversi gradien termal menjadi energi listrik.
3. Membuat pemodelan dan simulasi terkait kelayakan penggunaan modul peltier sebagai sumber energi untuk menggerakkan motor AC berdaya 125W.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

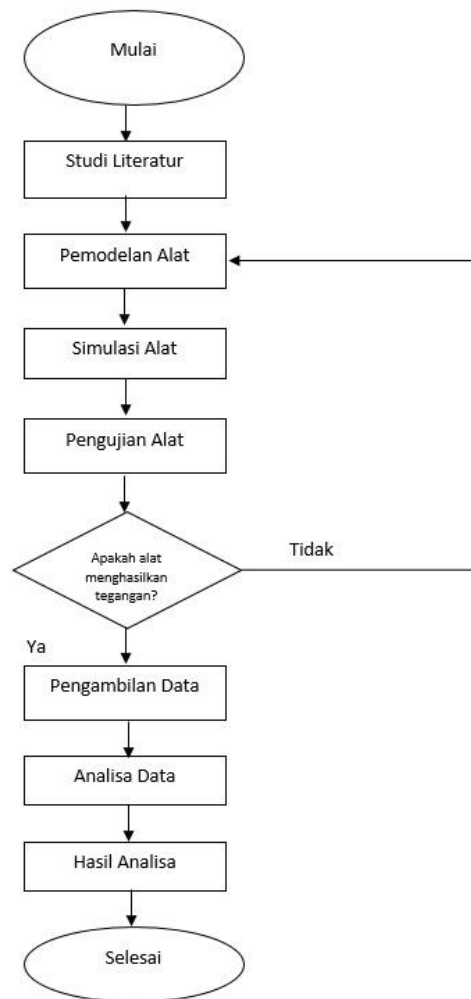
Penelitian ini akan dilaksanakan di plant Refinery PT MNA Serang, Banten. Waktu pelaksanaan akan dimulai dari bulan November 2025 - Januari 2026. Berikut adalah tabel timeline penelitian ini dilakukan

Tabel 3.1 *Timeline* Penelitian

No	Kegiatan	November 2025				Desember 2025				Januari 2026			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Pengajuan Ulang Proposal												
2	Revisi Design Penelitian												
3	Observasi Lapangan												
4	Pengadaan Material												
5	Perangkaian Alat												
6	Uji coba Alat												
7	Pengambilan Data												

3.2 Diagram Alir

Diagram alir (*flowchart*) merupakan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam melaksanakan sebuah penelitian. Diagram alir bertujuan untuk memberikan informasi keseluruhan penelitian sehingga lebih mudah untuk dipahami. Gambar 3.1 merupakan gambaran umum penelitian ini dilakukan.



Gambar 3.1 Diagram Alir

Berdasarkan Gambar 3.1 di atas, tahapan pada penelitian tugas akhir ini dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Studi literatur, merupakan tahapan awal pada penelitian yang bertujuan untuk mengumpulkan jurnal-jurnal terkait penelitian.

2. Pemodelan alat, merupakan tahapan lanjutan dimana dilakukan perancangan alat dengan menggunakan bahan dan material yang sudah di perlukan.
3. Simulasi alat, merupakan tahapan uji coba dari perancangan alat dimana dilakukan pengambilan data suhu pada alat yang sudah dirancang.
4. Pengujian alat, merupakan tahapan pengaplikasian pada sumber panas dari pipa steam tracing, pengujian alat ini akan mengukur suhu dan tegangan yang dihasilkan modul peltier.
5. Pengambilan data, merupakan tahapan dimana data premier yang diambil secara actual.
6. Analisa data, merupakan tahap pengolahan data dengan mengetahui pengaruh perbedaan suhu pada modul peltier terhadap tegangan yang dihasilkan.

3.3 Metode dan Desain Penelitian

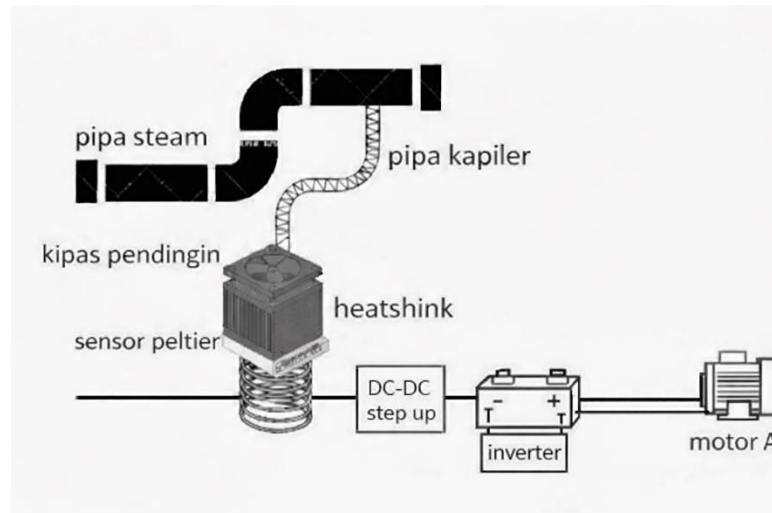
Bab ini menjelaskan tentang tahap–tahap yang dilakukan dalam melaksanakan penelitian perancangan modul termoelektrik generator menggunakan peltier.

3.3.1 Studi Literature dan Observasi lapangan

Tahapan ini mengumpulkan informasi dari berbagai sumber seperti: buku, e book, internet dan jurnal nasional ataupun internasional yang berguna untuk membantu dalam proses penelitian. Untuk Studi lapangan, yang mengamati pemanfaatan beda temperatur untuk menghasilkan tegangan.

3.3.2 *Design* Penelitian

Pada bagian ini dijelaskan mengenai beberapa komponen atau rangkaian yang dibutuhkan untuk membangun sebuah sistem yang dirancang secara keseluruhan.



Gambar 3.2 *Design* Penelitian

Urutan penjelasan mengenai skema rancangan modul termoelektrik generator yang tertera pada Gambar 10 adalah sebagai berikut:

1. Sumber panas yang akan digunakan diambil dari pipa kapiler pada pipa *steam*.
2. Peltier akan dirangkai seri pada plat aluminium berukuran 350x180x30 mm untuk ditempelkan pada bagian sumber panas.
3. Peltier yang digunakan tipe SP 1848 27145 SA berukuran 40x40x4 mm berjumlah 9 buah.
4. Heatsink bersirip rapat dengan ukuran 41x5 cm menyesuaikan dengan peltier yang akan digunakan, agar perbedaan suhu yang diperoleh dapat maksimal.
5. Inverter 300W DC 12V to AC 220V dengan frekuensi 50Hz berfungsi untuk mengubah tegangan input DC menjadi tegangan AC.
6. Modul Boost Converter DC-DC Step Up berukuran 49x26 mm dengan input tegangan 3-34V, input arus 3A, output tegangan 4-35V dan output arus 2,5A digunakan untuk menaikkan tegangan yang didapatkan dari modul peltier.
7. Baterai tipe Li-Ion dengan daya 4800 mAh, tegangan input 12V digunakan untuk menyimpan tegangan yang didapat.

8. Motor AC 125W digunakan sebagai beban untuk mengetahui konerja dan kestabilan sistem termoelektrik generator (TEG) dalam menyuplai beban.

3.3.3 Perlengkapan dan Bahan Penelitian

Alat dan bahan yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bahan Penunjang:
 - a. Pipa Kapiler
 - b. Plat besi hollow
 - c. Modul Peltier SP 1848 27145SA
 - d. Heatsink
 - e. Inverter DC to AC
 - f. DC-DC Step Up
 - g. Battery
 - h. Motor AC
2. Peralatan Penunjang:
 - a. Lem perekat
 - b. Termometer / Thermogun
 - c. Multimeter
 - d. Solder timah
 - e. Kabel Jumper
 - f. Kunci inggris
 - g. Sarung tangan

3.4 Populasi dan Sampel Penelitian

Populasi termasuk pada penelitian ini adalah semua pipa kapiler pada jalur pipa *steam* yang menghasilkan uap panas pada plant Refinery dan Tank Farm Refinery PT MNA Serang. Sedangkan untuk sampel yang akan di gunakan saat penelitian adalah salah satu titik jalur pipa *steam* trap pada area plant Tank Farm Refinery. Berikut gambar contoh sampel yang akan digunakan.



Gambar 3.3 Pipa Kapiler atau *Steam Tracing*

Gambar 3.3 adalah contoh pipa kapiler atau steam tracing yang digunakan sebagai sumber energi panas yang akan digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.4 Sample pengukuran Suhu Pipa Kapiler

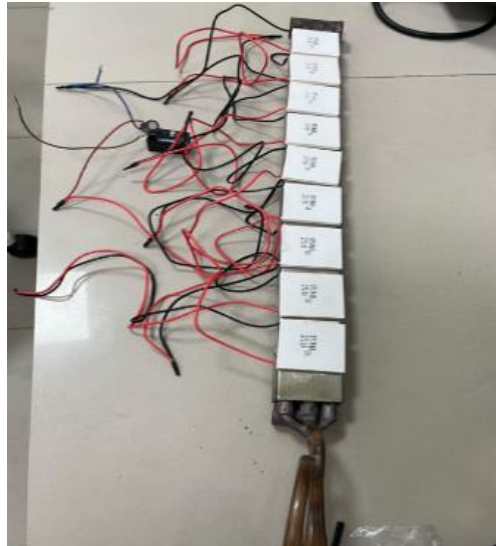
Gambar 3.4 menunjukkan suhu terukur pada pipa kapiler $\pm 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, alat ukur yang digunakan adalah *Fluke Thermogun* yang memungkinkan pengambilan data suhu secara non-kontak, akurat dan aman selama proses pengujian berlangsung.

BAB IV

PENGUJIAN DAN ANALISA

4.1 Hasil Perancangan Alat

Pada bab ini dibahas hasil perancangan dan realisasi sistem termoelektrik generator (TEG) berbasis modul Peltier tipe SP 1848 27145 SA yang dirancang untuk memanfaatkan panas buangan pada pipa kapiler (*steam tracing*) jalur pipa steam di Plant Refinery PT MNA Serang, Banten. Perancangan sistem ini bertujuan untuk mengonversi perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin modul Peltier menjadi energi listrik.



Gambar 4.1 Hasil Perancangan Alat

Gambar 4.1 adalah hasil perancangan alat yang dibuat, modul termoelektrik generator (TEG) berbasis Peltier dalam sistem ini berperan sebagai objek utama yang dimanfaatkan untuk mengonversi energi panas buangan menjadi energi listrik. Sumber energi panas berasal dari uap pada pipa kapiler (*steam tracing*) jalur pipa steam, yang berfungsi sebagai sisi panas modul Peltier. Sementara itu, sisi dingin diperoleh melalui penggunaan *heatsink* sebagai media pendinginan untuk menciptakan perbedaan suhu yang optimal.

Energi listrik yang dihasilkan oleh modul Peltier kemudian disalurkan ke rangkaian pengukuran dan beban melalui sistem pengkondisian daya. Tegangan dan arus keluaran dipantau menggunakan alat ukur untuk mengetahui karakteristik kinerja sistem. Seluruh rangkaian dirancang agar saling terintegrasi sehingga mampu merespons perubahan suhu pada sisi panas dan sisi dingin modul Peltier, serta menghasilkan keluaran listrik yang stabil sesuai dengan perbedaan suhu yang terjadi.

4.1.1 Konfigurasi Rangkaian dan Fungsi Komponen Sistem TEG

Dalam proses perancangan sistem termoelektrik generator (TEG) berbasis modul Peltier, setiap komponen memiliki peran dan fungsi spesifik yang saling terintegrasi untuk mendukung proses konversi energi panas menjadi energi listrik. Komponen utama yang digunakan meliputi modul Peltier tipe SP 1848 27145 SA, heatsink sebagai sistem pendinginan, pipa kapiler (*steam tracing*) sebagai sumber panas. Seluruh komponen tersebut dirangkai dalam satu kesatuan sistem yang dirancang untuk menghasilkan keluaran listrik secara optimal.

Penggunaan rangkaian yang terstruktur bertujuan untuk memudahkan proses pemasangan, pengujian, serta pengambilan data selama penelitian berlangsung. Selain itu, konfigurasi rangkaian yang baik diharapkan dapat meminimalkan kesalahan koneksi, meningkatkan keandalan sistem, dan memastikan hasil pengukuran yang akurat.

Masing-masing komponen dalam sistem TEG memiliki peran penting dalam menciptakan perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin modul Peltier. Perbedaan suhu tersebut menjadi faktor utama dalam pembangkitan tegangan listrik berdasarkan prinsip efek Seebeck. Penjelasan lebih rinci mengenai fungsi dan keterkaitan antar komponen dalam sistem termoelektrik generator disajikan pada tabel berikut.

Tabel 4.1 Konfigurasi Rangkaian dan Fungsi Komponen Sistem (TEG)

No.	Nama Rangkaian	Fungsi	Keterangan
1	Rangkaian Modul Peltier SP 1848 27145 SA	Sebagai elemen utama konversi energi panas menjadi energi listrik berdasarkan efek Seebeck.	Dipasang pada pipa kapiler sebagai sisi panas dan dihubungkan dengan heatsink pada sisi dingin untuk menciptakan perbedaan suhu (ΔT).
2	Rangkaian Pipa Kapiler (Steam Tracing)	Berfungsi sebagai sumber panas yang berasal dari uap pada jalur pipa steam.	Panas uap buangan ditransfer secara konduksi ke sisi panas modul Peltier.
3	Rangkaian Heatsink Pendingin	Menurunkan dan menjaga suhu sisi dingin modul Peltier agar tetap stabil.	Digunakan untuk meningkatkan perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin guna memperoleh keluaran listrik yang optimal.
4	Rangkaian Pengkondisian Daya	Mengatur dan menyalurkan keluaran listrik dari modul Peltier ke beban atau sistem pengukuran.	Dapat berupa rangkaian penyearah atau regulator untuk menjaga kestabilan tegangan keluaran.

Berdasarkan Tabel 4.1, dapat dijelaskan bahwa seluruh rangkaian dalam sistem termoelektrik generator (TEG) dirancang secara terintegrasi untuk mendukung proses konversi energi panas menjadi energi listrik. Setiap komponen memiliki fungsi yang saling melengkapi, mulai dari penyedia sumber panas, sistem pendinginan, hingga rangkaian pengukuran dan beban

listrik, sehingga sistem dapat bekerja secara optimal dan terkontrol.

Modul Peltier tipe SP 1848 27145 SA berperan sebagai komponen utama dalam sistem TEG. Modul ini berfungsi mengonversi perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin menjadi tegangan listrik berdasarkan prinsip efek Seebeck. Modul Peltier dipasang secara langsung pada pipa kapiler (*steam tracing*) sebagai sisi panas, sehingga panas uap buangan dapat ditransfer secara konduksi ke modul termoelektrik.

Pipa kapiler (*steam tracing*) berfungsi sebagai sumber panas utama dalam sistem ini. Panas yang berasal dari uap pada jalur pipa steam dimanfaatkan secara langsung tanpa memerlukan sumber panas tambahan, sehingga sistem ini mendukung pemanfaatan energi panas buangan. Keberadaan pipa kapiler sangat berpengaruh terhadap peningkatan suhu sisi panas modul Peltier dan secara langsung memengaruhi besar perbedaan suhu yang dihasilkan.

Pada sisi dingin modul Peltier, digunakan heatsink sebagai sistem pendinginan. Heatsink berfungsi untuk menurunkan dan menjaga suhu sisi dingin agar tetap lebih rendah dibandingkan sisi panas. Dengan pendinginan yang efektif, perbedaan suhu (ΔT) antara kedua sisi modul dapat ditingkatkan, sehingga keluaran tegangan dan daya listrik yang dihasilkan menjadi lebih optimal dan stabil.

Energi listrik yang dihasilkan oleh modul Peltier selanjutnya disalurkan ke rangkaian pengkondisian daya. Rangkaian ini berfungsi untuk mengatur, menyalurkan, serta menstabilkan tegangan dan arus keluaran sebelum digunakan oleh beban atau dilakukan proses pengukuran. Keberadaan rangkaian pengkondisian daya penting untuk memastikan hasil pengukuran akurat dan aman bagi komponen yang terhubung.

4.2 Hasil Pengukuran Kinerja Sistem Termoelektrik Generator

Pada bagian ini disajikan hasil pengukuran dari sistem termoelektrik generator (TEG) berbasis modul Peltier tipe SP 1848 27145 SA yang telah dirancang dan direalisasikan. Pengujian dilakukan untuk mengetahui sejauh mana sistem mampu mengonversi energi panas buangan menjadi energi listrik berdasarkan kondisi operasional nyata di lapangan. Hasil pengujian disajikan dalam beberapa tabel yang menggambarkan karakteristik termal dan elektrik sistem secara bertahap dan terstruktur.

Pengujian diawali dengan dilakukan pengujian hubungan antara suhu dan tegangan keluaran modul *peltier* untuk menganalisis pengaruh perbedaan suhu (ΔT) terhadap besarnya tegangan listrik yang dihasilkan. Selanjutnya pengukuran pada objek sumber panas, yaitu permukaan pipa kapiler (*steam tracing*) untuk mengetahui rentang dan kestabilan suhu yang tersedia sebagai input energi panas sistem. Pengujian berikutnya difokuskan pada hubungan antara suhu dan arus keluaran modul *peltier* guna mengetahui karakteristik arus listrik yang dihasilkan akibat variasi perbedaan suhu.

Untuk mengetahui performa dan keandalan sistem TEG yang telah dirancang, dilakukan serangkaian pengukuran terhadap setiap komponen utama. Pengukuran ini meliputi suhu pada sisi panas dan sisi dingin modul Peltier, kestabilan tegangan keluaran sistem, serta respons arus listrik terhadap variasi perbedaan suhu. Pengambilan data dilakukan dalam beberapa kondisi operasional untuk memastikan bahwa sistem bekerja sesuai dengan spesifikasi teknis modul Peltier dan konfigurasi rangkaian yang digunakan.

Data hasil pengukuran ini digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi kinerja sistem termoelektrik generator secara menyeluruh, serta untuk menganalisis hubungan antara perbedaan suhu dengan besaran tegangan, arus, dan daya yang dihasilkan. Dengan demikian, hasil pengukuran ini diharapkan dapat menunjukkan tingkat keandalan sistem

TEG dalam memanfaatkan panas buangan sebagai sumber energi listrik alternatif.

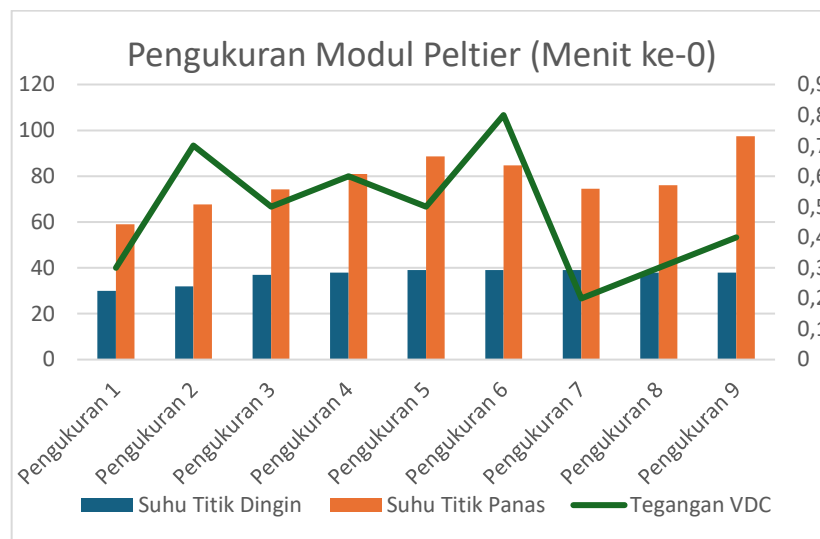
4.2.1 Hasil Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-0)

Tabel 4.2 menyajikan hasil pengukuran awal modul Peltier tipe SP 1848 27145 SA pada menit ke-0 setelah sistem mulai dioperasikan. Pada tahap ini, suhu sisi panas yang berasal dari pipa kapiler (*steam tracing*) berada pada rentang 59 °C hingga 97,4 °C, sedangkan suhu sisi dingin masih relatif rendah, yaitu antara 30 °C hingga 39 °C. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem pendinginan pada sisi dingin masih bekerja efektif dalam menjaga perbedaan suhu.

Tabel 4.2 Hasil Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-0)

No.	Suhu Titik Dingin (°C)	Suhu Titik Panas (°C)	Tegangan (VDC)
1	30	59.0	0.3
2	32	67.7	0.7
3	37	74.2	0.5
4	38	80.9	0.6
5	39	88.7	0.5
6	39	84.7	0.8
7	39	74.5	0.2
8	38	76.1	0.3
9	38	97.4	0.4

Tegangan keluaran yang dihasilkan pada kondisi awal ini berkisar antara 0,2 VDC hingga 0,8 VDC. Nilai tegangan yang masih relatif rendah disebabkan oleh perbedaan suhu (ΔT) yang belum stabil sepenuhnya. Namun demikian, hasil ini menunjukkan bahwa modul Peltier telah mulai menghasilkan tegangan listrik sebagai respons terhadap adanya perbedaan suhu, sehingga prinsip efek Seebeck telah bekerja sejak awal pengujian.



Gambar 4.2 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-0)

Grafik di atas menyajikan hasil pengukuran karakteristik modul Peltier pada menit ke-0 yang dilakukan sebanyak sembilan kali percobaan dengan menggunakan kombinasi diagram batang dan garis. Diagram batang biru merepresentasikan suhu pada titik dingin, sedangkan diagram batang oranye menunjukkan suhu pada titik panas modul Peltier. Sementara itu, garis abu-abu menggambarkan tegangan keluaran DC (VDC) yang dihasilkan akibat perbedaan suhu antara kedua sisi modul.

Berdasarkan grafik, suhu titik panas berada pada 59 °C hingga 97 °C dan menunjukkan kecenderungan meningkat pada setiap percobaan. Hal ini mengindikasikan bahwa sumber panas

mampu mentransfer energi panas secara bertahap dan relatif stabil ke sisi panas modul Peltier. Sebaliknya, suhu titik dingin berada pada rentang yang lebih rendah, yaitu 30 °C hingga 39 °C, dengan fluktuasi yang relatif kecil, menandakan bahwa sistem pendingin masih bekerja dalam batas normal.

Tegangan keluaran DC yang dihasilkan modul Peltier berada pada kisaran $\pm 0,2$ V hingga $\pm 0,8$ V. Tegangan tertinggi terjadi pada percobaan ke-6, yang bertepatan dengan kondisi perbedaan suhu (ΔT) terbesar antara sisi panas dan sisi dingin. Meskipun secara umum tegangan meningkat seiring bertambahnya perbedaan suhu, terdapat beberapa percobaan yang menunjukkan fluktuasi, khususnya pada percobaan ke-7, di mana tegangan mengalami penurunan meskipun suhu titik panas masih relatif tinggi.

Garis tren tegangan pada grafik memperlihatkan bahwa keluaran listrik tidak sepenuhnya linear terhadap kenaikan suhu, yang menunjukkan adanya pengaruh faktor lain seperti efisiensi pendinginan, kualitas kontak termal, serta kerugian panas pada sistem. Fluktuasi ini masih berada dalam batas wajar dan umum terjadi pada pengujian awal sistem termoelektrik.

Secara keseluruhan, grafik menunjukkan bahwa modul Peltier telah mampu menghasilkan tegangan listrik sejak awal pengujian (menit ke-0) dengan karakteristik keluaran yang relatif stabil. Meskipun nilai tegangan masih tergolong rendah, hasil ini membuktikan bahwa sistem bekerja sesuai dengan prinsip efek Seebeck, di mana perbedaan suhu menghasilkan energi listrik. Optimalisasi lebih lanjut dapat difokuskan pada peningkatan perbedaan suhu, perbaikan sistem pendinginan, serta penyempurnaan desain mekanik dan termal guna meningkatkan tegangan dan daya keluaran.

4.2.2 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-5)

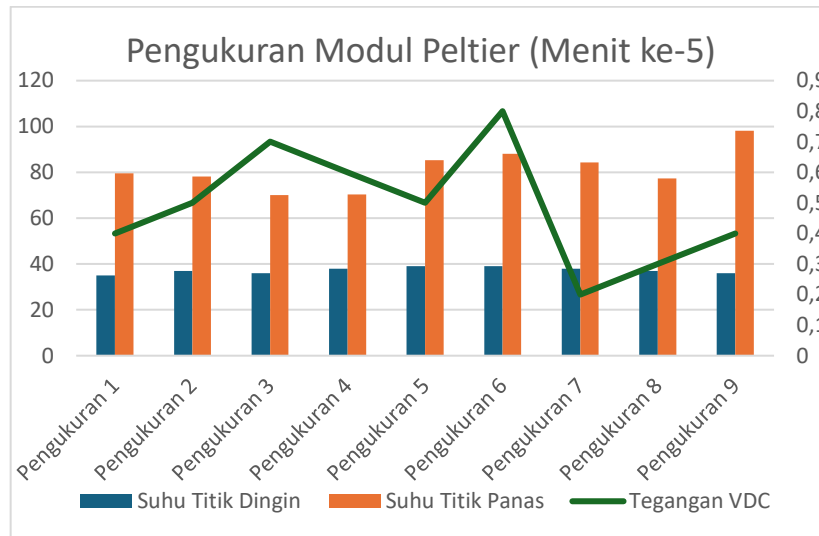
Tabel 4.3 memperlihatkan hasil pengukuran pada menit ke-5, di mana suhu sisi panas mengalami peningkatan dan cenderung lebih stabil dibandingkan kondisi awal. Suhu sisi panas tercatat berada pada kisaran 70 °C hingga 98,2 °C, sementara suhu sisi dingin meningkat secara bertahap ke rentang 35 °C hingga 39 °C akibat akumulasi panas selama proses pengujian.

Tabel 4.3 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-5)

No	Suhu Titik Dingin (°C)	Suhu Titik Panas (°C)	Tegangan (VDC)
1	35	79.5	0.4
2	37	78.1	0.5
3	36	70.0	0.7
4	38	70.3	0.6
5	39	85.3	0.5
6	39	88.1	0.8
7	38	84.3	0.2
8	37	77.3	0.3
9	36	98.2	0.4

Pada kondisi ini, tegangan keluaran modul Peltier berada pada rentang 0,2 VDC hingga 0,8 VDC. Terlihat bahwa beberapa modul mampu mempertahankan tegangan yang sama atau sedikit meningkat dibandingkan menit ke-0, yang menunjukkan bahwa

sistem termoelektrik mulai mencapai kondisi kerja yang lebih stabil. Perbedaan suhu yang terbentuk antara sisi panas dan sisi dingin menjadi faktor utama yang memengaruhi besar kecilnya tegangan yang dihasilkan.



Gambar 4.3 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-5)

Grafik di atas menyajikan hasil pengukuran karakteristik modul Peltier pada menit ke-5 yang dilakukan sebanyak sembilan kali percobaan dengan menggunakan kombinasi diagram batang dan garis. Diagram batang biru merepresentasikan suhu titik dingin, sedangkan diagram batang oranye menunjukkan suhu titik panas modul Peltier. Sementara itu, garis abu-abu menggambarkan tegangan keluaran DC (VDC) yang dihasilkan akibat perbedaan suhu antara kedua sisi modul.

Berdasarkan grafik, suhu titik panas berada pada kisaran sekitar 70 °C hingga 98 °C dan cenderung lebih tinggi dibandingkan pengukuran pada menit ke-0. Hal ini menunjukkan bahwa setelah lima menit pengujian, sistem pemanas semakin stabil dan mampu mempertahankan suplai panas ke sisi panas modul Peltier. Di sisi lain, suhu titik dingin berada pada rentang 35 °C hingga 39 °C, dengan fluktuasi yang relatif kecil, yang

menandakan bahwa sistem pendingin masih bekerja meskipun mulai mengalami peningkatan beban termal.

Tegangan keluaran DC yang dihasilkan berada pada kisaran $\pm 0,2$ V hingga $\pm 0,8$ V. Tegangan tertinggi terjadi pada percobaan ke-6, yang bertepatan dengan kondisi perbedaan suhu (ΔT) terbesar antara sisi panas dan sisi dingin. Namun, pada percobaan ke-7, tegangan mengalami penurunan yang cukup signifikan meskipun suhu titik panas masih relatif tinggi, yang mengindikasikan adanya gangguan kestabilan termal atau penurunan efektivitas pendinginan pada sisi dingin.

Garis tren tegangan pada grafik memperlihatkan pola yang berfluktuasi, menunjukkan bahwa hubungan antara perbedaan suhu dan tegangan keluaran tidak sepenuhnya linear. Fluktuasi ini kemungkinan disebabkan oleh faktor-faktor seperti perubahan laju perpindahan panas, ketidaksempurnaan kontak termal antara modul Peltier dan permukaan pemanas, serta keterbatasan sistem pendingin dalam mempertahankan suhu sisi dingin.

Secara keseluruhan, grafik pengukuran pada menit ke-5 menunjukkan bahwa modul Peltier menghasilkan tegangan yang lebih besar dan relatif lebih stabil dibandingkan pengukuran awal. Hal ini menandakan bahwa sistem termoelektrik mulai mencapai kondisi kerja yang lebih optimal setelah beberapa menit pengoperasian. Meskipun demikian, masih terdapat fluktuasi tegangan yang menunjukkan bahwa optimalisasi sistem pendinginan dan manajemen termal diperlukan untuk meningkatkan kestabilan dan efisiensi keluaran listrik.

4.2.3 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-10)

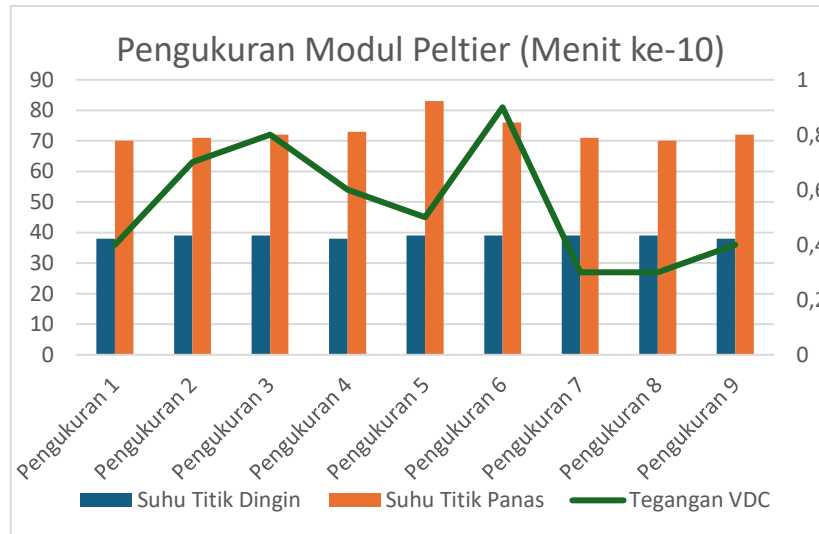
Tabel 4.4 menunjukkan hasil pengukuran pada menit ke-10, di mana suhu sisi dingin relatif konstan di sekitar $38\text{--}39\text{ }^{\circ}\text{C}$,

sedangkan suhu sisi panas berada pada kisaran 70 °C hingga 83 °C. Kondisi ini menandakan bahwa sistem telah mendekati keadaan tunak (*steady state*), di mana perpindahan panas antara sisi panas dan sisi dingin berlangsung secara lebih seimbang.

Tabel 4.4 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-10)

No	Suhu Titik Dingin (°C)	Suhu Titik Panas (°C)	Tegangan (VDC)
1	38	70	0.4
2	39	71	0.7
3	39	72	0.8
4	38	73	0.6
5	39	83	0.5
6	39	76	0.9
7	39	71	0.3
8	39	70	0.4
9	38	72	0.4

Pada kondisi ini, tegangan keluaran modul Peltier berada pada rentang 0,3 VDC hingga 0,9 VDC. Nilai tegangan tertinggi tercatat sebesar 0,9 VDC, yang menunjukkan bahwa pada perbedaan suhu tertentu, modul mampu menghasilkan keluaran listrik yang lebih optimal. Hal ini menguatkan bahwa peningkatan ΔT secara langsung berbanding lurus dengan kenaikan tegangan keluaran, sesuai dengan karakteristik dasar modul termoelektrik.



Gambar 4.4 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-10)

Grafik di atas menyajikan hasil pengukuran karakteristik modul Peltier pada menit ke-10 yang dilakukan sebanyak sembilan kali percobaan dengan menggunakan kombinasi diagram batang dan garis. Diagram batang biru menunjukkan suhu titik dingin, sedangkan diagram batang oranye merepresentasikan suhu titik panas. Sementara itu, garis abu-abu menggambarkan tegangan keluaran DC (VDC) yang dihasilkan oleh modul Peltier akibat perbedaan suhu antara kedua sisi modul.

Berdasarkan grafik, suhu titik panas berada pada 70 °C hingga 83 °C dan relatif lebih stabil dibandingkan pengukuran pada menit ke-0 dan ke-5. Hal ini mengindikasikan bahwa setelah sepuluh menit pengoperasian, sistem telah mencapai kondisi termal yang lebih seimbang. Di sisi lain, suhu titik dingin berada pada rentang 38 °C hingga 49 °C, dengan fluktuasi yang kecil, menunjukkan bahwa sistem pendinginan masih bekerja meskipun telah menerima beban panas dalam waktu yang lebih lama.

Tegangan keluaran DC yang dihasilkan berada pada kisaran $\pm 0,3$ V hingga $\pm 0,9$ V. Tegangan tertinggi terjadi pada

percobaan ke-6, yang bertepatan dengan kondisi perbedaan suhu (ΔT) yang relatif besar antara sisi panas dan sisi dingin. Namun, pada percobaan ke-7, terjadi penurunan tegangan yang cukup signifikan meskipun suhu titik panas masih berada pada nilai yang cukup tinggi. Kondisi ini mengindikasikan adanya penurunan efektivitas perpindahan panas atau peningkatan suhu pada sisi dingin yang menyebabkan ΔT menurun.

Garis tren tegangan pada grafik menunjukkan pola meningkat pada awal percobaan, kemudian menurun, dan kembali meningkat secara perlahan, yang menandakan bahwa keluaran listrik modul Peltier dipengaruhi oleh kestabilan sistem termal. Hubungan antara suhu dan tegangan tidak bersifat linear sempurna, karena dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti efisiensi modul Peltier, kondisi kontak termal, serta kemampuan sistem pendinginan dalam mempertahankan suhu sisi dingin.

Secara keseluruhan, grafik pengukuran pada menit ke-10 menunjukkan bahwa modul Peltier masih mampu menghasilkan tegangan listrik yang relatif stabil meskipun terjadi kecenderungan penurunan ΔT akibat akumulasi panas pada sisi dingin. Hal ini menunjukkan bahwa sistem termoelektrik bekerja secara berkelanjutan, namun optimalisasi lebih lanjut diperlukan, khususnya pada sistem pendinginan, agar perbedaan suhu tetap terjaga dan tegangan keluaran dapat dipertahankan atau ditingkatkan dalam jangka waktu operasi yang lebih lama.

4.2.4 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-15)

Tabel 4.5 menyajikan hasil pengukuran karakteristik modul Peltier pada menit ke-15 yang dilakukan sebanyak sembilan kali pengujian. Berdasarkan data yang diperoleh, suhu pada titik dingin berada pada kisaran 38 °C hingga 40 °C, sedangkan suhu pada titik panas tercatat berada pada rentang 71

°C hingga 98 °C. Kondisi ini menunjukkan bahwa selama sepuluh menit pengoperasian, panas masih terakumulasi pada sisi panas modul Peltier, sementara sistem pendinginan pada sisi dingin masih mampu menjaga suhu dalam batas yang relatif stabil.

Tabel 4.5 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-15)

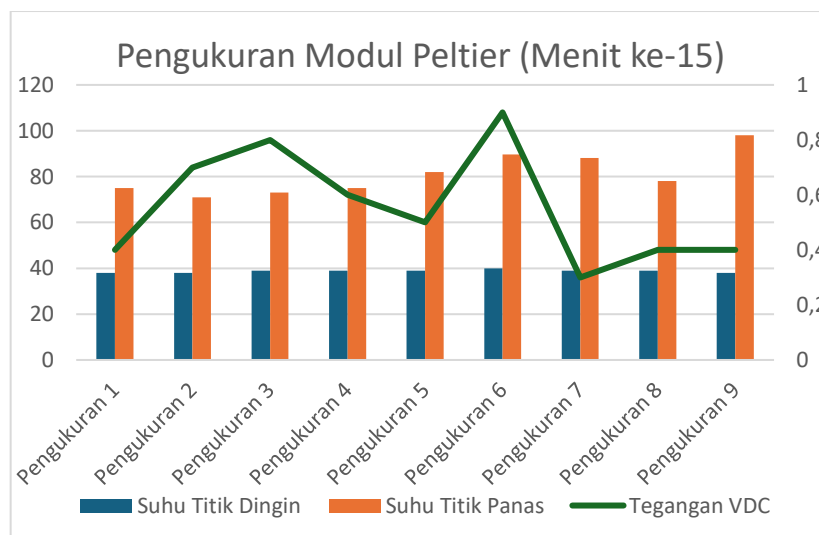
No	Suhu Titik Dingin (°C)	Suhu Titik Panas (°C)	Tegangan (VDC)
1	38	75	0.4
2	38	71	0.7
3	39	73	0.8
4	39	75	0.6
5	39	82	0.6
6	40	89.7	0.8
7	39	88.1	0.4
8	39	78	0.4
9	38	98	0.4

Tegangan keluaran yang dihasilkan modul Peltier berada pada kisaran 0,4 VDC hingga 0,8 VDC. Tegangan tertinggi tercatat pada pengujian ke-3 dan ke-6, yang bertepatan dengan kondisi perbedaan suhu (ΔT) yang relatif besar antara sisi panas dan sisi dingin. Sebaliknya, pada beberapa pengujian dengan suhu titik panas yang tinggi namun suhu titik dingin juga meningkat, tegangan keluaran cenderung lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa besarnya tegangan tidak hanya dipengaruhi

oleh suhu absolut, tetapi lebih dominan oleh selisih suhu antara kedua sisi modul.

Meskipun terjadi fluktuasi suhu dan tegangan pada beberapa pengujian, sistem secara umum masih mampu menghasilkan tegangan listrik yang relatif stabil. Kondisi ini mengindikasikan bahwa modul Peltier tetap bekerja sesuai dengan prinsip efek Seebeck, meskipun terdapat keterbatasan pada sistem pendinginan yang menyebabkan peningkatan suhu pada sisi dingin.

Secara keseluruhan, hasil pengukuran pada tabel ini memperkuat bahwa modul Peltier tipe SP 1848 27145 SA mampu menghasilkan tegangan listrik sebagai respons terhadap perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin. Besar kecilnya tegangan yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh nilai ΔT serta kestabilan sistem pendinginan. Oleh karena itu, peningkatan efektivitas pelepasan panas pada sisi dingin menjadi faktor penting agar kinerja sistem termoelektrik generator dapat dipertahankan dan ditingkatkan pada pengujian dengan durasi lebih lama maupun saat diberi beban.



Gambar 4.5 Pengukuran Modul Peltier (Menit ke-15)

Grafik di atas menyajikan hasil pengukuran karakteristik modul Peltier pada menit ke-15 yang dilakukan sebanyak sembilan kali pengujian menggunakan kombinasi diagram batang dan garis. Diagram batang biru menunjukkan suhu titik dingin, sedangkan diagram batang oranye merepresentasikan suhu titik panas modul Peltier. Sementara itu, garis abu-abu menggambarkan tegangan keluaran DC (VDC) yang dihasilkan akibat perbedaan suhu antara kedua sisi modul.

Berdasarkan grafik, suhu titik dingin berada pada kisaran 38 °C hingga 40 °C, sedangkan suhu titik panas berada pada rentang 70 °C hingga mendekati 100 °C. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada menit ke-15 terjadi akumulasi panas yang lebih besar pada sistem, terutama pada sisi panas modul Peltier. Meskipun demikian, suhu sisi dingin masih relatif stabil, yang menandakan bahwa sistem pendinginan masih bekerja, namun mulai mendekati batas kemampuannya dalam melepas panas.

Tegangan keluaran yang dihasilkan modul Peltier berada pada kisaran $\pm 0,4$ VDC hingga $\pm 0,9$ VDC. Tegangan tertinggi tercatat pada pengukuran ke-6, yang bertepatan dengan kondisi perbedaan suhu (ΔT) terbesar antara sisi panas dan sisi dingin. Sebaliknya, pada pengukuran ke-7, terjadi penurunan tegangan yang cukup signifikan meskipun suhu titik panas masih relatif tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa kenaikan suhu pada sisi dingin menyebabkan penurunan ΔT sehingga berdampak langsung pada besarnya tegangan keluaran.

Garis tren tegangan pada grafik menunjukkan pola meningkat pada awal pengujian, mencapai puncak, kemudian menurun dan cenderung stabil. Pola ini mengindikasikan bahwa kinerja modul Peltier dipengaruhi oleh kestabilan sistem termal dalam jangka waktu pengoperasian yang lebih lama. Fluktuasi

tegangan yang terjadi masih berada dalam batas wajar dan umum dijumpai pada sistem termoelektrik akibat perubahan laju perpindahan panas dan efisiensi pendinginan.

Secara keseluruhan, grafik pengukuran pada menit ke-15 menunjukkan bahwa modul Peltier SP 1848 27145 SA masih mampu menghasilkan tegangan listrik secara berkelanjutan, meskipun terjadi kecenderungan penurunan perbedaan suhu akibat keterbatasan sistem pendinginan. Hasil ini menegaskan pentingnya optimalisasi sistem pelepasan panas pada sisi dingin agar perbedaan suhu dapat dipertahankan dan kinerja termoelektrik generator tetap optimal pada durasi pengujian yang lebih panjang.

4.2.5 Pengujian panas pada Objek Sumber Panas

Sebelum modul *peltier* digunakan untuk konversi energi panas menjadi energi listrik, penting untuk mengetahui karakteristik suhu dari sumber panas yang digunakan. Pada pengujian ini, pipa kapiler (*steam tracing*) dijadikan sumber panas. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa pipa kapiler mampu menyediakan energi panas yang cukup, stabil dan konsisten selama proses konversi. Pengukuran dilakukan pada beberapa interval waktu untuk mendapatkan suhu minimum, maksimum dan rata-rata.

Tabel 4.6 Pengukuran suhu sumber panas

No	Waktu Pengujian	Suhu Minimum (°C)	Suhu Maksimum (°C)	Rata-rata Suhu (°C)
1	Menit ke-0	59,0	97,4	77,0

2	Menit ke-5	70,0	98,2	81,2
3	Menit ke-10	70,0	83,0	73,1
4	Menit ke-15	71,0	98,0	81,1

Dari tabel terlihat bahwa suhu pipa kapiler berada pada kisaran 59 °C hingga hamper 100 °C. Suhu ini cukup tinggi untuk mendukung proses konversi panas menjadi listrik oleh modul *peltier*. Fluktuasi suhu terjadi masih dalam batas yang dapat diterima, menunjukkan bahwa pipa kapiler relative stabil sebagai sumber panas.

4.2.6 Hubungan Suhu Terhadap Arus Output Modul Peltier

Selain tegangan, arus listrik yang dihasilkan modul *peltier* sangat dipengaruhi oleh perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin modul. Pengujian ini dilakukan untuk memetakan karakteristik arus keluaran modul *peltier* pada berbagai kondisi ΔT . Hasil ini penting untuk mengetahui kapasitas modul dalam menyuplai arus listrik pada kondisi nyata.

Tabel 4.7 Hubungan suhu terhadap arus

No	ΔT Rata-rata (°C)	Tegangan (VDC)	Arus (A)	Keterangan
1	± 45	0,3 – 0,4	0,08	ΔT rendah
2	± 55	0,5 – 0,6	0,10	ΔT sedang
3	± 60	0,7 – 0,8	0,12	ΔT tinggi
4	> 60	0,9	0,15	ΔT maksimum

Pada tabel 4.7 terlihat bahwa arus output meningkat seiring bertambahnya ΔT , sesuai dengan prinsip kerja modul *peltier*. Namun, arus yang dihasilkan masih relative kecil, sehingga modul tunggal belum cukup untuk menyuplai beban listrik berdaya tinggi. Data ini menjadi dasar pertimbangan penggunaan modul *peltier* dalam konfigurasi seri atau paralel untuk meningkatkan output.

4.2.7 Analisis Konfigurasi Modul *Peltier* Seri dan Paralel

Untuk meningkatkan keluaran listrik, beberapa modul *peltier* dapat dihubungkan secara seri, paralel atau kombinasi seri-paralel. Tujuan pengujian ini adalah membandingkan efek konfigurasi terhadap tegangan dan arus output, serta menentukan konfigurasi optimal sesuai kebutuhan beban listrik.

Tabel 4.8 Perbedaan Konfigurasi Modul *Peltier*

Konfigurasi	Jumlah Modul	Tegangan Output (V)	Arus Output (A)	Keterangan
Modul tunggal	1	0,2 – 0,9	0,08 – 0,15	Data uji
Seri	9 (9S)	1,8 – 5,5	0,08 – 0,15	Tegangan naik
Paralel	9 (9P)	0,2 – 0,5	0,72 – 1,35	Arus naik
Seri-paralel	9 (3S3P)	0,6 – 1,5	0,24 – 0,45	Tegangan & arus naik

Berdasarkan hasil pengujian yang dirangkum pada Tabel 4.6, dapat dianalisis bahwa konfigurasi rangkaian modul Peltier memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik keluaran listrik sistem Thermoelectric Generator (TEG),

khususnya pada besaran tegangan dan arus yang dihasilkan. Pengujian dilakukan pada beberapa kondisi operasi dengan perbedaan suhu (ΔT) yang bervariasi antara sisi panas dan sisi dingin modul, sehingga nilai keluaran listrik disajikan dalam bentuk rentang nilai minimum hingga maksimum.

Pada konfigurasi modul tunggal, modul Peltier SP1848-27145SA menghasilkan tegangan keluaran sebesar 0,2–0,9 V dengan arus 0,08–0,15 A. Nilai ini merepresentasikan kemampuan dasar satu modul dalam mengonversi energi panas menjadi energi listrik berdasarkan efek Seebeck, serta digunakan sebagai acuan utama dalam analisis konfigurasi rangkaian lanjutan.

Pada konfigurasi seri (9S), peningkatan jumlah modul yang dirangkai secara seri menyebabkan tegangan keluaran meningkat secara signifikan hingga mencapai 1,8–5,5 V, sementara arus keluaran relatif tetap berada pada kisaran 0,08–0,15 A. Kondisi ini sesuai dengan karakteristik rangkaian seri, di mana arus yang mengalir pada rangkaian sama untuk setiap elemen, sedangkan tegangan total merupakan hasil penjumlahan tegangan masing-masing modul, yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai:

$$I_{\text{seri}} = I_{\text{modul}}$$
$$V_{\text{seri}} = \sum_{i=1}^n V_i$$

Dengan demikian, konfigurasi seri efektif digunakan untuk aplikasi yang membutuhkan tegangan lebih tinggi, namun kurang optimal untuk beban yang memerlukan arus besar.

Sebaliknya, pada konfigurasi paralel (9P), arus keluaran meningkat secara signifikan hingga mencapai 0,72–1,35 A, sementara tegangan tetap rendah pada kisaran 0,2–0,5 V.

Peningkatan arus ini terjadi karena arus total pada rangkaian paralel merupakan hasil penjumlahan arus dari masing-masing modul, sedangkan tegangan antar cabang tetap sama. Secara matematis, hubungan arus pada rangkaian paralel dapat dinyatakan sebagai:

$$I_{pararel} = n \times I_{modul}$$

Dengan $n = 9$, sehingga arus total meningkat sebanding dengan jumlah modul yang diparalelkan. Konfigurasi ini lebih sesuai untuk beban yang membutuhkan arus besar dengan tegangan rendah.

Sementara itu, konfigurasi seri-paralel (3S3P) menunjukkan karakteristik keluaran yang lebih seimbang, dengan tegangan sebesar 0,6–1,5 V dan arus 0,24–0,45 A. Pada konfigurasi ini, setiap cabang terdiri dari tiga modul yang disusun seri, sehingga menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dibandingkan modul tunggal, sementara arus total diperoleh dari penjumlahan arus tiga cabang paralel. Hubungan arus pada konfigurasi ini dapat dinyatakan sebagai:

$$I_{seri - pararel} = m \times I_{modul}$$

Dengan $m = 3$, sehingga konfigurasi ini memberikan kompromi antara peningkatan tegangan dan arus. Karakteristik tersebut menjadikan konfigurasi seri-paralel lebih fleksibel untuk diintegrasikan dengan rangkaian pengkondisian daya seperti DC–DC converter maupun sistem penyimpanan energi baterai.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa pemilihan konfigurasi modul Peltier sangat menentukan kemampuan sistem TEG dalam menyuplai daya listrik sesuai dengan kebutuhan beban. Konfigurasi seri unggul dalam peningkatan tegangan, konfigurasi paralel unggul dalam peningkatan arus, sedangkan konfigurasi seri-paralel memberikan keseimbangan antara keduanya. Variasi nilai

keluaran yang terjadi selama pengujian dipengaruhi oleh fluktuasi perbedaan suhu (ΔT), keterbatasan sistem pendinginan, serta variasi karakteristik internal masing-masing modul Peltier. Temuan ini menegaskan bahwa optimasi konfigurasi modul merupakan faktor kunci dalam perancangan sistem Thermoelectric Generator berbasis modul Peltier SP1848-27145SA.

4.3 Validasi Karakteristik Sistem TEG

Sebelum membahas hasil pengujian dan analisis lebih lanjut, penting untuk memastikan bahwa sistem Thermoelectric Generator (TEG) berbasis modul Peltier tipe SP1848-27145 SA yang telah dirancang dan diuji berfungsi sesuai karakteristik teknisnya. Validasi ini dilakukan dengan tujuan untuk menilai kesesuaian antara data hasil pengukuran simulasi dengan teori serta temuan penelitian terdahulu yang telah dipublikasikan dalam jurnal ilmiah.

Validasi dilakukan pada beberapa aspek penting sistem TEG, antara lain: karakteristik suhu sumber panas, hubungan perbedaan suhu (ΔT) dengan tegangan dan arus output modul, konfigurasi modul Peltier (seri, paralel, dan seri-paralel), serta daya listrik yang diperoleh dari konversi energi panas menjadi energi listrik.

Melalui validasi ini, diharapkan dapat dipastikan bahwa hasil pengukuran berada dalam rentang yang wajar, konsisten dengan teori dan literatur ilmiah, serta sistem TEG yang diuji dapat dipertanggungjawabkan secara akademis. Selain itu, validasi ini memberikan dasar untuk analisis lebih lanjut mengenai efisiensi konversi energi, performa modul dalam berbagai konfigurasi, dan kapasitas sistem dalam menyuplai beban listrik nyata.

Tabel-tabel berikut menyajikan perbandingan hasil pengukuran dengan referensi jurnal ilmiah untuk tiap aspek validasi, beserta analisis kecocokan nilai, tren, dan fungsi kerja sistem TEG.

4.3.1 Validasi Hasil Pengukuran Sistem TEG

Untuk memastikan bahwa sistem Thermoelectric Generator (TEG) berbasis modul Peltier tipe SP1848-27145 SA yang dirancang memiliki kinerja yang dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah, dilakukan proses validasi terhadap hasil pengukuran simulasi. Kriteria validasi dalam penelitian ini didasarkan pada kesesuaian tren hubungan antar parameter, rentang nilai keluaran, serta kesamaan perilaku fisis sistem dibandingkan dengan literatur yang relevan. Validasi tidak difokuskan pada kesamaan numerik absolut, mengingat penelitian ini dilakukan pada skala *prototype* dengan kondisi sumber panas dan sistem pendinginan yang terbatas.

Tabel berikut menyajikan perbandingan antara hasil pengukuran sistem TEG yang diuji di lapangan dengan referensi jurnal ilmiah, beserta kesimpulan validitas setiap parameter berdasarkan kecocokan nilai, kecenderungan (tren), dan fungsi kerja sistem. Melalui validasi ini, diharapkan dapat diperoleh keyakinan bahwa sistem TEG yang dirancang memiliki kinerja yang dapat dipertanggungjawabkan secara akademis dan layak untuk dianalisis lebih lanjut.

Tabel 4.9 Validasi Hasil Pengukuran

No.	Aspek Validasi	Hasil Pengukuran	Referensi Jurnal	Validasi
-----	-------------------	------------------	---------------------	----------

1	Modul Peltier SP1848-27145 SA Tegangan Output	Tegangan tanpa beban 0,2–0,9 VDC	(Fahriani et al., 2022)	Tegangan yang dihasilkan konsisten dengan karakteristik sistem TEG di mana tegangan meningkat seiring ΔT , walaupun secara absolut lebih rendah karena variasi sumber panas dan konfigurasi simulasi.
2	Korelasi ΔT vs. Tegangan	Tegangan meningkat seiring perbedaan suhu	(Debi Puspa et al., 2024)	Hasil ini sesuai dengan tren literatur bahwa tegangan output modul meningkat dengan ΔT yang lebih tinggi, meskipun nilai absolut dapat bervariasi berdasarkan setting simulasi.
3	Pengaruh Sistem Pendinginan (Heatsink)	Adanya heatsink membantu mempertahankan ΔT antara sisi panas/dingin	(Gürçan & Yakar, 2025)	Hasil pengukuran konsisten dengan observasi bahwa desain heatsink yang lebih baik meningkatkan output TEG melalui peningkatan pembuangan panas sisi dingin, sehingga mempertahankan ΔT lebih tinggi dan output listrik lebih baik.

4	Hubungan Output dengan Sumber Panas	Output tegangan meningkat saat panas pipa kapiler lebih tinggi	(Taufiqurrahman et al., 2021)	Studi ini juga menunjukkan bahwa output tegangan sangat dipengaruhi oleh intensitas sumber panas dan ΔT pada modul.
5	Performa Listrik Terhadap Beban	Tegangan tanpa beban berbeda dari kondisi beban	(Utomo et al., 2022)	Literatur ini melaporkan bahwa tegangan dan daya yang dihasilkan dipengaruhi oleh beban dan koefisien Seebeck
6	Efek Skala Modul TEG	Tegangan per modul relatif rendah	(Siregar, n.d.)	Studi ini menunjukkan bahwa konfigurasi seri/parallel modul TEG mengubah tegangan dan arus output sesuai jumlah modul, sehingga hasil pengukuran ketika menggunakan modul tunggal layak dan konsisten secara ilmiah.

Penjelasan dari tabel validasi di atas menunjukkan bahwa hasil pengukuran kinerja sistem Thermoelectric Generator (TEG) berbasis modul Peltier tipe SP1848-27145 SA telah dibandingkan dan divalidasi dengan hasil-hasil penelitian dari jurnal ilmiah yang relevan. Validasi ini dilakukan untuk memastikan bahwa karakteristik listrik yang diperoleh dari pengujian simulasi berada dalam rentang yang wajar dan sesuai dengan teori serta temuan penelitian sebelumnya.

Pada modul Peltier SP1848-27145 SA, hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan keluaran berada pada rentang 0,2–0,9 VDC. Nilai ini sejalan dengan penelitian (Fahriani et al., 2022) yang melaporkan bahwa tegangan keluaran TEG meningkat seiring dengan bertambahnya perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin modul. Meskipun nilai absolut tegangan pada penelitian ini relatif rendah, perbedaan tersebut dapat dipengaruhi oleh variasi sumber panas, metode pendinginan, serta konfigurasi simulasi yang digunakan, sehingga hasil pengukuran masih dapat dinyatakan konsisten secara ilmiah.

Selanjutnya, hubungan antara perbedaan suhu (ΔT) dan tegangan keluaran menunjukkan kecenderungan bahwa tegangan meningkat seiring dengan bertambahnya ΔT . Temuan ini sesuai dengan hasil penelitian (Debi Puspa et al., 2024), yang menyatakan bahwa peningkatan ΔT secara langsung berpengaruh terhadap kenaikan tegangan keluaran modul TEG. Meskipun terdapat variasi nilai numerik akibat perbedaan kondisi pengujian, tren yang diperoleh pada penelitian ini sejalan dengan literatur yang ada.

Pengaruh sistem pendinginan (heatsink) juga terlihat jelas pada hasil pengujian, di mana penggunaan heatsink membantu mempertahankan perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin modul. Hal ini mendukung penelitian (Gürçan & Yakar, 2025) yang menunjukkan bahwa desain dan efektivitas heatsink berperan penting dalam meningkatkan pembuangan panas pada sisi dingin, sehingga ΔT dapat dipertahankan lebih besar dan output listrik TEG menjadi lebih optimal. Dengan demikian, hasil pengukuran pada penelitian ini konsisten dengan teori dan hasil simulasi sebelumnya.

Pada pengujian hubungan output dengan sumber panas, diperoleh hasil bahwa tegangan keluaran meningkat ketika panas pada pipa kapiler (steam tracing) lebih tinggi. Temuan ini sesuai dengan penelitian (Taufiqurrahman et al., 2021) yang menyatakan bahwa intensitas sumber panas sangat memengaruhi kinerja TEG, khususnya dalam meningkatkan ΔT dan tegangan keluaran. Hal ini menunjukkan bahwa pipa kapiler sebagai sumber panas dalam penelitian ini berfungsi secara efektif.

Selanjutnya, pengujian performa listrik terhadap beban menunjukkan adanya perbedaan antara tegangan dan tegangan saat diberikan beban. Fenomena ini sejalan dengan penelitian (Utomo et al., 2022) yang menjelaskan bahwa tegangan dan daya keluaran TEG dipengaruhi oleh kondisi beban, resistansi internal, serta koefisien Seebeck modul. Hasil ini mengindikasikan bahwa karakteristik listrik modul TEG pada penelitian ini sesuai dengan perilaku dasar sistem termoelektrik.

Pada aspek efek skala modul TEG, hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan keluaran per modul relatif rendah ketika hanya menggunakan satu modul TEG. Hal ini sesuai dengan studi (Siregar, n.d.) yang menyatakan bahwa penggunaan beberapa modul TEG dalam konfigurasi seri atau paralel dapat meningkatkan tegangan dan arus keluaran secara keseluruhan. Dengan demikian, hasil pengukuran pada penelitian ini dapat dinyatakan wajar dan konsisten secara ilmiah untuk konfigurasi modul tunggal.

Secara keseluruhan, hasil validasi menunjukkan bahwa seluruh parameter pengukuran sistem TEG berada dalam kesesuaian dengan referensi jurnal ilmiah yang digunakan. Hal ini membuktikan bahwa sistem Thermoelectric Generator yang dirancang memiliki karakteristik kinerja yang dapat dipertanggungjawabkan secara akademis dan layak untuk

dianalisis lebih lanjut sebagai sistem pemanfaatan energi panas menjadi energi listrik.

4.3.2 Validasi Pengujian Panas pada Objek Sumber Panas

Tabel 4.10 merupakan tabel pengujian panas pada objek sumber panas, dapat disimpulkan bahwa suhu panas yang dihasilkan oleh pipa kapiler berada pada rentang 59 hingga mendekati 100 °C dan tergolong memadai untuk mendukung proses konversi energi panas menjadi energi listrik menggunakan modul Thermoelectric Generator (TEG). Hal ini sejalan dengan penelitian (Diki et al., 2022) yang menunjukkan bahwa peningkatan suhu pada sisi panas modul TEG secara langsung meningkatkan tegangan keluaran akibat efek Seebeck, di mana pada suhu sekitar 70 °C modul TEG tipe SP1848 mampu menghasilkan tegangan hingga $\pm 1,49$ V. Dengan demikian, kondisi suhu pada pengujian ini telah memenuhi prasyarat dasar terjadinya konversi panas ke listrik secara efektif.

Tabel 4.10 Validasi Pengujian Panas pada Sumber Panas

No.	Aspek Validasi	Hasil Pengukuran	Referensi Jurnal	Validasi
1	Pengaruh Suhu Panas terhadap Keluaran Listrik TEG	Suhu pipa kapiler 59~100 °C; dipandang cukup untuk konversi panas → listrik	(Diki et al., 2022)	Jurnal ini menunjukkan modul TEG SP1848-27145SA menghasilkan tegangan yang meningkat seiring meningkatnya temperatur sisi panas hingga 70 °C (output ~1,49 V). Hal ini sesuai prinsip Seebeck Effect , yakni tegangan sebanding dengan beda suhu antara sisi panas dan dingin.

2	Hubungan Suhu Sumber Panas & Output Daya TEG	Suhu tinggi ($> \sim 60^{\circ}\text{C}$) relevan untuk output energi listrik	(Wicaksono & Yunesti, 2021)	Studi menunjukkan output listrik (maks. $\sim 40,8\text{ W}$) diperoleh pada suhu panas 99°C dengan pengaturan aliran pendingin. Hal ini mendukung bahwa suhu sumber panas di kisaran $\sim 100^{\circ}\text{C}$ layak untuk menghasilkan output listrik pada TEG.
3	Relasi Suhu Panas & Tegangan / Power Output	Suhu sumber panas yang lebih tinggi berpotensi meningkatkan output listrik	(Doraghi & Jouhara, 2024)	Penelitian ini memvalidasi bahwa tegangan, arus, dan daya output TEG meningkat saat perbedaan suhu meningkat, yaitu output listrik lebih tinggi pada ΔT lebih besar. Hal ini senada dengan temuan dalam pengujian Anda di mana suhu tinggi mampu mendukung proses konversi energi panas ke listrik.

Selanjutnya, hubungan antara suhu sumber panas dan daya listrik yang dihasilkan juga tervalidasi melalui studi (Wicaksono & Yunesti, 2021), yang melaporkan bahwa output daya maksimum TEG diperoleh pada suhu sisi panas mendekati 99°C dengan pengaturan sistem pendinginan yang sesuai. Temuan ini mendukung hasil pengujian, di mana suhu sumber panas yang berada pada kisaran tinggi ($> 60^{\circ}\text{C}$ hingga $\sim 100^{\circ}\text{C}$) dinilai relevan dan layak untuk menghasilkan energi listrik dari TEG. Hal ini menunjukkan bahwa objek sumber panas yang digunakan memiliki potensi energi termal yang cukup untuk dimanfaatkan sebagai sumber pembangkit listrik skala kecil.

Selain itu, validasi teknis juga diperkuat oleh penelitian (Doraghi & Jouhara, 2024) yang menyatakan bahwa peningkatan perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin TEG akan meningkatkan tegangan, arus, serta daya keluaran secara

signifikan. Prinsip ini selaras dengan hasil pengujian yang menunjukkan bahwa suhu sumber panas yang lebih tinggi mampu mendukung kinerja konversi energi TEG secara optimal. Dengan demikian, secara keseluruhan pengujian panas pada objek sumber panas telah tervalidasi secara ilmiah dan konsisten dengan literatur, sehingga dapat dinyatakan layak sebagai sumber panas untuk sistem TEG yang diuji.

4.3.3 Validasi Hubungan Suhu Terhadap Arus Modul *Peltier*

Berdasarkan tabel 4.11 validasi korelasi beda suhu (ΔT) terhadap keluaran listrik TEG, dapat dijelaskan bahwa hasil pengujian menunjukkan adanya hubungan yang konsisten antara peningkatan ΔT dengan kenaikan tegangan dan arus keluaran. Pada aspek pertama, tegangan keluaran teramati meningkat dari 0,3 hingga 0,9 V seiring bertambahnya ΔT . Pola ini sejalan dengan penelitian (Ando Junior et al., 2024) yang menyatakan bahwa modul tegangan Peltier memiliki hubungan linier terhadap ΔT akibat efek Seebeck, di mana peningkatan perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin akan menghasilkan gaya gerak listrik yang lebih besar.

Tabel 4.11 Validasi Hubungan Suhu Terhadap Arus

No.	Aspek Validasi	Hasil Pengukuran	Referensi Jurnal	Validasi
1	Korelasi ΔT dengan Tegangan Output	Tegangan meningkat dari 0,3–0,9 V seiring ΔT	(Ando Junior et al., 2024)	Jurnal ini menunjukkan hubungan linear antara suhu (ΔT) dan tegangan output pada modul Peltier, dengan tegangan meningkat seiring naiknya suhu hingga 80 °C (mis. 0 V pada 0 °C sampai ~3 V pada 80 °C). Hal ini

				sesuai dengan tren kenaikan tegangan pada Tabel 4.5
2	Korelasi ΔT vs Arus Output	Arus meningkat dari 0,08 A $\rightarrow$ 0,15 A seiring ΔT	(Pauzi et al., 2025)	Penelitian ini menjelaskan bahwa arus output modul TEG dipengaruhi langsung oleh ΔT , karena arus maksimum ideal berkaitan dengan ΔT dan resistansi internal modul ($I \propto \Delta T/R$). Data ini mendukung pola arus meningkat dengan ΔT pada pengujian.
3	Pengaruh Seebeck Effect pada Tegangan & Arus	Tegangan dan arus meningkat dengan beda suhu	(Sifi et al., 2019)	Studi menunjukkan hubungan ΔT terhadap tegangan output, termasuk tegangan naik signifikan di atas $\Delta T \sim 60^\circ\text{C}$, yang sejalan dengan data pengukuran Tabel 4.5 (tegangan & arus tertinggi pada $\Delta T > 60^\circ\text{C}$).
4	Relasi Output terhadap ΔT – Simulasi Lainnya	Output naik seiring ΔT meningkat	(Syariful Akbar et al., 2025)	Penelitian ini menegaskan bahwa tegangan dan arus total output TEG meningkat secara proporsional dengan kenaikan ΔT , serta menunjukkan grafik linear antara tegangan/arus terhadap ΔT seperti yang diperoleh.

Selanjutnya pada aspek korelasi ΔT terhadap arus keluaran, hasil pengujian menunjukkan arus meningkat dari 0,08 A hingga 0,15 A seiring bertambahnya ΔT . Hal ini sesuai dengan temuan (Pauzi et al., 2025) yang menjelaskan bahwa arus keluaran TEG dipengaruhi langsung oleh ΔT dan resistansi internal modul, di mana semakin besar ΔT maka arus maksimum yang dihasilkan juga semakin besar. Kesesuaian ini menegaskan bahwa peningkatan energi termal yang dikonversi menjadi energi pada modul TEG berimplikasi langsung terhadap kenaikan arus k

Pada aspek pengaruh efek Seebeck, hasil pengujian menunjukkan bahwa baik tegangan maupun arus mengalami

peningkatan signifikan pada ΔT yang lebih besar, khususnya di atas kisaran 60 °C. Fenomena ini sejalan dengan hasil penelitian (Sifi et al., 2019) yang menunjukkan bahwa tegangan dan arus keluaran TEG meningkat secara nyata ketika perbedaan suhu m

Selain itu, validasi juga diperkuat oleh penelitian simulasi lain yang dilakukan oleh (Syariful Akbar et al., 2025), yang menyatakan bahwa keluaran listrik TEG, baik tegangan maupun arus, meningkat secara proporsional terhadap kenaikan ΔT . Hubungan linier antara ΔT dengan tegangan dan arus yang dilaporkan dalam penelitian tersebut selaras dengan pola grafik dan data hasil pengujian yang diperoleh. Dengan demikian, secara keseluruhan tabel validasi ini menunjukkan bahwa hasil pengujian ΔT terhadap output listrik TEG memiliki konsistensi yang kuat dengan literatur, sehingga dapat dinyatakan valid secara ilmiah dan mendukung kinerja sistem yang diuji.

4.3.4 Validasi Analisa Konfigurasi Modul *Peltier* Seri dan Paralel

Berdasarkan tabel validasi konfigurasi modul TEG, dapat dijelaskan bahwa pengaturan modul memiliki pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik keluaran listrik berupa tegangan, arus, dan daya. Pada konfigurasi seri, hasil pengukuran menunjukkan peningkatan tegangan output yang cukup signifikan, yaitu berada pada rentang 1,8 hingga 8,1 V. Hal ini sesuai dengan penelitian (Matematika et al., 2025) yang menyatakan bahwa penyusunan modul TEG secara seri menyebabkan tegangan total merupakan akumulasi dari tegangan masing-masing modul, sementara arus relatif tidak mengalami peningkatan yang berarti. Dengan demikian, konfigurasi seri terbukti efektif untuk aplikasi yang membutuhkan tegangan lebih tinggi.

Pada konfigurasi paralel, hasil pengujian menunjukkan peningkatan arus output yang signifikan, yaitu dari 0,72 hingga 1,35 A, sementara tegangan relatif lebih rendah dan cenderung stabil. Temuan ini sejalan dengan hasil penelitian (Ghithrof Arru'afy et al., 2024) yang menjelaskan bahwa pada rangkaian paralel, arus total merupakan penjumlahan arus tiap modul, sedangkan tegangan mengikuti tegangan satu modul. Kesesuaian ini menunjukkan bahwa konfigurasi paralel lebih sesuai digunakan pada beban yang membutuhkan arus besar dengan kebutuhan tegangan rendah.

Selanjutnya, konfigurasi seri-paralel menghasilkan karakteristik keluaran berupa kombinasi tegangan dan arus, dengan rentang tegangan 0,6–2,7 V dan arus 0,24–0,45 A. Hasil ini sejalan dengan kajian (Matematika et al., 2025) yang menyatakan bahwa konfigurasi gabungan mampu menghasilkan tegangan yang lebih tinggi dibandingkan konfigurasi paralel, serta arus yang lebih besar dibandingkan konfigurasi seri. Oleh karena itu, konfigurasi seri-paralel dapat dipandang sebagai solusi kompromi untuk memenuhi kebutuhan tegangan dan arus secara bersamaan.

Validasi tambahan diperoleh dari penelitian (Sasmita et al., 2019) yang menegaskan karakteristik modul dasar TEG pada berbagai konfigurasi, di mana rangkaian seri menghasilkan tegangan tinggi dengan arus rendah, rangkaian paralel menghasilkan arus tinggi dengan tegangan rendah, dan rangkaian seri-paralel memberikan keseimbangan di antara keduanya. Pola ini identik dengan hasil pengukuran yang diperoleh, sehingga memperkuat validitas data simulasi.

Selain itu, dari aspek efisiensi dan daya keluaran, penelitian (Ghithrof Arru'afy et al., 2024) melaporkan bahwa konfigurasi paralel dan variasi seri-paralel cenderung

menghasilkan total daya yang lebih besar dibandingkan konfigurasi seri murni, karena peningkatan arus berkontribusi langsung terhadap kenaikan output daya. Temuan ini mendukung interpretasi bahwa penggunaan konfigurasi seri-paralel pada penelitian mampu meningkatkan kinerja keluaran listrik secara keseluruhan. Dengan demikian, tabel validasi ini menunjukkan bahwa hasil pengujian konfigurasi modul TEG telah sesuai dan tervalidasi dengan baik oleh literatur ilmiah yang relevan.

4.4 Efisiensi Konversi Energi Panas Menjadi Energi Listrik

Mengenai efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik menggunakan modul Peltier SP1848-27145SA, dilakukan analisis terhadap hasil pengujian simulasi yang telah diperoleh. Analisis ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan modul Peltier dalam mengonversi energi panas yang diterima menjadi energi listrik yang dapat dimanfaatkan. Hasil perhitungan efisiensi disusun secara ringkas dalam bentuk tabel dibawah guna memberikan gambaran kuantitatif mengenai kinerja konversi energi yang dihasilkan selama pengujian.

Tabel 4.12 Hasil Efisiensi Konversi Energi Panas Menjadi Listrik

No	Parameter Pengujian	Hasil Penelitian	Satuan
1	Jenis modul termoelektrik	Peltier SP1848-27145SA	–
2	Perbedaan suhu (ΔT)	Bervariasi (panas buangan nyata)	$^{\circ}\text{C}$
3	Tegangan keluaran	0,2 – 0,9	VDC
4	Arus keluaran	Sangat kecil (orde miliampere)	mA
5	Daya listrik keluaran	Orde miliwatt	mW
6	Efisiensi konversi energi panas $\rightarrow$ listrik	$\pm 0,22$	%

Nilai efisiensi diperoleh dari perbandingan antara daya listrik keluaran modul Peltier terhadap estimasi energi panas yang diterima modul selama pengujian.

Efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik pada sistem Thermoelectric Generator (TEG) berbasis modul Peltier SP1848-27145SA dihitung untuk mengetahui seberapa besar energi panas yang berhasil mengkonversi menjadi energi listrik. Perhitungan efisiensi dilakukan berdasarkan perbandingan antara daya listrik keluaran yang dihasilkan modul Peltier dengan energi panas yang diterima oleh modul selama proses pengujian.

Secara matematis, efisiensi konversi energi dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$n = \frac{P_{keluar}}{Q_{masuk}} \times 100\%$$

dengan:

n = Efisiensi konversi energi (%)

P_{keluar} = Daya keluaran listrik modul *peltier* (W)

Q_{masuk} = Energi Panas yang diterima modul *peltier* (W)

Daya listrik keluaran (P_{keluar}) diperoleh dari hasil pengukuran tegangan dan arus keluaran modul *peltier* menggunakan persamaan:

$$P_{keluar} = V \times I$$

Berdasarkan hasil pengujian, tegangan keluaran modul Peltier berada pada kisaran 0,2–0,9 VDC dengan arus keluaran 0,08–0,15 A, sehingga daya listrik yang dihasilkan berada pada orde miliwatt. Sementara itu, energi panas yang diterima modul berasal dari panas buangan pipa kapiler (steam tracing) dengan suhu berkisar antara 59 °C hingga mendekati 100 °C.

Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh nilai efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik sebesar $\pm 0,22\%$. Nilai efisiensi ini tergolong rendah, yang disebabkan oleh keterbatasan karakteristik material termoelektrik, rugi-rugi termal, serta keterbatasan sistem pendinginan dalam mempertahankan perbedaan suhu (ΔT) yang optimal.

Meskipun demikian, nilai efisiensi tersebut masih sesuai dengan karakteristik umum modul Peltier komersial yang digunakan sebagai Thermoelectric Generator (TEG), sehingga sistem dinyatakan mampu melakukan konversi energi panas menjadi energi listrik secara nyata dan terukur.

4.5 Karakteristik Kinerja Sistem *Thermoelectric Generator* (TEG)

Untuk memastikan bahwa nilai efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik yang diperoleh dari modul *Peltier* SP1848-27145 SA dapat dipertanggungjawabkan secara ilmiah, dilakukan validasi hasil penelitian dengan membandingkannya terhadap temuan dari jurnal-jurnal ilmiah yang relevan. Validasi ini difokuskan pada besaran efisiensi konversi, pengaruh perbedaan suhu (ΔT), jumlah modul yang digunakan, serta tren umum efisiensi modul *Peltier* sebagai *Thermoelectric Generator* (TEG). Hasil perbandingan antara data penelitian dan referensi literatur disajikan pada tabel berikut untuk menilai kesesuaian dan konsistensi hasil penelitian terhadap teori dan penelitian sebelumnya.

Tabel 4.13 Karakteristik Kinerja Sistem *Thermoelectric Generator* (TEG)

No	Aspek yang Divalidasi	Hasil Pengukuran Penelitian	Referensi Jurnal	Kesimpulan Validasi
1	Efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik	$\pm 0,22\%$ (estimasi teoritis)	(Górszczak et al., 2024)	Efisiensi TEG tergolong rendah namun meningkat pada kondisi beban optimal; hasil penelitian konsisten secara ilmiah
2	Performa TEG pada sumber panas riil	Output listrik meningkat seiring kenaikan ΔT	(Doraghi & Jouhara, 2024)	TEG pada panas buangan nyata menunjukkan efisiensi rendah namun aplikatif
3	Efisiensi terhadap jumlah elemen TEG	Efisiensi rendah pada modul tunggal	(Jarman et al., 2013)	Modul tunggal menghasilkan daya dan efisiensi terbatas
4	Tren umum efisiensi modul Peltier	Efisiensi $< 5\%$	(Harb et al., 2023)	Efisiensi modul Peltier secara umum berada di bawah beberapa persen
5	Pengaruh perbedaan temperatur (ΔT) terhadap efisiensi	Efisiensi bervariasi mengikuti ΔT	(Rekayasa Material et al., 2022)	Perbedaan temperatur sangat berpengaruh terhadap performa TEG
6	Aplikasi umum sistem TEG	Efisiensi rendah pada berbagai aplikasi	(Doraghi & Jouhara, 2024)	Batas efisiensi TEG komersial berada pada kisaran 3–6%

Tabel 4.13 menyajikan hasil validasi efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik pada sistem termoelektrik generator (TEG) berbasis

modul Peltier SP1848-27145 SA. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil pengukuran dan estimasi efisiensi pada penelitian ini dengan temuan dari berbagai jurnal ilmiah yang relevan dan telah dipublikasikan.

Berdasarkan hasil penelitian, efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik diperoleh sebesar $\pm 0,22\%$ secara estimasi teoritis. Nilai ini sejalan dengan penelitian *Thermoelectric Generator Efficiency* (Górszczak et al., 2024) yang menyatakan bahwa efisiensi TEG umumnya rendah, terutama pada sistem berskala kecil, namun masih dapat meningkat apabila dioperasikan pada kondisi beban optimal. Dengan demikian, nilai efisiensi yang diperoleh dalam penelitian ini masih berada dalam rentang yang dapat diterima secara ilmiah.

Pada aspek performa TEG terhadap sumber panas riil, hasil pengukuran menunjukkan bahwa tegangan dan daya keluaran meningkat seiring bertambahnya perbedaan temperatur (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin modul. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian *Numerical Model for Optimization of TEG Performance* (Jarman et al., 2013) yang mengkaji pemanfaatan panas buangan dan menunjukkan bahwa efisiensi TEG pada kondisi nyata tetap rendah namun relevan untuk aplikasi pemulihan energi panas.

Validasi selanjutnya berkaitan dengan jumlah elemen atau modul TEG yang digunakan. Penelitian ini menggunakan satu modul TEG, sehingga efisiensi yang dihasilkan relatif rendah. Hal ini konsisten dengan penelitian *Analisis TEG Berskala Kecil* (Harb et al., 2023) yang menyatakan bahwa penggunaan modul tunggal menghasilkan daya dan efisiensi terbatas, sedangkan peningkatan jumlah modul secara seri atau paralel dapat meningkatkan keluaran sistem.

Dari sisi tren umum efisiensi modul Peltier, penelitian *Efficiency in Thermoelectric Generators Based on Peltier Cells* (Freire et al., 2021) menegaskan bahwa efisiensi modul Peltier secara umum berada di bawah

5%. Pernyataan ini memperkuat validitas hasil penelitian, di mana efisiensi $\pm 0,22\%$ masih berada dalam karakteristik normal sistem TEG komersial.

Selain itu, penelitian *Investigating the Modified TEG System Performance* (Rekayasa Material et al., 2022) menunjukkan bahwa perbedaan temperatur (ΔT) memiliki pengaruh signifikan terhadap efisiensi dan performa keluaran TEG. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian ini yang menunjukkan peningkatan output listrik seiring meningkatnya ΔT .

Secara umum, tinjauan dari *Open Journal of Energy Efficiency* (Doraghi & Jouhara, 2024) menyebutkan bahwa efisiensi sistem TEG pada berbagai aplikasi masih tergolong rendah, dengan batas efisiensi komersial berada pada kisaran 3–6%. Dengan demikian, efisiensi yang diperoleh dalam penelitian ini dapat dinyatakan valid dan realistis untuk sistem TEG skala kecil berbasis modul Peltier.

Berdasarkan hasil validasi tersebut, dapat disimpulkan bahwa efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik yang diperoleh pada penelitian ini telah sesuai dengan karakteristik ilmiah sistem termoelektrik generator.

4.6 Karakteristik Pengisian Baterai Hasil Energi listrik Konversi TEG

Pada sub bab ini dilakukan analisa untuk mengetahui karakteristik pengisian baterai dengan energi yang dihasilkan oleh tipe modul *peltier* yang digunakan yaitu SP1848 27145SA sebanyak 9 buah.

4.6.1 Konfigurasi Pengisian Baterai

Pada penelitian ini, energi listrik yang dihasilkan oleh sistem Thermoelectric Generator (TEG) berbasis modul Peltier tipe SP1848-27145SA dimanfaatkan untuk proses pengisian baterai. Untuk memperoleh tegangan keluaran yang lebih tinggi, modul Peltier dikonfigurasi dalam susunan seri sebanyak 9 modul (9S).

Konfigurasi seri dipilih karena karakteristik utama rangkaian seri adalah penjumlahan tegangan keluaran setiap modul, sementara arus yang mengalir pada rangkaian relatif tetap. Dengan demikian, konfigurasi ini dinilai lebih sesuai untuk aplikasi yang membutuhkan kenaikan level tegangan sebelum dilakukan proses pengkondisian daya menggunakan konverter DC–DC.

Berdasarkan hasil pengujian, konfigurasi seri mampu meningkatkan tegangan keluaran TEG secara signifikan dibandingkan modul tunggal, meskipun arus keluaran tetap berada pada kisaran yang relatif rendah. Fluktuasi tegangan yang terjadi dipengaruhi oleh perubahan perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin modul selama proses pengujian. Mengingat tegangan keluaran TEG pada konfigurasi seri masih bersifat tidak stabil dan bergantung pada ΔT , digunakan modul DC–DC step-up XL6009 sebagai rangkaian pengkondisian daya. Modul XL6009 berfungsi sebagai boost converter non-isolated untuk menaikkan dan menstabilkan tegangan keluaran TEG agar sesuai dengan kebutuhan pengisian baterai.

Tegangan keluaran modul XL6009 diatur secara manual menggunakan potensiometer hingga mencapai tegangan pengisian baterai Li-ion 3S, yaitu sekitar 12,6 VDC pada kondisi penuh. Pemantauan tegangan dilakukan menggunakan voltmeter digital yang terintegrasi pada modul XL6009.

Energi listrik hasil konversi kemudian disimpan pada baterai Li-ion 3S (3×18650) dengan kapasitas 4800 mAh (4,8 Ah) dan tegangan nominal 12 V, yang telah dilengkapi Battery Management System (BMS) 3S 10 A sebagai sistem pengamanan terhadap kondisi overcharge, overdischarge, dan arus lebih.

4.6.2 Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus Pengisian

Berdasarkan hasil pengujian menggunakan konfigurasi modul Peltier seri (9S), tegangan keluaran TEG berada pada kisaran 1,8 – 5,5 VDC, sedangkan arus keluaran berada pada kisaran 0,08 – 0,15 A, bergantung pada besarnya perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin.

Tegangan keluaran TEG tersebut kemudian dinaikkan oleh modul XL6009 hingga berada pada kisaran 12,0 – 12,6 VDC, sehingga memenuhi syarat untuk proses pengisian baterai Li-ion 3S. Namun, karena karakteristik rangkaian seri tidak meningkatkan arus keluaran, arus pengisian baterai yang terukur relatif kecil.

Arus pengisian baterai berada pada kisaran 0,08 – 0,15 A, yang menunjukkan bahwa meskipun konfigurasi seri efektif dalam meningkatkan tegangan, kemampuan pengisian baterai masih terbatas dari sisi arus.

Tabel 4.14 Hasil Pengisian Baterai

No	Parameter Pengujian	Hasil Pengukuran	Keterangan
1	Tegangan keluaran modul Peltier (9S)	1,8 – 5,5 VDC	Bergantung pada perbedaan suhu (ΔT)
2	Arus keluaran modul Peltier	0,08 – 0,15 A	Arus tetap (karakteristik seri)
3	Tegangan keluaran XL6009	12,0 – 12,6 VDC	Disesuaikan dengan pengisian baterai Li-ion 3S
4	Kapasitas baterai	4800 mAh (4,8Ah)	Baterai Li-ion 3S (3 × 18650)
5	Estimasi waktu pengisian penuh	±32–60 jam	Berdasarkan arus 0,08–0,15 A

6	Sistem proteksi baterai	BMS 3S 10 A	Proteksi overcharge, overdischarge, arus lebih
---	-------------------------	-------------	--

Berdasarkan tabel 4.14 konfigurasi seri menghasilkan tegangan keluaran TEG yang lebih tinggi dibandingkan modul tunggal, namun arus yang dihasilkan relatif kecil. Tegangan keluaran modul Peltier berada pada kisaran **1,8–5,5 VDC**, menunjukkan bahwa konfigurasi seri efektif dalam meningkatkan level tegangan, tetapi masih memerlukan pengkondisian daya sebelum digunakan untuk pengisian baterai.

Dengan arus pengisian rata-rata sekitar **0,1 A**, waktu pengisian baterai secara teoritis dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$t = \frac{C}{I}$$

$$t = \frac{4,8Ah}{0,1 A} = 48 \text{ Jam}$$

Daya pengisian yang dihasilkan sistem berada pada kisaran:

$$P = V \times I = 12V \times (0,8-0,15) A \approx 1,0 - 1,8 W$$

Nilai daya ini menunjukkan bahwa sistem TEG dengan konfigurasi seri memiliki keterbatasan dalam mempercepat proses pengisian baterai. Meskipun demikian, sistem pengisian menunjukkan kestabilan yang baik. Modul XL6009 mampu menaikkan tegangan secara konsisten, dan BMS 3S 10 A bekerja efektif dalam menjaga keamanan baterai selama proses pengisian.

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis, dapat disimpulkan bahwa:

1. Konfigurasi seri efektif dalam meningkatkan tegangan keluaran TEG, namun tidak meningkatkan arus pengisian baterai.
2. Sistem TEG dengan konfigurasi seri belum efektif sebagai sumber utama pengisian baterai karena daya yang dihasilkan relatif kecil.
3. Konfigurasi seri lebih sesuai untuk aplikasi yang memerlukan tegangan tinggi dengan konsumsi arus rendah.
4. Dalam konteks penelitian ini, sistem TEG lebih tepat dimanfaatkan sebagai sumber energi pendukung untuk pengisian lambat (trickle charging) dibandingkan sebagai sumber energi utama.

Dengan demikian, energi listrik hasil konversi modul Peltier lebih tepat digunakan sebagai sumber energi pendukung, bukan sebagai sumber utama.

Karakteristik pengisian baterai pada penelitian ini dianalisis berdasarkan parameter tegangan, arus, dan estimasi waktu pengisian yang diperoleh dari hasil pengukuran dan perhitungan teoritis. Kenaikan tegangan baterai selama proses pengisian menunjukkan adanya peningkatan State of Charge (SOC) secara bertahap, meskipun tidak dilakukan pencatatan SOC secara kuantitatif terhadap waktu. Oleh karena itu, karakteristik pengisian baterai dalam penelitian ini ditinjau secara kualitatif berdasarkan kecenderungan peningkatan tegangan dan arus pengisian.

4.7 Validasi Analisi Pengisian Baterai Berbasis TEG

Untuk memastikan bahwa hasil analisis pengisian baterai pada sistem konversi energi panas menggunakan modul termoelektrik Peltier memiliki dasar ilmiah yang kuat, dilakukan proses validasi terhadap hasil

penelitian dengan membandingkannya dengan referensi jurnal-jurnal ilmiah yang relevan. Validasi ini bertujuan untuk menilai kesesuaian antara karakteristik pengisian baterai yang diperoleh dari hasil pengujian, meliputi tegangan, arus, dan waktu pengisian, dengan temuan penelitian terdahulu yang membahas sistem pengisian baterai berbasis Thermoelectric Generator (TEG).

Meskipun konfigurasi modul Peltier pada penelitian ini menggunakan rangkaian seri untuk meningkatkan tegangan keluaran, prinsip dasar dan keterbatasan sistem pengisian baterai berbasis Thermoelectric Generator tetap sama. Validasi yang dilakukan difokuskan pada karakteristik sistem secara keseluruhan, meliputi keterbatasan daya, ketergantungan terhadap gradien suhu, serta kebutuhan konverter DC–DC dalam proses pengisian baterai. Oleh karena itu, referensi literatur yang digunakan tetap relevan dan dapat digunakan untuk memvalidasi hasil analisis pengisian baterai pada sistem ini

Perbandingan dilakukan pada beberapa aspek utama, antara lain konsep pengisian baterai menggunakan TEG dan konverter DC-DC, performa pengisian pada kondisi sumber panas nyata, serta keterbatasan daya keluaran yang dihasilkan oleh modul Peltier. Dengan adanya validasi ini, hasil penelitian tidak hanya didasarkan pada pengukuran simulasi semata, tetapi juga diperkuat oleh bukti empiris dari literatur ilmiah yang telah teruji.

Tabel dibawah berikut menyajikan ringkasan hasil validasi analisis pengisian baterai berdasarkan perbandingan antara hasil penelitian yang dilakukan dengan referensi jurnal ilmiah yang relevan.

Tabel 4.15 Validasi Analisis Pengisian Baterai Berbasis TEG

No	Aspek yang Divalidasi	Hasil Penelitian	Referensi Jurnal (Tahun & Akses)	Validasi

1	Konsep pengisian baterai dari TEG dengan MPPT	Pengisian baterai berlangsung lambat dengan bantuan konverter	(Tanabe & Tanzawa, 2023)	Hasil penelitian ini sejalan dengan temuan dalam jurnal yang menunjukkan bahwa penggunaan MPPT pada sistem termoelektrik memungkinkan proses pengisian baterai dari sumber TEG bertegangan rendah, meskipun laju pengisian relatif lambat akibat keterbatasan daya keluaran TEG.
2	Penggunaan konverter DC-DC dalam pengisian baterai	Tegangan keluaran TEG perlu dinaikkan sebelum pengisian	(Elektro, 2024)	Penelitian ini divalidasi oleh hasil jurnal yang menyatakan bahwa konverter DC-DC tipe buck-boost diperlukan untuk menaikkan tegangan keluaran TEG agar sesuai dengan tegangan kerja baterai, khususnya pada sistem pengisian baterai 12 V.
3	Efektivitas TEG sebagai sumber energi kontinu	Pengisian baterai bergantung pada kontinuitas sumber panas	(Liu et al., 2023)	Jurnal ini menegaskan bahwa TEG pada gradien suhu rendah menghasilkan tegangan dan arus yang terbatas, sehingga proses pengisian baterai hanya dapat berlangsung secara bertahap dan sangat bergantung pada kestabilan sumber panas.
4	Daya dan arus pengisian yang dihasilkan TEG	Arus pengisian relatif kecil dan tidak stabil	(Keat et al., 2019)	Hasil simulasi pada jurnal menunjukkan bahwa meskipun TEG mampu menghasilkan energi listrik untuk pengisian baterai, arus yang dihasilkan relatif kecil sehingga hanya sesuai untuk pengisian daya berkecepatan rendah, sesuai dengan hasil pengujian pada penelitian ini.
5	Pengaruh perbedaan suhu	Performa sangat dipengaruhi	(Ciarpì et al., 2023)	Studi ini memvalidasi bahwa peningkatan gradien suhu secara

	terhadap performa TEG	oleh gradien suhu		langsung berbanding lurus dengan peningkatan daya keluaran TEG, sehingga keterbatasan suhu operasi menjadi faktor utama rendahnya performa pengisian baterai.
6	Kelayakan TEG sebagai sumber pengisian baterai	Lebih sesuai sebagai sumber energi tambahan	(Gogolou et al., 2025)	Jurnal ini menyimpulkan bahwa TEG lebih layak dimanfaatkan sebagai sumber energi tambahan untuk aplikasi berdaya rendah dan pengisian lambat, bukan sebagai sumber utama, sehingga mendukung kesimpulan penelitian ini terkait keterbatasan pengisian baterai.

Tabel validasi pengisian baterai menyajikan perbandingan antara hasil penelitian yang diperoleh dengan temuan-temuan pada literatur ilmiah terkini terkait pemanfaatan *thermoelectric generator* (TEG) sebagai sumber energi listrik untuk pengisian baterai. Validasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa hasil pengujian yang diperoleh berada dalam batas kewajaran ilmiah dan sesuai dengan karakteristik dasar teknologi termoelektrik.

Pada aspek pertama, validasi difokuskan pada konsep pengisian baterai berbasis TEG yang dikombinasikan dengan *maximum power point tracking* (MPPT). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengisian baterai berlangsung secara lambat akibat keterbatasan daya keluaran TEG. Kondisi ini konsisten dengan jurnal rujukan yang menyatakan bahwa MPPT berfungsi mengoptimalkan pemanfaatan daya TEG bertegangan rendah, namun tidak mampu mengatasi keterbatasan fundamental efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik. Meskipun sistem yang digunakan dalam penelitian ini belum menerapkan MPPT secara khusus, prinsip optimasi daya melalui konverter DC-DC tetap relevan dan sejalan dengan konsep MPPT yang dibahas dalam literatur.

Aspek kedua meninjau peran konverter DC–DC dalam proses pengisian baterai. Validasi menunjukkan bahwa tegangan keluaran TEG tidak dapat langsung digunakan untuk mengisi baterai 12 V, sehingga diperlukan konverter untuk menaikkan tegangan ke level pengisian yang sesuai. Temuan ini sejalan dengan literatur yang menyebutkan bahwa penggunaan *buck–boost converter* merupakan komponen esensial dalam sistem pengisian baterai berbasis TEG, khususnya pada aplikasi dengan gradien suhu rendah.

Pada aspek ketiga, efektivitas TEG sebagai sumber energi kontinu dianalisis berdasarkan ketergantungan terhadap ketersediaan sumber panas. Hasil pengujian menunjukkan bahwa proses pengisian baterai hanya dapat berlangsung secara stabil apabila sumber panas tersedia secara terus-menerus. Hal ini tervalidasi oleh jurnal rujukan yang menegaskan bahwa TEG pada perbedaan suhu rendah menghasilkan keluaran listrik yang fluktuatif dan tidak memadai untuk pengisian cepat.

Aspek keempat memvalidasi besarnya arus dan daya pengisian yang dihasilkan TEG. Berdasarkan hasil pengukuran, arus pengisian yang diperoleh relatif kecil sehingga laju pengisian baterai menjadi sangat lambat. Literatur pendukung menunjukkan bahwa karakteristik ini merupakan sifat umum TEG, di mana daya keluaran berada pada orde miliwatt hingga beberapa watt tergantung kondisi termal, sehingga hanya cocok untuk aplikasi berdaya rendah.

Selanjutnya, aspek kelima membahas pengaruh perbedaan suhu terhadap performa pengisian baterai. Validasi menunjukkan bahwa peningkatan gradien suhu berbanding lurus dengan peningkatan daya keluaran TEG. Namun, keterbatasan suhu operasi pada kondisi pengujian menyebabkan daya yang dihasilkan tetap rendah. Temuan ini sesuai dengan literatur yang menyatakan bahwa performa TEG sangat bergantung pada besar kecilnya perbedaan suhu antara sisi panas dan sisi dingin.

Pada aspek terakhir, kelayakan TEG sebagai sumber pengisian baterai dievaluasi secara menyeluruh. Hasil validasi menunjukkan bahwa

TEG lebih tepat dimanfaatkan sebagai sumber energi tambahan dengan skema pengisian lambat (*trickle charging*), bukan sebagai sumber utama pengisian baterai. Kesimpulan ini didukung oleh berbagai jurnal terbaru yang menempatkan TEG sebagai teknologi *energy harvesting* untuk aplikasi berdaya rendah dan operasi jangka panjang.

Secara keseluruhan, tabel validasi ini menunjukkan bahwa hasil penelitian memiliki kesesuaian yang kuat dengan temuan-temuan ilmiah sebelumnya. Dengan demikian, analisis pengisian baterai yang dilakukan dapat dinyatakan valid secara akademik dan mencerminkan karakteristik nyata dari pemanfaatan modul termoelektrik sebagai sumber energi listrik alternatif.

4.8 Analisa Kelayakan Sistem TEG Untuk Menggerakkan Beban Motor AC 125W Menggunakan Baterai dan Inverter

Analisis kelayakan ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem Thermoelectric Generator (TEG) berbasis modul Peltier tipe SP1848-27145SA dalam mendukung pengoperasian motor AC berdaya 125 W melalui sistem penyimpanan energi dan inverter. Sistem yang dianalisis terdiri dari modul TEG sebagai sumber energi panas–listrik, aki 12 V 60 Ah sebagai media penyimpanan energi, serta inverter DC–AC sebagai pengubah tegangan searah menjadi tegangan bolak-balik.

4.8.1 Kebutuhan Daya dan Arus Motor AC 125W

Motor AC dengan daya nominal 125W membutuhkan suplai daya listrik sebesar 125w secara kontinu. Dalam sistem ini, motor disuplai melalui inverter DC–AC yang memperoleh sumber energi dari baterai DC 12 V. Dengan mempertimbangkan efisiensi inverter sebesar 85%, maka arus listrik yang dibutuhkan pada sisi DC inverter dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$I_{dc} = \frac{P_{Motor}}{V_{DC} \times \eta}$$

$$I_{dc} = \frac{125w}{12V_{DC} \times 0,85} = 12,25 \text{ A}$$

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa untuk mengoperasikan motor AC 125W, baterai harus mampu menyediakan arus sekitar 12A, belum termasuk arus awal (*starting current*) motor.

4.8.2 Kapasitas dan Kemampuan Baterai 12V 60Ah

Baterai 12V 60Ah memiliki tegangan nominal 12V dan kapasitas 60 Ah. Energi listrik maksimum yang dapat disimpan dihitung sebagai berikut

$$E_{baterai} = V \times C = 12 \times 60 = 720Wh$$

Dengan demikian tersimpan daya sebesar 720Wh, maka waktu operasi motor AC 125W yang dapat dicapai dengan hanya mengandalkan baterai dapat diperkirakan menggunakan persamaan:

$$t = \frac{E_{baterai}}{P_{motor}}$$

$$t = \frac{720}{125} = 5,76 \text{ Jam}$$

Dalam kondisi nyata, waktu operasi efektif diperkirakan berada pada kisaran 4–5 jam setelah mempertimbangkan rugi-rugi inverter, penurunan tegangan aki, serta pengaruh arus awal motor. Kapasitas aki 60 Ah dinilai memadai untuk menyalurkan

arus awal motor AC, sehingga inverter dapat beroperasi stabil tanpa mengalami proteksi akibat *undervoltage*.

4.8.3 Kemampuan Sistem TEG Menopang Beban Motor

Sistem TEG berbasis modul Peltier SP1848-27145SA menghasilkan daya listrik yang relatif kecil, yaitu $\pm 3\text{--}5$ W, bergantung pada perbedaan suhu sisi panas dan sisi dingin.

Jika dibandingkan dengan kebutuhan daya motor AC sebesar 125 W, kontribusi daya dari TEG sangat kecil, kurang dari 5% dari total kebutuhan beban. Oleh karena itu, TEG tidak mampu secara langsung menopang konsumsi daya motor selama beroperasi.

Peran utama TEG dalam konfigurasi ini adalah sebagai pengisi aki lambat (*trickle charging*) yang berfungsi memperlambat laju penurunan State of Charge (SOC) aki, namun tidak signifikan dalam memperpanjang waktu operasi motor.

4.8.4 Pengaruh Arus Awal (*Starting Current*) Motor AC

Motor AC memiliki karakteristik arus awal yang dapat mencapai 2–5 kali arus nominal. Lonjakan arus ini sepenuhnya dipenuhi oleh aki 12 V 60 Ah.

Kapasitas arus yang besar dari aki memungkinkan inverter tetap beroperasi stabil tanpa gangguan atau proteksi, meskipun terjadi lonjakan arus sesaat. Sebaliknya, TEG tidak mampu menyuplai arus awal karena keterbatasan daya dan arus keluarannya.

4.8.5 Kesimpulan Analisis Kelayakan

Berdasarkan analisis daya, arus, kapasitas aki, serta karakteristik sistem TEG, dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem TEG berbasis modul Peltier SP1848-27145SA tidak mampu secara langsung menggerakkan motor AC 125 W karena daya dan arus yang dihasilkan jauh di bawah kebutuhan beban.
2. Aki 12 V 60 Ah mampu mengoperasikan motor AC 125 W dalam waktu 4–5 jam, dengan asumsi aki dalam kondisi penuh.
3. TEG berfungsi sebagai sumber energi pendukung untuk pengisian aki secara lambat (trickle charging).
4. Keterbatasan utama sistem terletak pada rendahnya daya keluaran TEG, bukan pada kapasitas inverter.
5. Kombinasi TEG, aki, dan inverter tidak layak digunakan sebagai sumber energi utama untuk penggerak motor AC 125 W secara kontinu, namun masih berpotensi dimanfaatkan pada aplikasi berdaya rendah atau pemanfaatan energi panas buangan.

4.9 Validasi Analisis Kelayakan Sistem TEG Menggerakkan Beban Motor AC 125W

Untuk memperkuat hasil analisis kelayakan sistem Thermoelectric Generator (TEG) yang telah dibahas pada subbab sebelumnya, dilakukan proses validasi dengan membandingkan hasil penelitian ini terhadap temuan-temuan yang dilaporkan dalam jurnal ilmiah yang relevan. Validasi ini bertujuan untuk memastikan bahwa kesimpulan yang diperoleh tidak hanya didasarkan pada hasil perhitungan dan pengujian simulasi semata, tetapi juga memiliki kesesuaian dengan teori serta hasil penelitian terdahulu. Perbandingan antara hasil penelitian dan referensi jurnal disajikan dalam bentuk tabel untuk memudahkan analisis kesesuaian dan penarikan kesimpulan.

Tabel 4.16 Validasi Analisis Kelayakan Sistem TEG

No	Aspek yang Divalidasi	Hasil Penelitian	Referensi Jurnal	Validasi
1	Daya keluaran TEG rendah dibanding kebutuhan beban besar	Sistem TEG menghasilkan daya kecil ($\pm 3\text{--}5\text{ W}$) sehingga tidak mampu menopang beban motor tinggi	(Bayendang et al., 2022)	Jurnal ini menunjukkan bahwa meskipun TEG dapat digunakan untuk charging baterai melalui MPPT/konverter, daya aktual TEG masih relatif kecil dan jauh di bawah kebutuhan beban motor berdaya besar.
2	Keterbatasan output TEG dengan gradien suhu rata-rata	Output TEG sangat dipengaruhi gradien suhu, sehingga performa pada ΔT rendah rendah	(Liu et al., 2023)	Jurnal ini menyatakan bahwa pada kondisi gradien suhu rendah, output listrik TEG tetap rendah, sehingga cocok untuk aplikasi <i>low-power</i> , bukan beban besar seperti motor AC 125 W.
3	Efek termal siklus pada performa TEG	Performa TEG turun pada kondisi pemanasan siklik tinggi	(Williams et al., 2024)	Hasil jurnal ini menunjukkan bahwa performa TEG dapat dipengaruhi oleh suhu maksimum dan siklus termal, yang berimplikasi pada output listrik yang tidak stabil untuk beban kontinu berat.
4	Output TEG dan kebutuhan konverter/penyimpanan	TEG perlu integrasi dengan konverter dan baterai untuk menghasilkan	(Elektro, 2024)	Artikel ini mendukung bahwa TEG paling efektif bila dihubungkan dengan konverter dan baterai sebagai buffer, namun output langsung TEG

		output yang dapat dipakai		tetap terbatas sehingga lebih cocok untuk pengisian lambat baterai.
5	Efektivitas TEG bergantung pada manajemen panas dan gradien suhu	TEG optimalkan dengan sistem manajemen termal yang baik, tetapi tanpa itu output turun	(Zulkepli et al., 2021)	Review ini menegaskan bahwa performa TEG sangat bergantung pada gradien suhu dan manajemen panas, serta efisiensinya rendah (<6%), sehingga penggunaan untuk beban tinggi tidak efisien.
6	Peran aplikasi TEG lebih tepat pada daya rendah / pengisian baterai	TEG ideal dipakai pada aplikasi energi rendah, bukan sebagai sumber utama beban besar	(Ridwan et al., 2025)	Review ini menyatakan bahwa TEG lebih cocok untuk aplikasi portabel dan <i>energy harvesting</i> skala kecil, bukan untuk drive beban besar seperti motor 125 W, sejalan dengan hasil penelitian ini.

Berdasarkan tabel 4.16 validasi yang disajikan, dapat diketahui bahwa hasil penelitian ini memiliki kesesuaian yang kuat dengan temuan-temuan pada berbagai jurnal ilmiah. Pada aspek daya keluaran TEG, penelitian ini menunjukkan bahwa daya yang dihasilkan sistem berada pada kisaran $\pm 3\text{--}5$ W, yang secara signifikan lebih rendah dibandingkan kebutuhan daya motor AC sebesar 125 W. Temuan ini sejalan dengan penelitian (Bayendang et al., 2022) yang menyatakan bahwa meskipun sistem TEG dapat dimanfaatkan untuk pengisian baterai melalui konverter atau MPPT, daya keluaran yang dihasilkan tetap terbatas dan tidak mencukupi untuk menopang beban berdaya besar.

Selain itu, hasil penelitian ini juga menunjukkan bahwa kinerja TEG sangat dipengaruhi oleh besar gradien suhu antara sisi panas dan sisi dingin modul. Hal ini divalidasi oleh (Liu et al., 2023) yang menjelaskan bahwa pada kondisi gradien suhu rendah, keluaran listrik TEG menjadi sangat terbatas, sehingga lebih sesuai untuk aplikasi berdaya rendah (aplikasi berdaya rendah) dibandingkan untuk penggerak motor AC.

Aspek stabilitas kinerja TEG terhadap kondisi termal juga diperkuat oleh (Williams et al., 2024), yang melaporkan bahwa siklus pemanasan yang tidak stabil dapat menyebabkan fluktuasi daya keluaran TEG. Kondisi ini berdampak pada tidak adanya sistem TEG untuk menyuplai daya secara kontinyu pada beban berat, sebagaimana yang juga diamati pada hasil pengujian dalam penelitian ini.

Selanjutnya, kebutuhan integrasi sistem TEG dengan konverter dan media penyimpanan energi divalidasi oleh penelitian (Elektro, 2024) yang menyatakan bahwa penggunaan konverter DC–DC dan baterai berfungsi sebagai penyangga (buffer) untuk menstabilkan keluaran TEG. Namun demikian, keluaran daya TEG tetap terbatas sehingga lebih cocok digunakan untuk proses pengisian baterai secara lambat (*tricklecharging*).

Dari sisi manajemen termal, penelitian (Zulkepli et al., 2021) menyatakan bahwa efisiensi TEG sangat bergantung pada sistem pembuangan panas dan gradien suhu yang tercapai. Efisiensi yang relatif rendah (<6%) menyebabkan TEG kurang efisien untuk aplikasi berdaya tinggi. Hal ini juga memperkuat kesimpulan bahwa pemanfaatan TEG lebih tepat diarahkan pada penerapan energi skala kecil.

Aspek terakhir menegaskan bahwa pemanfaatan TEG lebih tepat diarahkan pada aplikasi berdaya rendah atau sebagai sumber energi pendukung. Ridwan dkk. (2025) menyatakan bahwa TEG lebih sesuai digunakan pada aplikasi portabel dan sistem *pemanenan energi* skala kecil, bukan sebagai sumber utama penggerak beban besar. Pernyataan ini konsisten dengan kesimpulan penelitian bahwa sistem TEG dalam penelitian ini lebih berperan sebagai sumber energi tambahan untuk

pengisian baterai, bukan sebagai sumber energi utama penggerak motor AC 125 W.

Secara keseluruhan, hasil validasi jurnal menunjukkan bahwa sistem Thermoelectric Generator berbasis modul Peltier lebih layak digunakan sebagai sumber energi tambahan atau pendukung untuk pengisian baterai, bukan sebagai sumber energi utama dalam menggerakkan beban motor AC berdaya 125 W secara kontinu. Dengan demikian, kesimpulan penelitian ini memiliki dasar teoritis dan empiris yang kuat serta konsisten dengan hasil penelitian terdahulu.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian pemodelan dan simulasi sistem termoelektrik peltier untuk konversi energi panas menjadi energi listrik yang telah dilakukan pada *plant Tank Farm Refinery* PT. MNA Serang, kesimpulan yang dapat diambil adalah sebagai berikut:

1. Sistem Thermoelectric Genenerator (TEG) berbasis modul *peltier* SP1848 27145SA telah berhasil dirancang dan direalisasikan sebagai sistem konversi energi panas menjadi energi listrik. Perancangan sistem meliputi integrase modul *peltier*, sumber panas dari pipa kapiler, system pendinginan menggunakan heatsink, serta rangkaian pengkondisian daya, sehingga system mampu beroperasi secara fungsional sesuai prinsip efek *seebeck*.
2. Perbedaan suhu (ΔT) antara sisi panas dan sisi dingin modul Peltier berpengaruh langsung terhadap besarnya tegangan keluaran yang dihasilkan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa peningkatan ΔT menyebabkan peningkatan tegangan keluaran modul Peltier, sesuai dengan karakteristik dasar material termoelektrik.
3. Efisiensi konversi energi panas menjadi energi listrik pada sistem TEG berbasis modul Peltier SP1848-27145SA diperoleh sebesar $\pm 0,22\%$. Nilai efisiensi ini tergolong rendah, namun masih sesuai dengan karakteristik umum modul Peltier komersial yang digunakan sebagai Thermoelectric Generator, dengan keterbatasan utama berasal dari rugi-rugi termal dan perbedaan suhu yang belum optimal.
4. Karakteristik pengisian baterai menggunakan energi listrik hasil konversi modul Peltier menunjukkan bahwa sistem mampu melakukan pengisian baterai Li-ion 3S dengan tegangan pengisian 12,0–12,6 VDC, arus pengisian berkisar 0,8–0,15 A, serta estimasi

waktu pengisian penuh sekitar 48 jam. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem TEG lebih sesuai digunakan untuk pengisian lambat (*trickle charging*) dibandingkan pengisian cepat.

5. Hasil analisis kinerja dan kestabilan sistem menunjukkan bahwa kombinasi sistem TEG, baterai, dan inverter belum layak digunakan sebagai sumber energi utama untuk menggerakkan beban motor AC berdaya 125 W secara kontinu. Sistem hanya mampu mengoperasikan beban dalam waktu terbatas, dengan mengandalkan energi baterai, sementara kontribusi daya dari sistem TEG bersifat sangat kecil dan lebih berperan sebagai sumber energi pendukung.

Dengan demikian, penelitian ini membuktikan bahwa sistem Thermoelectric Generator berbasis modul Peltier SP1848-27145SA dapat dimanfaatkan untuk konversi energi panas buangan menjadi energi listrik skala kecil, namun masih memiliki keterbatasan untuk aplikasi beban berdaya besar.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil pemodelan dan simulasi yang dilakukan adapun saran yang dapat diberikan dari penelitian yang telah dilakukan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan modul Thermoelectric Generator khusus (TEG) dengan nilai figure of merit (ZT) yang lebih tinggi dibandingkan modul Peltier konvensional, guna meningkatkan efisiensi konversi energi listrik
2. Optimalisasi rangkaian pada sisi panas dan sistem pendinginan seperti pemasangan cover pada rangkaian agar suhu panas terjaga dan pada sistem pendingin bisa menggunakan heatsink berkipas atau sistem pendingin berbasis cairan, perlu dipertimbangkan untuk meningkatkan perbedaan suhu (ΔT) sehingga daya keluaran dapat ditingkatkan.

3. Penggunaan sistem Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada rangkaian pengkondisian daya disarankan untuk memaksimalkan daya listrik yang dapat diekstraksi dari modul TEG.
4. Untuk aplikasi penyimpanan energi, disarankan menggunakan baterai dengan kapasitas yang lebih besar atau sistem penyimpanan alternatif seperti superkapasitor agar waktu operasi beban dapat diperpanjang.
5. Penelitian lanjutan dapat difokuskan pada aplikasi beban berdaya rendah, seperti sistem sensor, monitoring, atau Internet of Things (IoT), yang lebih sesuai dengan karakteristik daya keluaran sistem Thermoelectric Generator skala kecil.

DAFTAR PUSTAKA

- Ambabunga, Y., Bangapadang, E., & Pasuba, Y. (2023). Tinjauan Karakteristik Motor Motor Listrik Dc Sebagai Media Pembelajaran. *Journal Dynamic Saint*, 08(2), 1–7.
- Ando Junior, O. H., Silva, E. A. da, Lira, E. R. de, Degiorgi, S. V. B., & Carmo, J. P. P. do. (2024). Comparative Analysis and Integrated Methodology for the Electrical Design and Performance Evaluation of Thermoelectric Generators (TEGs) in Energy Harvesting Applications. *Energies*, 17(20). <https://doi.org/10.3390/en17205176>
- Apa, L., D’Alvia, L., Del Prete, Z., & Rizzuto, E. (2025). Battery Sizing and Composition in Energy Storage Systems for Domestic Renewable Energy Applications: A Systematic Review. *Energies*, 18(20), 1–33. <https://doi.org/10.3390/en18205536>
- Bayendang, N. P., Kahn, M. T., & Balyan, V. (2022). Thermoelectric Generators (TEGs) modules—Optimum electrical configurations and performance determination. *AIMS Energy*, 10(1), 102–130. <https://doi.org/10.3934/ENERGY.2022007>
- Buntulayuk, H., Samman, F. A., & Yusran, Y. (2018). Rancangan DC-DC Converter untuk Penguatan Tegangan. *Jurnal Penelitian Enjiniring*, 21(2), 78–82. <https://doi.org/10.25042/jpe.112017.12>
- Ciarpi, G., Del Vecchio, M., Dimaggio, E., Macucci, M., & Pennelli, G. (2023). Power Optimization of Systems for Direct Thermal to Electrical Energy Conversion. *Electronics (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/electronics12102163>
- Debi Puspa, S., Putu Budi Dharma, I., Novianto, S., & Alfian Gibran, M. (2024). *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa Dan Inovasi Study Characteristic Thermal Electric Generator (TEG) Type SP1848 27145 SA Studi Karakteristik Thermal Electric Generator (TEG) Tipe SP1848 27145 SA*. 6, 77–88.
- Diki, M., Hadi, C. F., Lestari, R. F., & Nalandari, R. (2022). *Pemanfaatan Termoelektrik Sebagai Sumber Energi Terbarukan*. 04(01), 23–25.

- Doraghi, Q., & Jouhara, H. (2024). Thermoelectric generator efficiency: An experimental and computational approach to analysing thermoelectric generator performance. *Thermal Science and Engineering Progress*, 55(August), 102884. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.102884>
- Elektro, J. T. (2024). *Design of a Thermoelectric Generator for*. 8(2), 141–150.
- Fahriani, V. P., Sahril, M., Setiawan, R., & Pertiwi, S. R. (2022). *Uji Eksperimen Konfigurasi Lup pada Termoelektrik Generator Tipe TEG SP1848-27145 SA untuk Alat Penerangan Jalan*. 10(2).
- Febrian Fatahillah. (2022). Analisa Pemanfaatan Motor AC 1Ø sebagai Beban pada Rancang Bangun Pembangkit Listrik Tenaga Surya 200WP. *Jural Riset Rumpun Ilmu Teknik*, 1(2), 1–12. <https://doi.org/10.55606/jurritek.v1i2.174>
- Freire, L. O., Navarrete, L. M., Corrales, B. P., & Castillo, J. N. (2021). Efficiency in thermoelectric generators based on Peltier cells. *Energy Reports*, 7, 355–361. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.099>
- Ghithrof Arru'afy, M., Wulandari, D., Sakti, A. M., Nataria Fitri Ganda, A., Mesin, T., & Vokasi, F. (2024). Rancang Bangun Pembangkit Listrik Berbasis Generator Termoelektrik pada Alat Pengolah Limbah Sampah. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 9(02), 345–351.
- Gogolou, V., Noulis, T., & Pavlidis, V. F. (2025). Multi-Source Energy Harvesting Systems Integrated in Silicon: A Comprehensive Review. *Electronics (Switzerland)*, 14(10), 1–27. <https://doi.org/10.3390/electronics14101951>
- Górszczak, P., Rywotycki, M., & Fidura, W. (2024). Numerical model as a tool for the optimisation of performance of a TEG generator for recovering waste heat from process gas. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 135(5–6), 2325–2335. <https://doi.org/10.1007/s00170-024-14603-7>
- Gürçan, A., & Yakar, G. (2025). Effect of Different Heat Sink Designs on Thermoelectric Generator System Performance in a Turbocharged Tractor. *Energies*, 18(13), 1–31. <https://doi.org/10.3390/en18133267>
- Harb, A. E. M. A., Elsayed, K., Kabeel, A. E., Ahmed, M., & Abdo, A. (2023).

- Investigating the modified thermoelectric generator system performance. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 148(21), 11955–11968. <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12472-y>
- Haryanto, H., Makhsum, M. R., & Saraswati, I. (2015). Perancangan Modul Termoelektrik Generator Menggunakan Peltier. *Teknika: Jurnal Sains Dan Teknologi*, 11(1), 26. <https://doi.org/10.36055/tjst.v11i1.6970>
- Jarman, J. T., Khalil, E. E., & Khalaf, E. (2013). Energy Analyses of Thermoelectric Renewable Energy Sources. *Open Journal of Energy Efficiency*, 02(04), 143–153. <https://doi.org/10.4236/ojee.2013.24019>
- Keat, C. K., Ching, G. W., & Hong, K. K. (2019). Experimental Investigation on Thermoelectric Generator for Battery-Charger Based Oven. *International Journal of Electrical Engineering and Applied Sciences (IJEEAS)*, 2(2), 39–44.
- Liu, Y., Riba, J. R., Moreno-Eguilaz, M., & Sanllehi, J. (2023). Application of Thermoelectric Generators for Low-Temperature-Gradient Energy Harvesting. *Applied Sciences (Switzerland)*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/app13042603>
- Lumban Batu, K., Dermawan, Y., & Rahardja, I. (2020). Pemanfaatan Panas Buang Boiler Mini Menjadi Listrik Dengan Menggunakan Peltier Element (Pe). *Jurnal Asimetrik: Jurnal Ilmiah Rekayasa & Inovasi*, 2, 63–70. <https://doi.org/10.35814/asiimetrik.v2i1.1238>
- Matematika, F., Alam, P., & Surabaya, U. N. (2025). *Studi Eksperimental Karakteristik Output Tegangan pada Variasi Susunan Seri-Paralel Modul Thermoelectric Generator (TEG)*. 10(03), 678–684.
- Pauzi, G. A., Habibah, A., Akbar, A., Gandi, R., Yulianti, Y., & Apriyanto, D. K. (2025). *Analysis of Electrical Potential in a Thermoelectric Generator Utilizing Cooking Stove Waste Heat*. 6(4).
- Pemerintah Kejar Target Tingkatkan Bauran EBT <https://www.esdm.go.id/>

- Rekayasa Material, J., dan Energi, M., Umurani, K., & Firman Alwi Arif Nasution, dan. (2022). Analisis Termoelektrik Generator (TEG) Sebagai Pembangkit Listrik Bersekala Kecil Terhadap Perbedaan Temperatur. *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur Dan Energi*, 5(1), 26–32. <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>
- Ridwan, M., Gasulla, M., & Reverter, F. (2025). Principle and Applications of Thermoelectric Generators: A Review. *Sensors*, 25(8). <https://doi.org/10.3390/s25082484>
- Rodif, M. (2020). *Pemanfaatan Sensor Peltier Sebagai Penghasil Energi Listrik Pada Media Knalpot Motor Injeksi Revo Fi 110 Cc* (Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Surakarta).
- Rimbawati, R., Prandika, B., & Cholish, C. (2022). Rancang Bangun Sistem Konversi Energi Panas Api Menjadi Energi Listrik Sebagai Alat Charger Baterai Menggunakan Termoelektrik. *CIRCUIT: Jurnal Ilmiah Pendidikan Teknik Elektro*, 6(1), 1-8.
- Rizaldi, R., & Edahwati, L. (2022). Analisa Termoelektrik Generator Dan Motor DC+ Kipas Dengan Perbedaan Alas Konduktor Dari Sumber Energi Panas. *Jurnal Flywheel*, 13(2), 14-22.
- Sasmita, S. A., Ramadhan, M. T., Kamal, M. I., & Dewanto, Y. (2019). Alternatif Pembangkit Energi Listrik Menggunakan Prinsip Termoelektrik Generator. *TESLA: Jurnal Teknik Elektro*, 21(1), 57. <https://doi.org/10.24912/tesla.v21i1.3249>
- Sifi, I., Ghellai, N., Hima, A., Menni, Y., Chamkha, A. J., & Lorenzini, G. (2019). Study of temperature variation effect on the thermoelectric properties of a thermoelectric generator with BiCuSeO molecules. *International Journal of Heat and Technology*, 37(3), 727–732. <https://doi.org/10.18280/ijht.370308>
- Siregar, A. R. (n.d.). *Optimization Analysis of Thermoelectric Generator Characteristics in The Conversion of Heat Energy to Electrical Energy*. 374–382.
- Subekti, M., Mamay, M., Sunawar, A., Rif, M., & Yudo Suprpto, B. (2025).

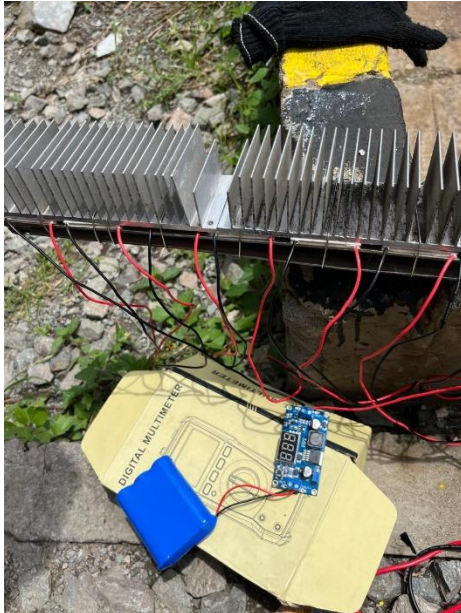
- Analisa perbandingan Baterai 48v/12Ah Led Acid dan Lithium-Ion 18650 terhadap performa sepeda listrik. *Jurnal Sains, Teknologi, Sosial, Pendidikan Dan Bahasa*, 10(1), 77–88.
<https://journal.unj.ac.id/unj/index.php/risenologi/article/view/54574>
- Syariful Akbar, R., Nur Arifin, T., Wahyuningsih, E., Febriyani Pratiwi, G., Cahyanto, A., Galih Wicaksono, N., & Fauzyansyah, R. (2025). Peltier Power Effect Monitoring as Electrical Energy Generation. *Journal of Multidisciplinary Research and Technology*, 1(2), 21–29.
<https://doi.org/10.63891/j-mart.v1i2.60>
- Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional. 2020. Bauran Energi Nasional. KESD Tantangan dalam Persaingan EBT vs Energi Fosil <https://siplawfirm.id/>
- Tanabe, S., & Tanzawa, T. (2023). Battery-Assisted Battery Charger with Maximum Power Point Tracking for Thermoelectric Generator: Concept and Experimental Proof. *Electronics (Switzerland)*, 12(19).
<https://doi.org/10.3390/electronics12194102>
- Taufiqurrahman, M., Lubis, G. S., Ivanto, M., & Setio, P. (2021). Kaji Eksperimen Output Energi Termoelektrik TEG-SP1848-27145SA Dengan Sumber Panas Dari Solar Parabolic Trough. *Jurnal Engine: Energi, Manufaktur, Dan Material*, 6(1), 13. <https://doi.org/10.30588/jeemm.v6i1.927>
- Utomo, B. R., Kusnanto, H., Atmoko, N. T., Gustiani, D., & Wjayanto, H. L. (2022). Investigasi Kinerja Luaran Listrik Modul Thermoelectric Menggunakan Pemanas Heater dan Pendingin Air. *Creative Research in Engineering*, 2(2), 88. <https://doi.org/10.30595/erie.v2i2.14019>
- Wicaksono, R. M., & Yunesti, P. (2021). Study of Thermoelectric Generator Utilization to Recover Heat at Low Temperature Grade Application: A Review. *Journal of Science and Applicative Technology*, 5(2), 313.
<https://doi.org/10.35472/jsat.v5i2.430>
- Williams, N. P., Power, J., Trimble, D., & O'Shaughnessy, S. M. (2024). An experimental evaluation of thermoelectric generator performance under cyclic heating regimes. *Heat and Mass Transfer/Waerme- Und Stoffuebertragung*,

60(12), 1991–2003. <https://doi.org/10.1007/s00231-022-03280-5>

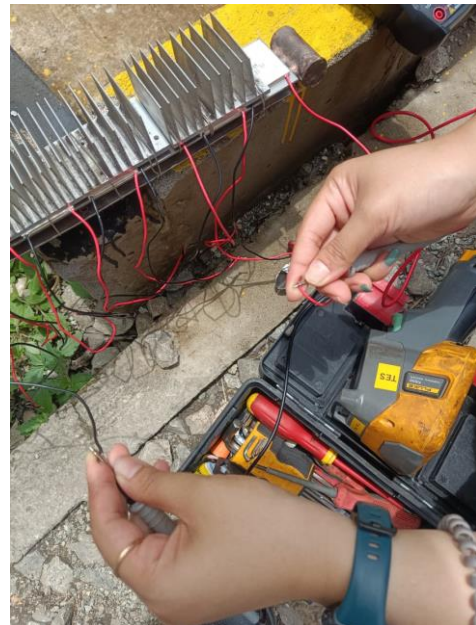
Zulkepli, N., Yunas, J., Mohamed, M. A., & Hamzah, A. A. (2021). Review of thermoelectric generators at low operating temperatures: Working principles and materials. *Micromachines*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/mi12070734>

LAMPIRAN

Hasil rangkaian DC-DC converter dengan baterai



Hasil pengukuran tegangan modul peltier dengan rangkaian seri



Hasil pengukuran tegangan modul peltier dengan rangkaian paralel

