

BUKU AJAR

MODUL TERMoeLEKTRIK

TEORI & APLIKASI

Dr. Ir. Irwin Bizzy, M.T.

Tentang Penulis



Irwin Bizzy. Lahir di Belinyu Bangka, 28 Mei 1960, merupakan anak kedua dari Abubakar bin Umar dan Nurainah binti Abdul Cholik. Menyelesaikan pendidikan di Sekolah Dasar Negeri 1 Belinyu, SMP Negeri Belinyu, SMA YPN Belinyu, dan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Pada tahun 1993, melanjutkan studi S2 bidang konversi energi di ITB Bandung (tamat tahun 1996) dan ikut beasiswa program riset di Toyohashi University of Technology di Jepang pada tahun 1996-1997. Pada tahun 2014, melanjutkan studi S3 di Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor di Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya (tamat tahun 2019). Sejak lulus S1 bekerja di perusahaan swasta dan kemudian menjadi dosen Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya hingga sekarang. Selain mengajar, pernah ditugaskan sebagai wakil direktur Baliteks Unsri (2001 - 2004), Kepala Bidang Fisra Bappeda SPM (2004 - 2005) dan Kepala Bappeda SPM Kabupaten Bangka Tengah Provinsi Kepulauan Bangka Belitung (2006 -2011), Staf ahli bidang energi di Balitbangnovda Provinsi Sumatera Selatan (2014-2018), anggota Dewan Riset Daerah (DRD) Provinsi Sumatera Selatan (2018 - 2020), Ketua Himpunan Peneliti Indonesia (HIMPENINDO) Provinsi Sumatera Selatan (2019 - 2024), dan menjadi konsultan bidang Rekayasa Teknik dan Audit Energi di berbagai perusahaan.

Menikah dengan Nurhayati tahun 1989 dan dikarunia tiga anak, yaitu Irvan Putra alumnus Universiti Utara Malaysia (UUM), Radifa Cendana Putri alumnus Osaka Sogo College of Design (Jepang) dan Osaka University of Arts (Jepang), dan Irsyadi Surya Putra (mahasiswa Universitas Bina Darma Palembang).



Penerbit dan Percetakan

NoerFikri

0812 2323 2690 / 0711-366625

noerfikri@gmail.com

Palembang-Indonesia

ISBN 978-602-447-854-4



9 786024 478544

BUKU AJAR
MODUL TERMOELEKTRIK
TEORI & APLIKASI

Dr. Ir. Irwin Bizzy, M.T.



**Dilarang memperbanyak, mencetak, menerbitkan
sebagian maupun seluruh buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit**

Ketentuan Pidana
Kutipan Pasal 72 Undang-undang Republik Indonesia
Nomor 19 Tahun 2002 Tentang Hak Cipta

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan sebagaimana dimaksud dalam pasal 2 ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana dengan pidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp. 1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 5.000.000,00 (lima juta rupiah).
2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta atau hak terkait sebagaimana dimaksud pada ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

BUKU AJAR
MODUL TERMOELEKTRIK
TEORI & APLIKASI

Penulis : Dr. Ir. Irwin Bizzy, M.T.
Layout : Nyimas Amrina Rosyada
Desain Cover : Radifa Cendana Putri

Hak Penerbit pada **Noer Fikri Offset**
Anggota IKAPI (No. 012/SMS/13)

Dicetak oleh:
CV. Amanah
Jl. Mayor Mahidin No. 142
Telp/Fax : 366 625
Palembang – Indonesia 30126
E-mail : noerfikri@gmail.com

Cetakan I : Maret 2022
16,25 x 25 cm
x, 73 hlm

Hak Cipta dilindungi undang-undang pada penulis
All right reserved

ISBN : 978-602-447-854-4

KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah SWT, Shalawat dan Salam semoga tetap terlimpah kepada Nabi Muhamad SAW, keluarga, sahabat dan seluruh umatnya hingga akhir zaman.

Pembaca yang budiman, buku ini dihadirkan di hadapan Anda dengan judul “Termoelektrik” (teori dan aplikasi). Termoelektrik merupakan sebuah modul yang dapat menghasilkan panas dan dingin pada permukaan-permukaannya ketika dialirkan arus listrik kepada modul ini. Sebaliknya, bila kedua sisi modul menerima panas dan dingin akan menghasilkan listrik. Termoelektrik merupakan hasil dari penemuan efek Seebeck pada tahun 1821 oleh *Thomas Seebeck* yang merupakan seorang ahli fisika dari Jerman dan efek Peltier pada tahun 1834 oleh *Jean Peltier* yang merupakan seorang ahli yang berprofesi sebagai pembuat jam. Penemuan ini sangat bermanfaat bagi ilmuwan untuk mengembangkan pengkondisian udara atau *Air Conditioning* (AC) yang hemat energi dan ramah lingkungan memakai modul *Thermoelectric Cooler* (TEC). Selain itu, modul termoelektrik ini juga mampu memanfaatkan energi dalam bentuk panas sisa yang kadang terbuang ke atmosfer dan lainnya untuk dijadikan listrik, dinamakan *Thermoelectric Generator* (TEG).

Buku ajar ini sengaja disusun dengan bahasa yang sederhana agar memudahkan untuk mempelajarinya, khususnya bagi mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Buku ajar ini terdiri dari teori dan aplikasi langsung dalam permesinan, khususnya Kelompok Bidang Keahlian (KBK) Konversi Energi.

Semoga buku ajar ini dapat memberikan manfaat bagi mahasiswa dan para peneliti dalam pengembangan ilmu pengetahuan, khususnya pengembangan modul termoelektrik.

Ucapan terima kasih penulis sampaikan kepada semua pihak yang telah membantu terselesaikannya penulisan buku ini.

Penulis,

Dr. Ir. Irwin Bizzy, M.T.

DAFTAR ISI

	Halaman
Halaman Judul.....	i
Kata Pengantar.....	iii
Daftar Isi.....	iv
Daftar Gambar.....	v
Daftar Tabel.....	viii
Daftar Notasi dan Simbol.....	ix
BAB 1 Pendahuluan.....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan.....	3
BAB 2 Dasar-Dasar Termoelektrik.....	5
2.1 Umum.....	5
2.2 Modul Termoelektrik.....	8
2.3 Material.....	10
2.4 <i>Heatsink</i>	12
BAB 3 <i>Thermoelectric Generator</i>.....	25
3.1 Modul TEG sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan.....	26
3.2 Modul TEG untuk Kendaraan Hibrid.....	28
3.3 Modul TEG untuk Mengecaskan <i>Mobile Phone</i>	32
3.4 Modul TEG dengan <i>Loop Heat Pipe</i>	34
3.5 Modul TEG untuk Memanfaatkan Gas Buang.....	35
3.6 Modul TEG pada Mesin Diesel.....	36
BAB 4 <i>Tehrmoelectric Cooler</i>.....	41
4.1 Aplikasi Modul TEC pada Kotak Pendingin.....	45
4.2 Aplikasi Modul TEC di Kendaraan.....	46
BAB 5 Kotak Pendingin Mini.....	57
5.1 Pendahuluan.....	57
5.2 Rancang Bangun Kotak Pendingin.....	58
5.3 Data Pengukuran.....	59
5.4 Hasil Penelitian.....	60
Daftar Pustaka.....	68
Indeks.....	71
Daftar Kata Penting.....	73

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1 Pengukuran Temperatur Memanfaatkan Efek Seebeck	5
2.2 Struktur Termoelektrik	6
2.3 Rangkaian yang dipakai untuk mendefinisikan koefisien-koefisien termoelektrik	7
2.4 Modul termoelektrik	9
2.5 Pengukuran nilai ZT berdasarkan temperatur untuk beberapa komposisi material SnTe	12
2.6 <i>Heatsink</i>	13
2.7 Proses perpindahan kalor konduksi dan konveksi	14
2.8 Penggunaan sirip untuk meningkatkan perpindahan kalor dari dinding bidang. (a) Permukaan tanpa sirip. (b) Permukaan bersirip	15
2.9 Balans energi permukaan yang diperluas	16
2.10 Balans energi permukaan yang diperluas	17
2.11 Proses perpindahan kalor konduksi dan konveksi pada sirip	19
3.1 Diagram blok aplikasi modul TEG untuk pembangkit tenaga	27
3.2 Hasil pengukuran tegangan dan arus ke luar dari modul TEG dengan beban bervariasi	28
3.3 Struktur pembangkit daya Modul TEG	30
3.4 Skema peralatan pengujian (a) Pemasangan termokopel untuk pengambilan data temperatur pada saluran buang kendaraan bermotor, (b) Grafik hasil pengujian temperatur dan waktu	31
3.5 Modul TEG rangkaian seri dan parallel	32
3.6 Skema pengujian TEG di saluran gas buang sepeda motor	33
3.7 Sistem pendingin <i>heatsink</i> dan <i>heat pipe</i>	33
3.8 (a) Efek temperatur terhadap tegangan dan arus pada keadaan mesin <i>idle</i> (b) Efek temperatur terhadap tegangan dan arus pada keadaan mesin <i>running</i>	34
3.9 Diagram TEG dengan MPPT	35
3.10 Diagram TEG dengan Nmppt	35
3.11 Set up peralatan uji pada mesin diesel	37
3.12 Skematik modul TEG pada Mesin diesel	38

3.13	Karakteristik arus dan tahanan listrik pada sumber temperatur tinggi (150°C dan 200 °C) dan temperatur rendah (80 °C dan 120 °C)	39
3.14	Karakteristik tegangan, tahanan listrik pada sumber temperatur tinggi (150 °C dan 200 °C) dan temperatur rendah (80 °C dan 120 °C)	39
3.15	Karakteristik daya dan tahanan listrik pada sumber temperatur tinggi (150 °C dan 200 °C) dan temperatur rendah (80 °C dan 120 °C)	39
4.1	COP Carnot dan modul termoelektrik.....	41
4.2	Mesin Pendingin Termoelektrik Sederhana.....	42
4.3	Komponen TEC.....	44
4.4	Modul TEC berpasangan.....	44
4.5	Skema desain kotak pendingin dengan monitoring temperatur dengan Arduino Uno	45
4.6	(a) Diagram skematik TEAC udara-ke-cair <i>Gentherm</i> dan (b) skema sel unit.....	46
4.7	Kurva COP lawan daya masukan dengan estimasi dan eksperimen TEAC	47
4.8	Kurva daya pendingin dan masukan lawan arus listrik	47
4.9	Daya Pendingin, Masukan Daya, COP Lawan Rasio Geometrik G_e (Attar et al., 2014)	48
4.10	(a) Skema TEAC udara-ke-udara dan (b) skema sel satuan.....	48
4.11	Skema peralatan kotak pendingin dengan modul TEC.....	49
4.12	Desain kotak pendingin.....	50
4.13	Skema perangkat uji	51
4.14	Rangkaian paralel dan seri modul termoelektrik	51
4.15	Penurunan temperatur air minuman kaleng dengan rangkaian seri dan paralel.....	52
4.16	Modul TEC bertingkat	53
4.17	Variasi (a) distribusi temperatur, (b) laju perpindahan kalor, (c) Tegangan, jumlah tingkat modul TEC	55
4.18	Variasi fluks kalor target pendinginan dengan aplikasi pada arus dan geometri satu dan multi tingkat modul TEC	56
5.1	Rancang bangun kotak pendingin	59
5.2	Skema peralatan uji dan pengambilan data uji kotak pendingin	59
5.3	Arduino Mega 2560.....	60
5.4	Grafik temperatur dan waktu pendinginan air.....	60
5.5	Grafik temperatur dan waktu pendinginan udara	62

5.6	Grafik temperatur dan waktu pendinginan air dan udara	62
5.7	Grafik beda temperatur permukaan sisi panas dan dingin terhadap waktu modul TEC	63
5.8	Grafik beda temperatur dan daya	65
5.9	COP dan daya listrik masuk TEC air dan TEC udara	65
5.10	Perbandingan antara data eksperimen dan simulasi pada beda temperatur (a) konsumsi daya TEC, (b) COP pemanasan.....	67

DAFTAR TABEL

	Halaman
2.1 Distribusi Temperatur dan Rugi-Rugi Kalor di Sirip dengan Penampang Rata	23
3.1 Kondisi tes peralatan uji	37
4.1 Sifat-sifat TEC dan Kondisi-Kondisi Perencanaan Sistem..	55
5.1 Pengaruh Beda Temperatur (beban) terhadap Tegangan Listrik	64

DAFTAR NOTASI DAN SIMBOL

α_{ab}	: Koefisien Seebeck
π_{ab}	: Koefisien Peltier
η	: Efisiensi (%)
τ	: Koefisien Thomson
A_c	: Luas penampang sirip (m^2)
COP	: <i>Coefficient of Performance</i>
H	: Koefisien perpindahan kalor konveksi ($W/m^2.K$)
I	: Arus listrik (A)
K	: Konduktivitas termal bahan ($W/m.K$)
P	: Keliling (m)
Q	: Laju pendinginan (W)
R	: Tahanan Listrik (Ohm) atau (Ω)
ΔT	: Beda temperatur ($^{\circ}C$)
T_h	: Temperatur sisi panas modul TEC ($^{\circ}C$)
T_b	: Temperatur permukaan dasar sirip ($^{\circ}C$)
T_c	: Temperatur sisi dingin modul TEC ($^{\circ}C$)
TE	: <i>Thermoelectric</i>
TEC	: <i>Thermoelectric cooler</i>
TEG	: <i>Thermoelectric generator</i>
Q_h	: Laju perpindahan kalor/daya pemanasan sisi panas modul TEC (W)
Q_c	: Laju perpindahan kalor/daya pendinginan sisi dingin modul TEC (W)
Q_{in}	: Daya listrik yang dialirkan ke modul TEC (W)
V	: Tegangan Listrik (V)
ZT	: <i>Figure of merit</i>

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Manusia merupakan makhluk yang diciptakan oleh Allah SWT yang paling sempurna. Adapun yang membedakan kesempurnaan manusia dengan makhluk-makhluk lainnya adalah manusia memiliki akal. Allah SWT membekali akal bagi manusia untuk keberlangsungan hidupnya agar tercipta suasana yang kondusif, manusia sebagai wakil Tuhan di bumi (*Khalifah fil-ard*) dengan misi 'kasih sayang bagi seluruh alam' (*Rahmatan lil'alamin*). Untuk itu, dengan bekal akal yang telah diberikan-Nya, manusia dituntut untuk mengembangkannya, yaitu dengan jalan mencari ilmu pengetahuan. Sabda-sabda Rasul Nabi Muhammad SAW memprioritaskan umatnya untuk mencari ilmu syar'i (ilmu yang diturunkan oleh Allah SWT kepada Rasul-Nya berupa keterangan dan petunjuk) demi pembentukan sikap dan prilaku yang mengandung unsur akhlak yang terpuji (*Akhlakul Karimah*). Penjelasan tentang manusia agar senantiasa berfikir dan mengembangkan ilmu pengetahuannya terdapat dalam QS Al-Baqarah (2:164), terjemahannya, 'Sesungguhnya dalam penciptaan langit dan bumi, pergantian malam dan siang, kapal yang berlayar di laut dengan (muatan) yang bermanfaat bagi manusia, apa yang diturunkan Allah dari langit berupa air, lalu dengan itu dihidupkan-Nya bumi setelah mati (kering) dan Dia sebarkan di dalamnya bermacam-macam binatang, dan perkisaran angin dan awan yang dikendalikan antara langit dan bumi; (semua itu) sungguh merupakan tanda-tanda (kebesaran Allah) bagi orang-orang yang mengerti.'

Allah telah menjadikan bukti-bukti sebagai pertanda wujud dan ketuhanan-Nya bagi mereka yang mau mempergunakan akalnya untuk berpikir. Bukti-bukti tersebut sangat banyak, diantaranya adalah langit yang tampak, bintang-bintang yang beredar padanya secara teratur tidak saling mendahului maupun bertabrakan, yang sebagiannya memancarkan cahaya bagi alam ini.

Berdasarkan kebesaran Allah SWT tersebut, manusia telah memanfaatkan teknologi di alam untuk terus dikembangkan dengan cepat dan demikian pula mengenai isu pemanasan global. Pemanasan global telah menjadi acuan negara-negara maju untuk terus mengembangkan teknologi yang ramah lingkungan, dan kemajuan negara maju ini dalam mengembangkan teknologi ramah lingkungan memiliki dampak pula kepada negara-negara miskin dan berkembang, yaitu ketergantungan teknologi yang ramah lingkungan kepada negara maju. Sebagian besar negara miskin dan berkembang masih memanfaatkan sumber daya alam dari fosil yang tidak ramah lingkungan untuk menghasilkan listrik dan kenyataannya teknologi yang digunakan untuk menghasilkan listrik tersebut masih konvensional dan belum semuanya ramah lingkungan. Sebagai contoh, batubara dibakar untuk menghasilkan listrik akan tetapi menghasilkan juga karbon dioksida dan unsur lainnya dari hasil pembakaran tersebut yang dapat merusak lingkungan hidup dan ini telah menjadi isu untuk menekan negara miskin dan berkembang bahwa listrik yang dihasilkan belum ramah lingkungan. Demikian pula, pendingin udara atau dikenal dengan *Air Conditioning* atau AC yang sebagian masih memakai refrigeran tidak ramah lingkungan sehingga negara industri maju menciptakan refrigeran yang ramah lingkungan dan kembali semua negara tidak terkecuali negara miskin dan berkembang harus mematuhi aturan yang telah disepakati untuk menggunakan refrigeran yang ramah lingkungan.

Berdasarkan uraian ini, terlihat adanya penjajahan dari negara kaya ke negara miskin secara tidak langsung dengan cara memanfaatkan teknologi dan ekonomi untuk terus menekan semua negara, terutama negara miskin dan berkembang yang lambat mengikuti perkembangan dan berinovasi sendiri untuk menciptakan teknologi baru yang ramah lingkungan. Negara miskin dan berkembang selalu tergantung kepada negara-negara maju yang terus mengembangkan teknologi ramah lingkungan. Bukan itu saja, selain teknologi ramah lingkungan juga hemat energi. Di era pengembangan energi baru terbarukan atau EBT di Indonesia masih memanfaatkan teknologi dari luar khususnya negara maju sehingga ketergantungan akan teknologi ini terus saja berlangsung, khususnya teknologi material yang digunakan untuk merancang teknologi itu sendiri. Pengembangan riset masih belum dioptimalkan oleh pemerintah negara miskin dan berkembang, mengingat pengembangan utama masih kepada infrastruktur-infrastruktur utama seperti jalan, jembatan yang tentunya membutuhkan biaya yang besar dan juga kadangkala

masih menggunakan teknologi luar. Sampai kapan ketergantungan teknologi dan ekonomi ini terus berlangsung, tidak ada batas waktu kecuali sumber daya manusia di negara miskin dan berkembang diberdayakan dari sekarang dengan bantuan kebijakan riset yang mumpuni dari pemerintah.

Untuk itu, modul termoelektrik ini adalah salah satu upaya pengembangan teknologi yang berorientasi kepada ramah lingkungan dan hemat energi. Panas sisa yang selalu terbuang dapat dimanfaatkan dengan modul ini untuk menghasilkan listrik dan sebaliknya arus listrik bila dialirkan kepada modul ini dapat menghasilkan beda temperatur pada permukaan modul sisi panas dan dingin sehingga dapat menghasilkan pendinginan udara yang ramah lingkungan dan hemat energi, bahkan permukaan sisi panasnya dapat digunakan untuk mengeringkan atau mengurangi kadar air yang ada dalam produk-produk pertanian, obat-obatan, dan lainnya. Bahkan dengan kemajuan bidang transportasi yang mulai menggunakan baterai untuk menghasilkan listrik, justru modul ini dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan pendinginan udara di kendaraan yang hemat energi. Selain itu, kelebihan lainnya dari modul ini adalah ringan, kompak, dan tidak bersuara.

1.2. Tujuan

Adapun tujuan penulisan buku ajar ini adalah dengan harapan dalam proses pembelajaran mahasiswa mampu mempelajari modul termoelektrik baik teori maupun aplikasinya di bangku kuliah, mendukung penelitian dalam pembuatan tugas akhirnya, dan di dunia kerja nanti setelah mahasiswa menyelesaikan studinya dapat cepat beradaptasi dengan lingkungan kerjanya. Diharapkan pula, mahasiswa mampu mengembangkan modul termoelektrik ini untuk diaplikasikan ke peralatan-peralatan di industri, mengingat teknologi di masa depan selalu dikaitkan dengan murah, ringan, hemat energi dan ramah lingkungan.

BAB 2

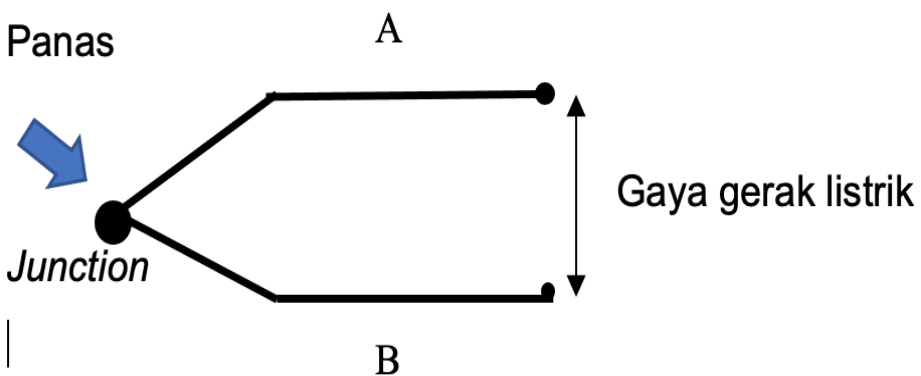
DASAR-DASAR TERMOELEKTRIK

2.1. Umum

Pada tahun 1834, seorang bernama *Jean Peltier* dengan keahlian sebagai pembuat jam dan merupakan seorang ilmuwan dari negara Perancis yang telah menemukan sesuatu pada bagian arus listrik melalui persimpangan atau *junction* dua konduktor yang berbeda dalam arah tertentu dapat menghasilkan sebuah efek pendingin. Penemuan ini telah mengubah pola pikir konvensional menjadi sebuah metode baru untuk menghasilkan sebuah mesin pendingin atau mesin refrigerasi.

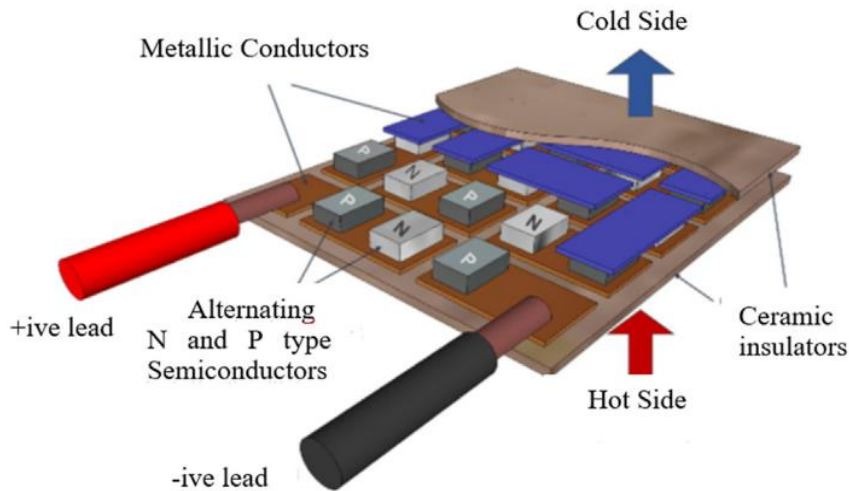
Adapun eksperimen Peltier ini mengikuti eksperimen *Thomas Seebeck* yang pada tahun 1821 menemukan gaya gerak listrik yang dapat dihasilkan dengan cara memanaskan sambungan dua logam yang berbeda. Efek Seebeck dan Efek Peltier saling terkait satu sama lain dalam pengembangan modul termoelektrik.

Selanjutnya, pengukuran temperatur dapat dilakukan dengan memanfaatkan Efek Seebeck ini sebagaimana dijelaskan pada gambar 1.1.



Gambar 2.1 Pengukuran Temperatur Memanfaatkan Efek Seebeck

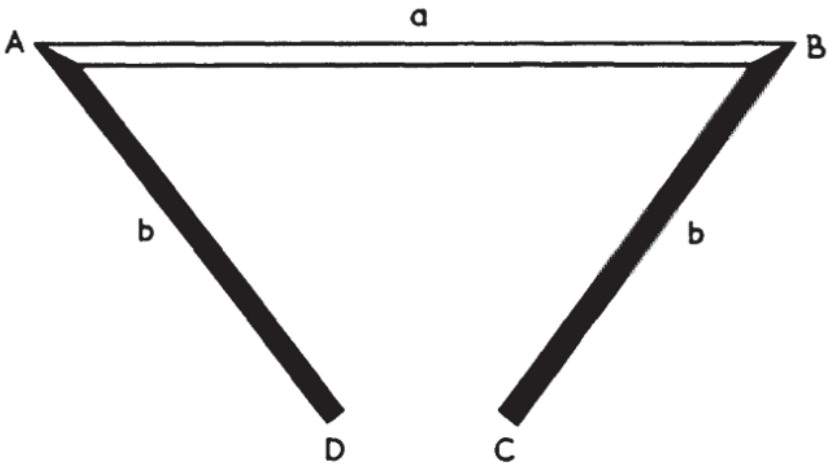
Apabila *Junction* menyentuh sumber panas, ujung-ujung logam A dan B akan menghasilkan gaya gerak listrik (ggl) yang dapat dibaca pada bagian keluaran di monitor peralatan ukur tegangan listrik atau *Multimeter* baik secara manual maupun digital.



Gambar 2.2 Struktur Termoelektrik (Andhale et al., 2021)

Selanjutnya, berdasarkan kedua efek ini telah dikembangkan peralatan berupa modul termoelektrik dengan penjelasan pada gambar 2.2. Listrik DC positif dan negatif dialirkan ke modul termoelektrik yang memiliki semikonduktor tipe N dan P yang diletakkan pada konduktor-konduktor logam (*Metallic Conductors*) akan menghasilkan permukaan sisi panas (*Hot Side*) dan sisi dingin (*Cold Side*) dari modul termoelektrik. Modul termoelektrik ini dilapisi bahan isolator berupa keramik (*ceramic insulators*). Modul termoelektrik ini dinamakan juga *Thermoelectric Cooler* (TEC). Sebaliknya, apabila permukaan sisi panas dan dingin ditempatkan ke bagian peralatan mesin yang memiliki temperatur yang cukup tinggi akan menghasilkan listrik. Modul ini dinamakan *Thermoelectric Generator* (TEG).

Sebuah rangkaian sederhana yang terdiri dari dua konduktor dengan *junction* A dan B (gambar 2.3). Asumsi pertama, perbedaan temperatur antara titik A dan B sehingga gaya gerak listrik terbuka V dikembangkan antara C dan D.



Gambar 2.3 Rangkaian yang Dipakai untuk Mendefinisikan Koefisien-Koefisien Termoelektrik (Goldsmid & F.Inst.P, 1964)

Koefisien Seebeck atau dinamakan juga sebagai *Thermoelectric Power* dirumuskan pada persamaan (2-1).

$$\alpha_{ab} = \frac{V}{\Delta T} \quad (2-1)$$

Jika baterai dipasang pada C dan D, sebuah arus I akan mengalirir rangkaian tersebut. Apabila hasilnya adalah laju pemanasan q pada *junction* A, kemudian laju pendinginan yang sama q pada *junction* B. Koefisien Peltier ditunjukkan pada persamaan (2-2).

$$\pi_{ab} = \frac{q}{I} \quad (2-2)$$

Menariknya, sebuah koefisien Thomson untuk salah satu konduktor, selain arus I juga ada beda temperatur dT/dx yang mengarah ke laju pemanasan atau pendinginan dq/dx per satuan panjang, sebagaimana dijelaskan pada persamaan (2-3).

$$\tau = \frac{dq/dx}{I dT/dx} \quad (2-3)$$

Thomson telah memperoleh dua persamaan, yang dikenal dengan hubungan Kelvin dan menghubungkan tiga koefisien termoelektrik, dengan menerapkan hukum pertama dan kedua termodinamika secara sederhana pada sirkuit termoelektrik. Dengan asumsi sistem ini dapat balik dan T adalah temperatur absolut.

Untuk konduktor tunggal dijelaskan pada persamaan (2-4) dan seterusnya.

$$\pi_{ab} = \alpha_{ab} T \quad (2-4)$$

$$\tau_a - \tau_b = T \frac{d\alpha_{ab}}{dT} \quad (2-5)$$

Penyederhanaan dalam penulisan untuk konduktor tunggal:

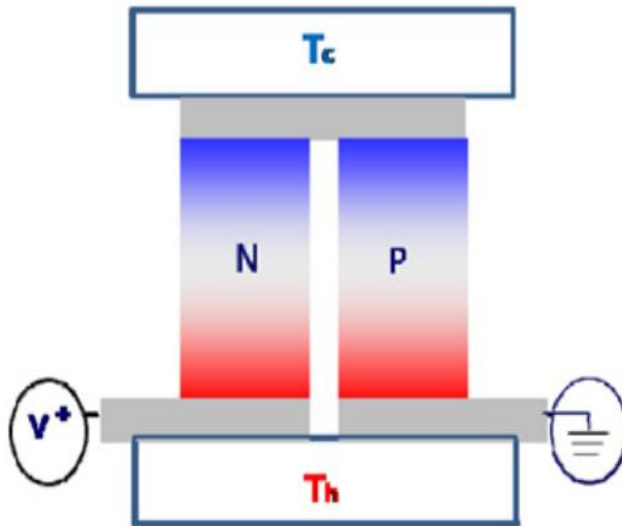
$$\tau = T \frac{d\alpha}{dT} \quad (2-6)$$

2.2. Modul Termoelektrik

Modul termoelektrik terdiri dari semikonduktor tipe p, semikonduktor tipe n, dan tembaga untuk menghubungkan kedua semikonduktor tersebut. Kebanyakan semikonduktor yang digunakan adalah *Bismuth Telluride* (Mani, 2016). Pengembangan material semikonduktor terus dilakukan untuk menghasilkan unjuk kerja yang lebih baik.

Sebagaimana diuraikan sebelumnya bahwa Modul termoelektrik terdiri dari *Thermoelectric Cooler* (TEC) dan *Thermoelectric Generator* (TEG). Modul TEC mengutamakan kerja arus listrik, ketika arus listrik dialirkan ke semikonduktor tipe n, kalor diserap dan ditransportasikan ke sisi panas. Modul TEC juga sering dinamakan berdasarkan fungsinya sebagai motor. Sedangkan, modul TEG berfungsi sebagai generator yang dapat menghasilkan listrik, apabila dua logam yang berbeda diberi panas atau beda temperatur.

Skema modul termoelektrik ditunjukkan pada gambar 2.4. Arus I dialirkan ke modul akan menghasilkan beda temperatur, permukaan sisi dingin adalah T_c dan permukaan sisi panas T_h .



Gambar 2.4 Modul Termoelektrik (Wang, Crane, & Lagrandeur, 2010)

Modul termoelektrik ini berfungsi sebagai pompa kalor. Daya listrik yang dialirkan ke modul Q_{in} akan menghasilkan daya pendinginan sebesar Q_c pada sisi dingin dan daya pemanasan sisi panas sebesar Q_h . Persamaan balans energinya ditunjukkan pada persamaan (2-7).

$$Q_h = Q_c + Q_{in} \quad (2-7)$$

Asumsi yang dipilih adalah T_c dan T_h adalah konstan, sifat-sifat material modul termoelektrik adalah konstan, dan tidak ada rugi-rugi kalor pada bagian-bagian yang saling terhubung satu sama lain, sehingga daya pendinginan dan pemanasan, dan daya masukan ditunjukkan pada persamaan (2-8), (2-9), dan (2-10), dengan α adalah koefisien Seebeck, R adalah tahanan listrik, K adalah konduktivitas termal, dan $\Delta T = T_h - T_c$.

$$Q_c = \alpha T_c I - 0,5 I^2 R - K \Delta T \quad (2-8)$$

$$Q_h = \alpha T_h I + 0,5 I^2 R - K \Delta T \quad (2-9)$$

$$Q_{in} = \alpha I \Delta T + I^2 R \quad (2-10)$$

Sebuah parameter penting untuk mengukur unjuk kerja sistem TE adalah *Coefficient of Performance* (COP) yang merupakan rasio

keluaran termal yang diinginkan terhadap masukan daya pada TE. Keluaran yang diinginkan dapat berupa daya pendingin Q_c ketika menginginkan keluarannya berupa proses pendinginan dan daya pemanas ketika menginginkan keluarannya berupa proses pemanasan.

Apabila kedua sisi persamaan (2-7) dibagi dengan Q_{in} dihasilkan persamaan (2-5).

$$Q_h/Q_{in} = Q_c/Q_{in} + Q_{in}/Q_{in}$$

$$COP_h = COP_c + 1 \tag{2-11}$$

Berdasarkan persamaan (2-11) menunjukkan TE pemanas dapat memiliki $COP > 1$, yakni TE pemanas dapat menghasilkan daya pemanas lebih besar dibandingkan dengan daya listrik yang digunakannya (masukan daya listrik ke TE).

Untuk pendinginan, COP maksimum dapat ditentukan berdasarkan persamaan (2-8) dan (2-10), hasilnya ditunjukkan pada persamaan (2-12).

$$COP_{maks} = \frac{T_c}{\Delta T} \left[\frac{M-1-\frac{\Delta T}{T_c}}{M+1} \right] \tag{2-12}$$

$$M = \sqrt{1 + ZT_{rata-rata}} \tag{2-13}$$

$ZT_{rata-rata} = 0,5 (T_h + T_c)$, dan Z adalah *figure of merit* dari bahan TE. Sebagai contoh, untuk pemanasan dan pendinginan yang menggunakan material Bi_2Te_3 (*Bismuth Telluride*), nilai ZT adalah 1,0 pada temperatur ruang.

2.3. Material Termoelektrik

Meskipun perangkat termoelektrik memiliki banyak keunggulan dibandingkan sistem konversi energi konvensional, kelemahan utamanya berasal dari efisiensi konversi energi yang masih rendah. Upaya terkait dengan ini telah dilakukan sepanjang abad ke-20 untuk meningkatkan efisiensi termoelektrik tersebut. Khusus studi tentang material termoelektrik terus dikembangkan untuk mendapatkan efisiensi yang tinggi. Beberapa studi penting yang dilakukan pada bahan termoelektrik dengan angka manfaat yang tinggi (*figure of merit* $\approx ZT$) di setiap tahun untuk berbagai rentang temperatur. Termoelektrik

tak berdimensi dari ZT yang sesuai, yang mewakili efisiensi bahan termoelektrik, didefinisikan sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (2-14) (Kang, Wang, Bahk, Kim, & Kim, 2015):

$$ZT = \frac{S^2 \sigma T}{k} \tag{2-14}$$

S adalah koefisien Seebeck, σ adalah konduktivitas listrik, dan k adalah konduktivitas termal material, dan T adalah temperatur absolut. Koefisien Seebeck (persamaan 2-15) didefinisikan sebagai rasio medan listrik, E, yang diinduksi dengan gradien temperatur di dalam padatan, yang sama dengan tegangan induksi, V, melintasi material dibagi dengan temperatur berbeda ketika tidak ada aliran arus, sehingga:

$$S = \frac{E}{\nabla T} = - \frac{dV}{dx} \frac{dx}{dT} = - \frac{dV}{dT} \tag{2-15}$$

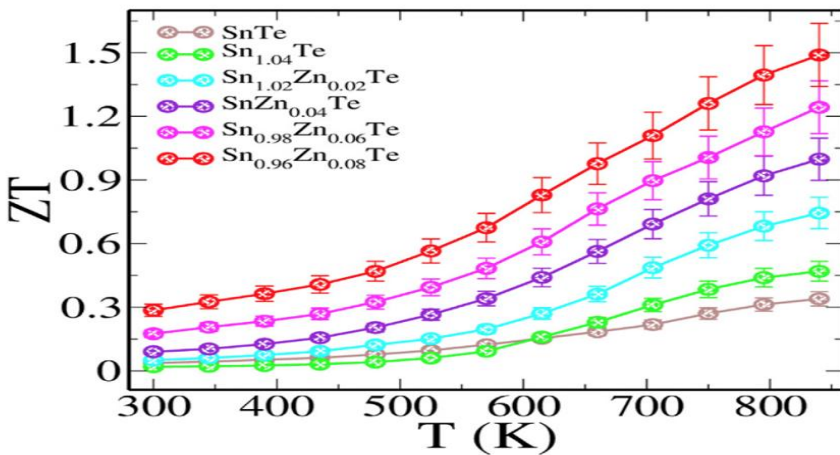
Material termoelektrik merupakan sebuah cara yang dianggap baik untuk memperbaiki pengukuran krisis energi dan lingkungan. Efektivitas material termoelektrik didasarkan atas ZT dengan persamaan (2-16) (Bhat & Shenoy, 2019).

$$ZT = \frac{\sigma S^2}{\kappa_e + \kappa_L} T \tag{2-16}$$

σ adalah konduktivitas listrik, S adalah koefisien Seebeck, σS^2 adalah faktor daya (*power factor*), κ_e adalah konduktivitas termal elektronik, κ_L adalah konduktivitas termal kisi-kisi molekulnya. Sedangkan, T adalah temperatur absolut, dan Z adalah singkatan khusus untuk '*Zahl*' dalam bahasa Jerman yang artinya angka atau *figure* atau *number* dalam bahasa Inggris. Walaupun bentuk σ , S, dan κ_e tidak bergantung pada konsentrasi N_p , κ_L adalah hanya bentuk di mana dapat diatur ke tak bergantungannya. Kemampuan dalam meningkatkan faktor daya dari material TE telah diperbaiki dengan cara (i) mengoptimalkan konsentrasi pembawanya dengan menambah

pendonor atau kompensasi sendiri, (ii) memperbaiki nilai Seebeck dengan menambah resonansi atau menambah limbah yang dipersatukan oleh pita konvergensi, (iii) mengurangi efek bipolar dengan menambah celah pita atau *band gap* dengan *doping* elemental. Berbagai macam yang telah dikembangkan untuk memperbaiki ZT, pencarian untuk pengembangan biaya efektif material termoelektrik yang berkaitan dengan ramah lingkungan adalah semakin meningkat.

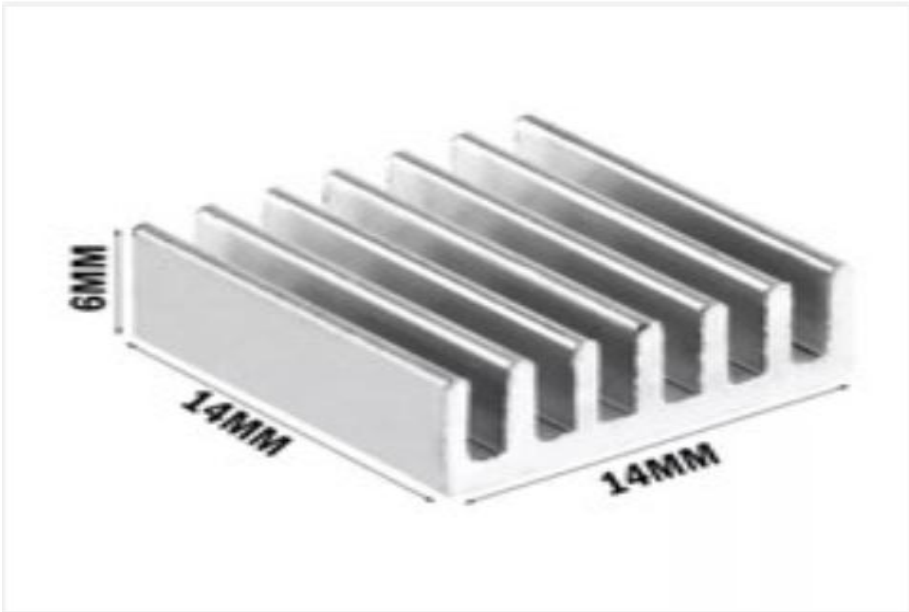
Gambar 2.5 memperlihatkan pengaruh temperatur dan Z_n dalam meningkatkan material termoelektrik yang diukur dengan kenaikan nilai ZT untuk beberapa komposisi Zn yang ditambahkan, tertinggi adalah komposisi $\text{Sn}_{0.96}\text{Zn}_{0.08}\text{Te}$ dibandingkan komposisi yang lain. SnTe tanpa unsur Zn menunjukkan nilai ZT yang paling rendah.



Gambar 2.5 Pengukuran Nilai ZT Berdasarkan Temperatur untuk Beberapa Komposisi Material SnTe (Bhat & Shenoy, 2019)

2.4. Heatsink

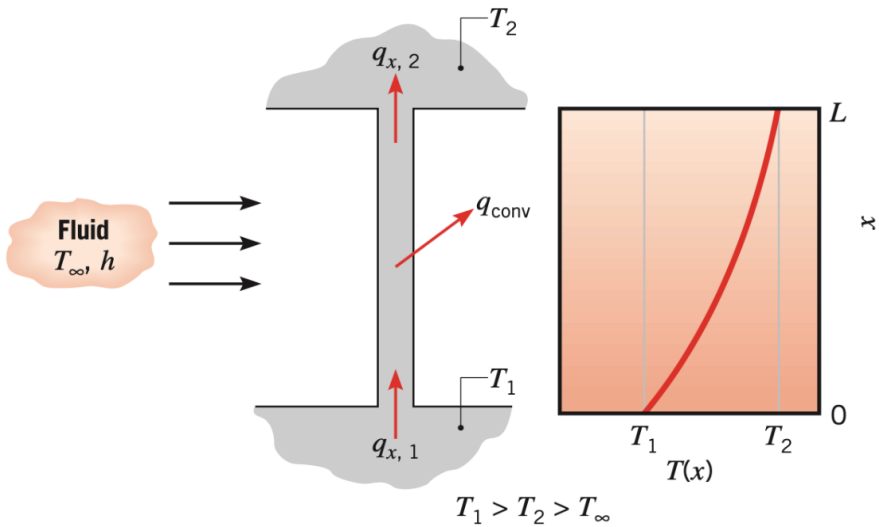
Heatsink merupakan komponen yang digunakan pada modul termoelektrik yang memiliki fungsi untuk menyalurkan atau menyerap panas dari permukaan modul termoelektrik ke media padat. Umumnya, *heatsink* berbahan aluminium atau campuran aluminium. Adapun bentuk-bentuk *heatsink* bermacam-macam bergantung kebutuhan. Salah satu ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 *Heatsink*

Ukuran dasar *heatsink* panjang dikali lebar dikali tinggi, bila melihat gambar 2.2 bahwa panjang = 14 mm, lebar 14 mm, dan tinggi 6 mm. Ketebalan *heatsink* bervariasi disesuaikan dengan kebutuhan.

Berikut dijelaskan teori perhitungan *heatsink* menurut (Bergman, Lavine, Incropera, & Dewitt, 2011). *Heatsink* juga kadangkala dinamakan benda bersirip atau permukaan benda yang diperluas. Istilah ini dipakai untuk mempelajari perpindahan kalor secara konduksi dalam padatan dan perpindahan kalor konveksi (dan/atau radiasi) dari batas padatan. Untuk permukaan yang diperluas, arah perpindahan kalor dari batas adalah tegak lurus terhadap arah utama perpindahan kalor dalam padatan. Gambar 2.7 memperlihatkan gambaran proses terjadinya perpindahan kalor konduksi dan konveksi.



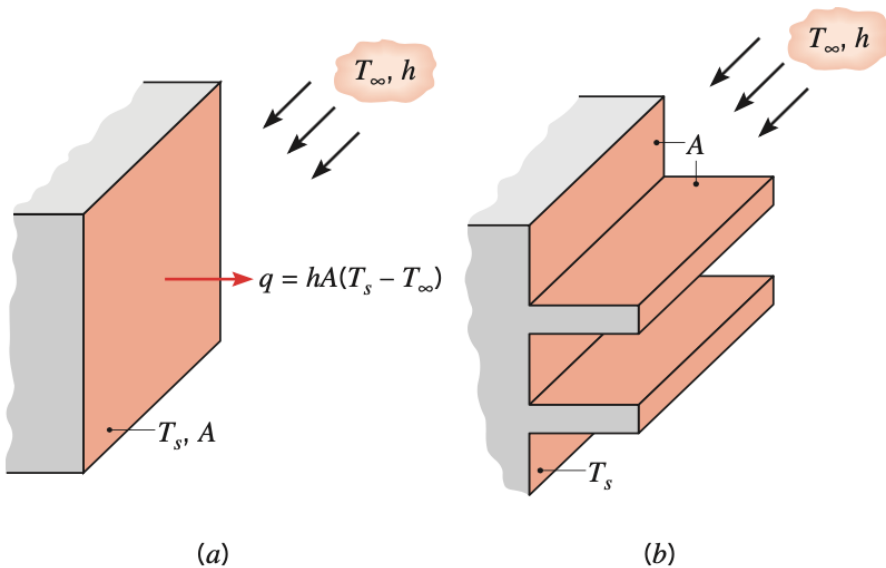
Gambar 2.7 Proses Perpindahan Kalor Konduksi dan Konveksi (Bergman et al., 2011)

Sebuah penopang padat menghubungkan dua dinding pada temperatur yang berbeda dan di sekitarnya terdapat aliran fluida. Dengan $T_1 > T_2$, gradien temperatur dalam arah x mempertahankan perpindahan kalor konduksi di penopang padat. Namun, dengan $T_1 > T_2 > T_\infty$, ada perpindahan kalor konveksi q_x bersamaan ke fluida, sehingga gradien temperatur $|dT/dx|$ menurun dengan meningkatnya x .

Meskipun banyak situasi berbeda yang melibatkan efek gabungan konduksi-konveksi tersebut, kenyataan yang paling sering adalah permukaan yang diperluas digunakan secara khusus untuk meningkatkan perpindahan kalor antara padatan dan fluida yang sekitarnya. Permukaan yang diperpanjang seperti itu disebut sirip.

Perhatikan dinding bidang gambar 2.8 (a). Jika T_s tetap, ada dua cara di mana laju perpindahan kalor dapat ditingkatkan. Pilihan pertama, koefisien perpindahan kalor konveksi h dapat ditingkatkan dengan meningkatkan kecepatan fluida, dan/atau temperatur fluida T_∞

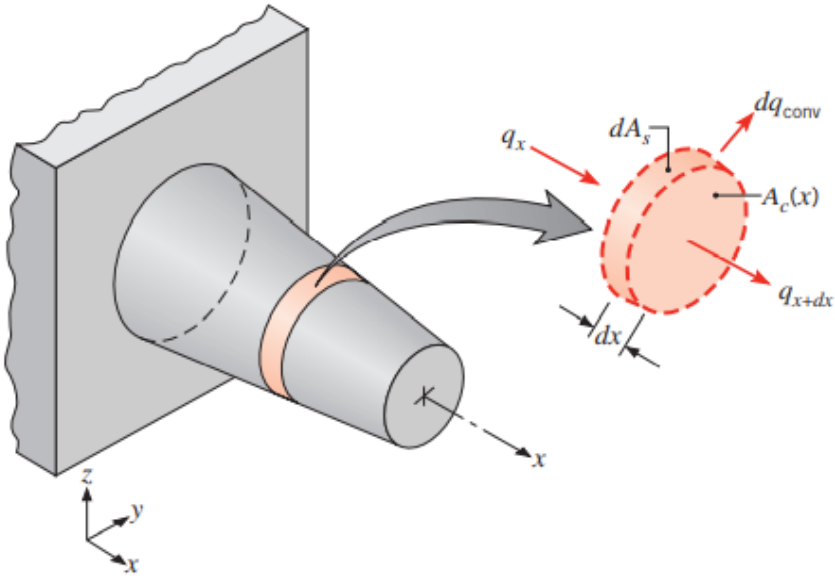
dikurangi. Namun, ada banyak situasi di mana peningkatan h ke nilai maksimum yang mungkin tidak cukup untuk mendapatkan laju perpindahan kalor yang diinginkan atau biaya yang terkait menjadi penghalang. Biaya tersebut terkait dengan kebutuhan daya *blower* atau pompa yang diperlukan untuk meningkatkan nilai h melalui peningkatan gerakan fluida.



Gambar 2.8 Sirip Meningkatkan Perpindahan Kalor dari Dinding Bidang (a) Permukaan Tanpa Sirip. (b) Permukaan Bersirip (Bergman et al., 2011)

Selain itu, pilihan kedua untuk mengurangi temperatur fluida T_∞ seringkali tidak praktis. Lihat gambar 2.8 (b), bagaimanapun, ada pilihan ketiga. Artinya, laju perpindahan kalor dapat ditingkatkan dengan meningkatkan luas permukaan A di mana perpindahan kalor konveksi terjadi. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan sirip yang memanjang dari dinding ke fluida sekitarnya. Konduktivitas termal bahan sirip dapat memiliki efek yang kuat pada distribusi temperatur di sepanjang sirip dan karena itu mempengaruhi sejauh mana laju perpindahan panas ditingkatkan. Idealnya, bahan sirip harus memiliki konduktivitas termal yang besar untuk meminimalkan variasi temperatur dari dasar ke ujungnya. Dalam batas konduktivitas termal tak terbatas, seluruh sirip akan berada pada temperatur permukaan dasar, sehingga memberikan kemungkinan peningkatan perpindahan kalor maksimum.

Balans energi untuk permukaan yang diperluas atau yang ditambah sirip dapat dilihat skema gambar 2.9.



Gambar 2.9 Balans Energi Permukaan yang Diperluas (Bergman et al., 2011)

Berdasarkan skema gambar 2.9, dapat ditentukan persamaannya adalah:

$$q_x = q_{x+dx} + d_{konveksi} \quad (2-17)$$

Hukum Fourier:

$$q_x = -kA_c \frac{dT}{dx} \quad (2-18)$$

A_c adalah luas penampang sirip yang bervariasi dengan panjang x . Laju perpindahan kalor konduksi pada $x + dx$ dapat dinyatakan sebagai berikut.

$$q_{x+dx} = q_x + \frac{dq_x}{dx} dx \quad (2-19)$$

$$q_{x+dx} = -kA_c \frac{dT}{dx} - k \frac{d}{dx} \left(A_c \frac{dT}{dx} \right) dx \quad (2-20)$$

Laju perpindahan kalor konveksi dinyatakan sebagai berikut.

$$q_{x+dx} = hdA_s(T - T_\infty) \quad (2-21)$$

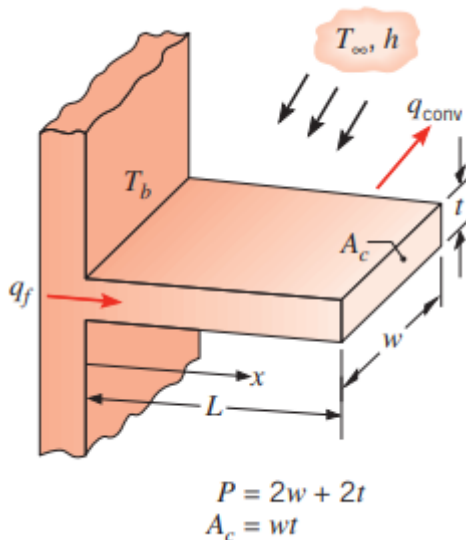
dA_s adalah luas permukaan elemen diferensial. Substitusikan ke dalam persamaan balans energi, didapat:

$$\frac{d}{dx} \left(A_c \frac{dT}{dx} \right) - \frac{h}{k} \frac{dA_s}{dx} (T - T_\infty) = 0 \quad (2-22)$$

$$\frac{d^2 T}{dx^2} + \left(\frac{1}{A_c} \frac{dA_c}{dx} \right) \frac{dT}{dx} - \left(\frac{1}{A_c} \frac{h}{k} \frac{dA_s}{dx} \right) (T - T_\infty) = 0 \quad (2-23)$$

Persamaan (2-23) ini merupakan sebuah persamaan umum energi untuk permukaan yang diperluas. Solusi dari persamaan ini dihubungkan dengan kondisi-kondisi batas yang sesuai dari bentuk-bentuk sirip dan kondisi ujung sirip yang digunakan mengalami kasus-kasus, seperti kasus perpindahan kalor konveksi, adiabatik, memiliki temperatur tertentu, dan panjang sirip tak berhingga.

Untuk menyelesaikan persamaan (2-23), salah satunya adalah dipengaruhi oleh geometri sirip. Bentuk sirip yang ada dalam pengaplikasiannya cukup beragam, akan tetapi dalam solusi ini dimulai dengan bentuk sirip yang sederhana, yaitu sirip yang memiliki luas penampang merata, seperti ditunjukkan pada gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Bentuk Sirip Berpenampang Rata (Bergman et al., 2011)

$T(0) = T_b$ merupakan temperatur permukaan dasar sirip dan fluida sekitarnya memiliki temperatur T_∞ . Luas penampang sirip A_c adalah konstan, dan $A_s = Px$. A_s adalah luas permukaan yang dikur dari dasar sirip hingga x dan P adalah keliling sirip. Dengan kata lain,

$dA_c/dx = 0$, dan $dA_s/dx = P$. Selanjutnya, persamaan (2-23) menghasilkan persamaan (2-24).

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{hP}{kA_c} (T - T_\infty) \tag{2-24}$$

Untuk penyederhanaan persamaan (2-24), dibentuk variabel bergantung dengan cara mendefinisikan sebuah temperatur eksese dengan simbol θ .

$$\theta(x) \equiv T(x) - T_\infty \tag{2-25}$$

Selama T_∞ adalah konstan, $d\theta/dx = dT/dx$. Substitusikan dari persamaan (2-25) ke persamaan (2-24), dihasilkan:

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - m^2 = 0 \tag{2-26}$$

$$m^2 \equiv \frac{hP}{kA_c} \tag{2-27}$$

Persamaan (2-27) adalah linier, homogen, persamaan diferensial orde dua dengan koefisien-koefisiennya konstan. Bentuk solusi umumnya adalah:

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \tag{2-28}$$

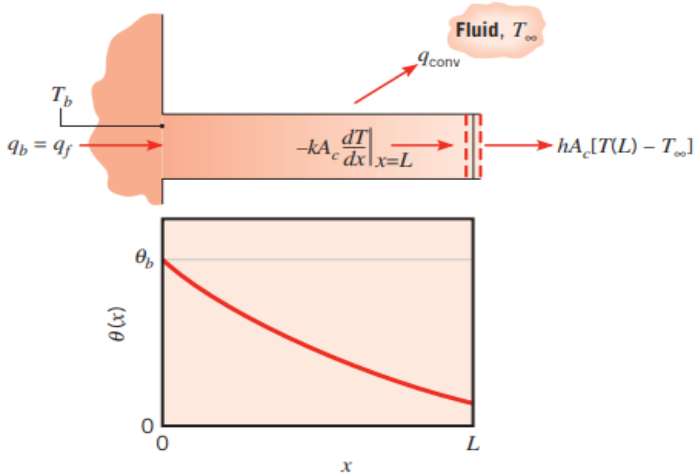
Untuk mengevaluasi konstanta C_1 dan C_2 membutuhkan pendekatan dengan kondisi-kondisi batas yang sesuai. Sebagai contoh, temperatur dasar sirip $x = 0$, sehingga persamaan (2-28) menjadi:

$$\theta(0) = T_b - T_\infty \tag{2-29}$$

Selanjutnya, kondisi batas berikutnya adalah ujung sirip, yaitu $x = L$. L adalah panjang sirip dan bergantung pada kasus-kasus sirip.

Selanjutnya, kasus sirip terdiri dari kasus A, kasus B, dan kasus C. Kasus A, mengandaikan terjadinya perpindahan kalor pada ujung sirip. Kasus B, mengabaikan adanya perpindahan kalor konveksi pada ujung sirip dan ujung sirip dapat diasumsikan adiabatik atau diisolasi sehingga tidak terjadi perpindahan kalor dari ujung sirip ke sekitarnya. Kasus C, pada ujung sirip ditentukan besaran temperaturnya. Kasus D,

panjang sirip tak berhingga. Untuk menjelaskan, keempat kasus sirip ini, lihat gambar 2.11.



Gambar 2.11 Proses Perpindahan Kalor Konduksi dan Konveksi pada Sirip (Bergman et al., 2011)

Persamaan balans energi yang digunakan untuk menganalisis kasus A adalah persamaan (2-17). Artinya, laju perpindahan energi ke fluida secara konveksi dari ujung sirip harus sama dengan laju energi yang mencapai ujung sirip berupa perpindahan kalor konduksi yang melalui sepanjang sirip (lihat gambar 2.9).

$$hA_c [T(L) - T_\infty] = -kA_c \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} \tag{2-17}$$

$$h\theta(L) = -k \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} \tag{2-18}$$

Bentuk solusi umum dari persamaan diferensial orde dua yang homogen dan linier adalah:

$$\theta(x) = C_1 e^{mx} + C_2 e^{-mx} \tag{2-19}$$

Konstanta C_1 dan C_2 membutuhkan kondisi batas agar dapat ditentukan nilainya. Pertama, kondisi batas yang dipakai adalah temperatur dasar sirip pada $x = 0$.

$$\theta(0) = T_b - T_\infty \equiv \theta_b \tag{2-20}$$

Kedua, kondisi batas pada ujung sirip pada $x = L$.

Untuk itu, terdapat 4 situasi fisik yang berbeda, yaitu kasus A adalah mengasumsikan terjadi perpindahan kalor pada ujung sirip, kasus B adalah asumsi rugi-rugi kalor perpindahan kalor konveksi dari ujung sirip diabaikan (adiabatik), kasus C adalah asumsi diujung sirip terdapat nilai temperatur, dan kasus D adalah panjang sirip tak berhingga.

Kasus A

Balans energi pada permukaan kontrol di ujung sirip (lihat gambar 2.9) adalah:

$$hA_c [T(L) - T_\infty] = -kA_c \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} \tag{2-21}$$

$$h\theta(L) = -k \left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} \tag{2-22}$$

Laju energi yang dipindahkan fluida oleh konveksi dari ujung sirip harus sama dengan laju energi konduksi yang mencapai ujung sirip.

$$\theta_b = C_1 + C_2 \tag{2-23}$$

$$h(C_1 e^{mL} + C_2 e^{-mL}) = km(C_2 e^{-mL} - C_1 e^{mL}) \tag{2-24}$$

Selanjutnya,

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\cosh m(L-x) + (h/mk) \sinh m(L-x)}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL} \tag{2-25}$$

Bentuk distribusi temperaturnya ditunjukkan pada gambar (2.9). Besaran gradien temperatur berkurang dengan bertambahnya x. Kecenderungan ini adalah akibat berkurangnya perpindahan kalor konduksi yang dimulai dari pangkal sirip $q_x(x)$ dengan bertambahnya x (panjang sirip) oleh karena rugi-rugi konveksi yang kontinyu dari permukaan-permukaan sirip.

Selanjutnya, untuk mencari nilai perpindahan kalor di sirip dapat dilakukan dengan dua cara. Cara pertama, menggunakan hukum Fourier di bagian dasar sirip, yaitu memakai persamaan (2.26).

$$q_f = q_b = -kA_c \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = -kA_c \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=L} \quad (2.26)$$

Distribusi temperatur $\theta(x)$ diketahui, q_f dapat dihitung, dan memberikan nilai perpindahan kalor di sirip (persamaan 2.27).

$$q_f = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \frac{\sinh mL + (h/mk) \cosh mL}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL} \quad (2.27)$$

Cara kedua, yaitu dengan integral. Berdasarkan prinsip konservasi energi bahwa kalor konveksi yang dipindahkan oleh sirip sama dengan kalor konduksi yang mengalir ke sirip melalui dasar sirip.

$$q_f = \int_{A_f} h[T(x) - T_\infty] dA_s \quad (2.28)$$

$$q_f = \int_{A_f} h\theta(x) dA_s \quad (2.29)$$

A_f adalah luasan total dari permukaan ujung sirip, jangan lupa dikalikan dengan jumlah sirip yang digunakan.

Kasus B

Untuk kasus B berkaitan dengan asumsi bahwa rugi-rugi kalor dari ujung sirip diabaikan, di mana ujung sirip diandaikan adiabatik.

$$\left. \frac{d\theta}{dx} \right|_{x=L} = 0 \quad (2.28)$$

Substitusikan persamaan (2.28) ke persamaan (2.19) dan dibagi dengan m , didapat:

$$C_1 e^{mL} - C_2 e^{-mL} = 0 \quad (2.29)$$

Selanjutnya, menggunakan persamaan (2.23) untuk menyelesaikan nilai konstanta C_1 dan C_2 , dan substitusikan ke dalam persamaan (2.19), didapat persamaan (2.30).

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL} \quad (2.30)$$

Menggunakan distribusi temperatur ini dengan persamaan (2.26), laju perpindahan kalor ujung sirip adalah:

$$q_f = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \tanh mL \quad (2.31)$$

Kasus C

Dengan pengertian yang sama, dapat ditentukan distribusi temperatur dan laju perpindahan kalor untuk kasus C yang memiliki temperatur pada ujung sirip. Kondisi batas kedua, yaitu $\theta(L) = \theta_L$, dan menghasilkan sebuah bentuk persamaan (2.32).

$$\frac{\theta}{\theta_b} = \frac{(\theta_L/\theta_b) \sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL} \quad (2.32)$$

$$q_f = \sqrt{hPA_c} \theta_b \frac{\cosh mL - \theta_L/\theta_b}{\sinh mL} \quad (2.33)$$

Kasus D

Kasus D berhubungan dengan sirip yang sangat panjang, yaitu $L \rightarrow \infty$, dan $\theta_L \rightarrow 0$ sehingga mempermudah penurunan persamaannya.

$$\frac{\theta}{\theta_b} = e^{-mx} \quad (2.34)$$

$$q_f = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \quad (2.35)$$

Selanjutnya, persamaan-persamaan kasus A, B, C, dan D diringkaskan dalam tabel 2.1 untuk memudahkan mencari persamaan yang sesuai dengan kasus-kasus tersebut.

Tabel 2.1 Distribusi Temperatur dan Rugi-Rugi Kalor di Sirip dengan Penampang Rata (Bergman et al., 2011)

Kasus	Kondisi Ujung Sirip ($x = L$)	Distribusi Temperatur θ/θ_b	Laju Perpindahan Kalor Sirip, q
A	Konveksi $h\theta(L) = -kd\theta/dx _{x=L}$	$\frac{\cosh m(L-x) + (h/mk) \sinh m(L-x)}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL}$ (3.75)	$M \frac{\sinh mL + (h/mk) \cosh mL}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL}$ (3.77)
B	Adiabatik $d\theta/dx _{x=L} = 0$	$\frac{\cosh m(L-x)}{\cosh mL}$ (3.80)	$M \tanh mL$ (3.81)
C	Temperatur $\theta(L) = \theta_L$	$\frac{(\theta_L/\theta_b) \sinh mx + \sinh m(L-x)}{\sinh mL}$ (3.82)	$M \frac{(\cosh mL - \theta_L/\theta_b)}{\sinh mL}$ (3.83)
D	Sirip Panjang ($L \rightarrow \infty$): $\theta(L) = 0$	e^{-mx} (3.84)	M (3.85)

$\theta \equiv T - T_\infty$ $m^2 \equiv hP/kA_c$
 $\theta_b = \theta(0) = T_b - T_\infty$ $M \equiv \sqrt{hPkA_c} \theta_b$

BAB 3

THERMOELECTRIC GENERATOR

Penemuan efek Seebeck telah mampu menghasilkan pembangkit daya, dikenal dengan modul *Thermoelectric Generator* atau disingkat TEG. Modul TEG ini digunakan sebagai pemanfaatan beda temperatur dua semi konduktor yang berbeda yang dapat mengalirkan arus listrik, sehingga menghasilkan beda tegangan. Fenomena ini dikenal dengan efek Seebeck yang merupakan kebalikan dari efek Peltier (modul *Thermoelectric Cooler* atau TEC) yang dijelaskan khusus pada bab 4. Penemuan modul TEG telah membuka peluang untuk mengembangkan sumber energi alternatif untuk pembangkit listrik (Bradly, Orr, Rahaoui, Date, & Akbarzadeh, 2015).

Modul TEG ini dapat dimanfaatkan untuk mengubah limbah panas menjadi listrik, seperti saluran buang kendaraan sebagai pembuang limbah panas hasil pembakaran di ruang bakar dari kendaraan dapat dipasang modul TEG untuk menghasilkan energi listrik sehingga limbah panas tidak perlu dibuang ke udara atmosfer lagi, termasuk juga limbah panas dari buangan cerobong di instalasi industri. Menurut peneliti bahwa salah satu karakteristik dari modul TEG berupa efisiensi, sebagaimana ditunjukkan pada persamaan (3-1) (Lashin, Turkestani, & Sabry, 2020).

$$\eta = \frac{P_{out}}{Q_{in}} \quad (3-1)$$

Daya yang dihasilkan (P_{out}) dari modul TEG bergantung pada panas yang diterima (Q_{in}) atau yang mengalir ke modul TEG. Sedangkan, unjuk kerja menyeluruh dari modul TEG didasarkan pada *figure of merit*, ZT yang berkaitan dengan sifat-sifat fisik dari material modul TEG. Persamaan (3-2) menunjukkan hubungan dimaksud.

$$ZT = \frac{\alpha^2 T}{\rho k} \quad (3-2)$$

α adalah koefisien Seebeck, T adalah temperatur operasi, ρ adalah resistisitas listrik, dan k adalah konduktivitas termal material.

Efisiensi konversi teoritis sebuah modul TEG ditentukan berdasarkan persamaan (4-3).

$$\eta = \frac{T_H - T_C}{T_H} \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_C}{T_H}} \quad (3-3)$$

T_H dan T_C merupakan temperatur sisi panas dan dingin dari permukaan modul TEG.

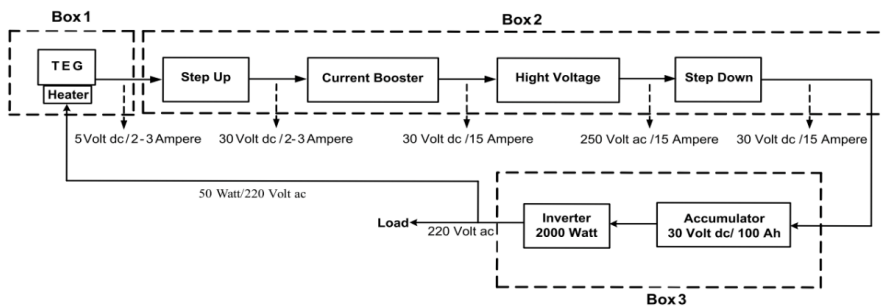
Persamaan (3-3) tidak dapat digunakan secara langsung untuk menghitung efisiensi modul TEG dikarenakan mengalami kesulitan dalam mengukur panas input yang mengalir ke TEG atau Q_{in} secara akurat terutama pada temperatur operasi melebihi 200°C. Kesulitan ini terdiri dari penentuan jumlah panas yang dipindahkan secara perpindahan kalor konduksi, butuh sifat-sifat termal, dan ketebalan pelumas termal yang digunakan sebagai Lapisan antar muka, kerugian panas akibat perpindahan kalor konveksi dan radiasi ke lingkungan.

3.1. Modul TEG sebagai Sumber Energi Baru Terbarukan

TEG dapat diklasifikasikan sebagai pembangkit daya rendah dan tinggi. TEG pembangkit daya rendah dari 5 μ W hingga 1 W, dan TEG pembangkit daya tinggi lebih besar dari 1 W (Cekdin, Nawawi, & Faizal, 2020). Adapun aplikasi TEG pembangkit daya rendah digunakan untuk kepentingan biomedis, ruang angkasa, dan peralatan-peralatan yang membutuhkan daya rendah. Sedangkan aplikasi TEG pembangkit daya tinggi saat ini banyak digunakan untuk peralatan komunikasi, seperti iPod, pemutar MP3, dan *smartphone*. Untuk bidang kesehatan, seperti alat pacu jantung dan alat pacu dengar.

Sumber-sumber panas dengan temperatur tinggi yang dapat digunakan sebagai sumber modul TEG adalah gas buang kendaraan (400°C - 700°C), gas buang mesin diesel (500°C), dan Tungku regeneratif peleburan kaca, Tungku regeneratif peleburan kaca (450°C), serta sumber-sumber lainnya.

Aplikasi TEG untuk pembangkit listrik dengan pemanasan sendiri dapat dibuat dalam bentuk diagram blok sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.1. Modul TEG yang digunakan adalah tipe SP 1848 – 27 145 SA dan *heater* atau pemanas 50 W/220 V AC. Pada kotak 1 atau *box 1* terdapat pemanas 50 Watt/220 V untuk memanaskan pelat logam berbahan alumunium. Panas dari alumunium kemudian dipindahkan ke sisi panas modul TEG. Sedangkan, sisi dingin modul TEG ditempatkan pada *heatsink* (sebagai logam pembuangan panas). Sebagian besar atau lebih *heatsink* terendam dalam air. Jika temperatur logam yang dipanaskan dan temperatur pembuangan panas logam mencapai perbedaan temperatur tertentu, maka perbedaan temperatur ini akan menyebabkan modul TEG mulai bekerja. Dengan adanya perbedaan temperatur tertentu antara kedua sisi modul TEG, kedua sisi tembaga yang dihubungkan ke *thermoelectric* akan menimbulkan tegangan dan arus. Tegangan yang dihasilkan berada pada kisaran 2-5 V DC dengan arus sebesar 2-3 A.

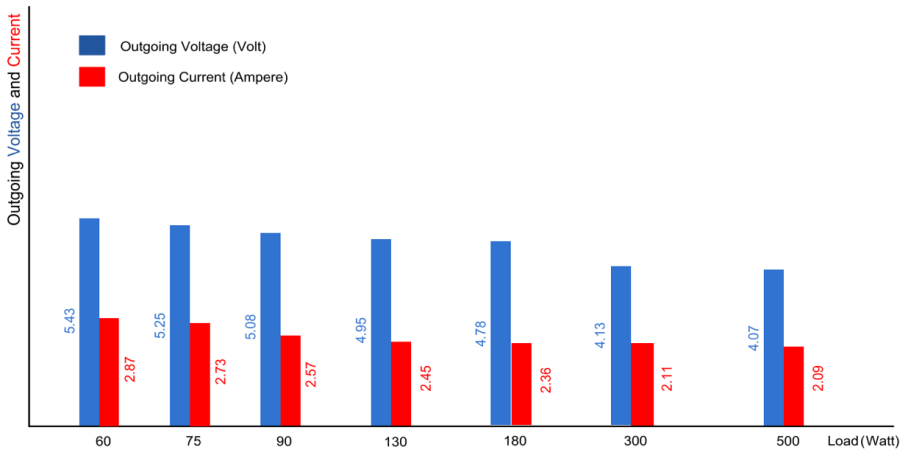


Gambar 3.1 Diagram Blok Aplikasi Modul TEG untuk Pembangkit Tenaga (Cekdin et al., 2020).

Tegangan ke luar dari modul TEG akan dinaikkan oleh rangkaian *Step-Up* menjadi 30 Volt DC dan arus tetap. Arus keluaran dari rangkaian step up ini akan dibangkitkan kembali oleh rangkaian *Current Booster*. Rangkaian ini merupakan rangkaian yang berfungsi untuk menaikkan arus masukan yang kecil menjadi arus keluaran yang besar, di mana arus keluaran dapat diatur sesuai kebutuhan. Arus keluaran dari Step Up masih sangat kecil, mulai dari 2 Ampere sampai maksimal 3 A. Rangkaian *Current Booster* ini meningkatkan arus menjadi 9 A dengan tegangan kerja 30 V DC. Tegangan keluaran dari rangkaian *Current Booster* dibangkitkan kembali oleh rangkaian *High Voltage* atau dinamakan rangkaian *High Voltage Boost Converter*. Rangkaian tegangan tinggi merupakan rangkaian penguat tegangan

yang dapat menaikkan tegangan masukan kecil dari 6 V DC menjadi 12 V DC menjadi tegangan keluaran mulai dari 100 V DC sampai 1.000 V DC tergantung kebutuhan. Sedangkan, arus keluaran konstan. Dalam desain ini tegangan tinggi dengan daya maksimum 2.250 W. Rangkaian tegangan tinggi berguna untuk menyimpan daya. Daya pada rangkaian tegangan tinggi akan disalurkan ke beban (± 1200 W) dan untuk memanaskan kembali *heater*.

Pengukuran dilakukan ketika melakukan pengujian berdasarkan pemakaian beban dan hasilnya sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Hasil Pengukuran Tegangan dan Arus ke Luar dari Modul TEG dengan Beban Bervariasi (Cekdin et al., 2020)

Pemilihan material dan desain akan mempengaruhi modul TEG besaran keluaran daya listrik yang dapat dihasilkan. Modul TEG SP 1848-27 145 SA dengan memakai 2-unit dan disusun secara paralel akan optimal dalam menghasilkan daya listrik. Untuk mencapai daya listrik untuk memenuhi kebutuhan rumah tangga sebesar ± 1200 W, tegangan dan arus sebaiknya dinaikkan secara bertahap melalui beberapa rangkaian seperti skematik pada gambar 3.1.

3.2. Modul TEG untuk Kendaraan Hibrid

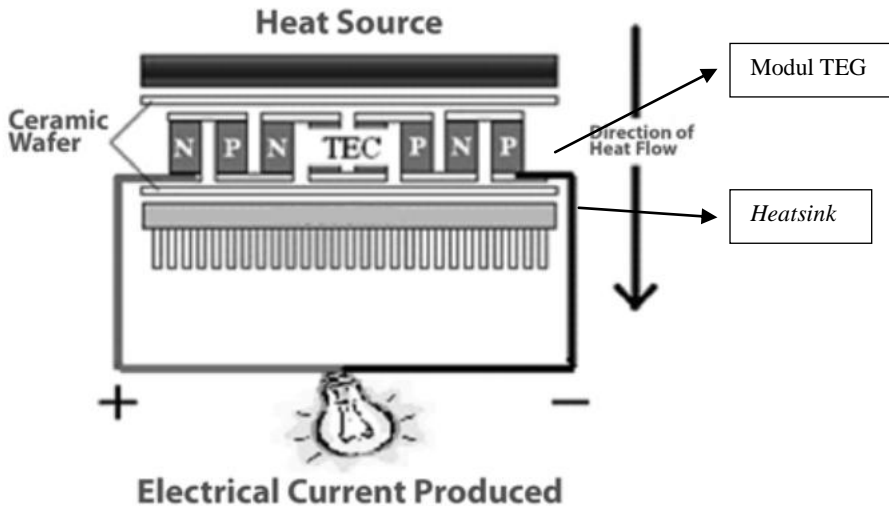
Adapun pengujian modul TEG ini dilakukan dengan variasi susunan seri dan paralel. Sumber panas buang dari kendaraan disimulasikan dengan menggunakan pemanas atau *heater* yang divariasikan tegangannya, yaitu 110V dan 220V. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dengan dua belas elemen peltier yang disusun secara seri dengan tegangan pemanas 220V, dapat menghasilkan

daya keluaran maksimum 8,11 W dengan perbedaan temperatur rata-rata 42,82°C. Hasil ini menunjukkan bahwa modul TEG memiliki prospek yang cerah sebagai sumber energi listrik (Putra, Koestoer, Adhitya, Roekettino, & Trianto, 2010).

Sektor transportasi merupakan sektor penghasil panas buang yang cukup besar sehingga efisiensi kendaraan bermotor rata-rata hanya 35-40%. Sedangkan, sisa energinya dalam bentuk panas dibuang ke lingkungan atau udara atmosfer begitu saja. Panas yang terbuang ini disertai pula dengan partikel-partikel unsur kimia yang tidak ramah lingkungan, seperti karbon monoksida (CO), karbon dioksida (CO₂), nitrogen oksida (NO atau NO_x), dan lainnya.

Para peneliti terus berusaha untuk dapat menciptakan teknologi penghematan konsumsi energi di kendaraan bermotor. Beberapa teknologi yang telah dikembangkan, seperti *Electronic Fuel Injection* (EFI), *Intelligent Variable valve Timing and lift Electronic Control* (i-VTEC) dan yang populer saat ini adalah sistem hibrid (*hybrid system*). Sistem hibrid pada kendaraan bermotor adalah gabungan mesin pembakaran dalam dengan motor listrik. Sumber energi listrik untuk menggerakkan motor listrik diperoleh dari *alternator* dan juga *dynamic brake*, di mana energi gerak (putaran) diubah menjadi energi listrik. Pada saat ini, energi panas yang dihasilkan motor pembakaran dalam dibuang begitu saja dan belum dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik untuk sistem kendaraan hibrid ini.

Sebagaimana diketahui, panas buang pada kendaraan bermotor memiliki temperatur yang cukup tinggi berkisar 200°C - 300°C. Potensi temperatur yang cukup tinggi ini dapat dimanfaatkan untuk diubah menjadi energi listrik dengan memakai modul TEG dengan temperatur lingkungan berkisar 30°C-35°C. Beda temperatur 170°C - 265°C berpotensi menghasilkan energi listrik dengan modul TEG. Skema struktur modul TEG ditunjukkan pada gambar 3.3.

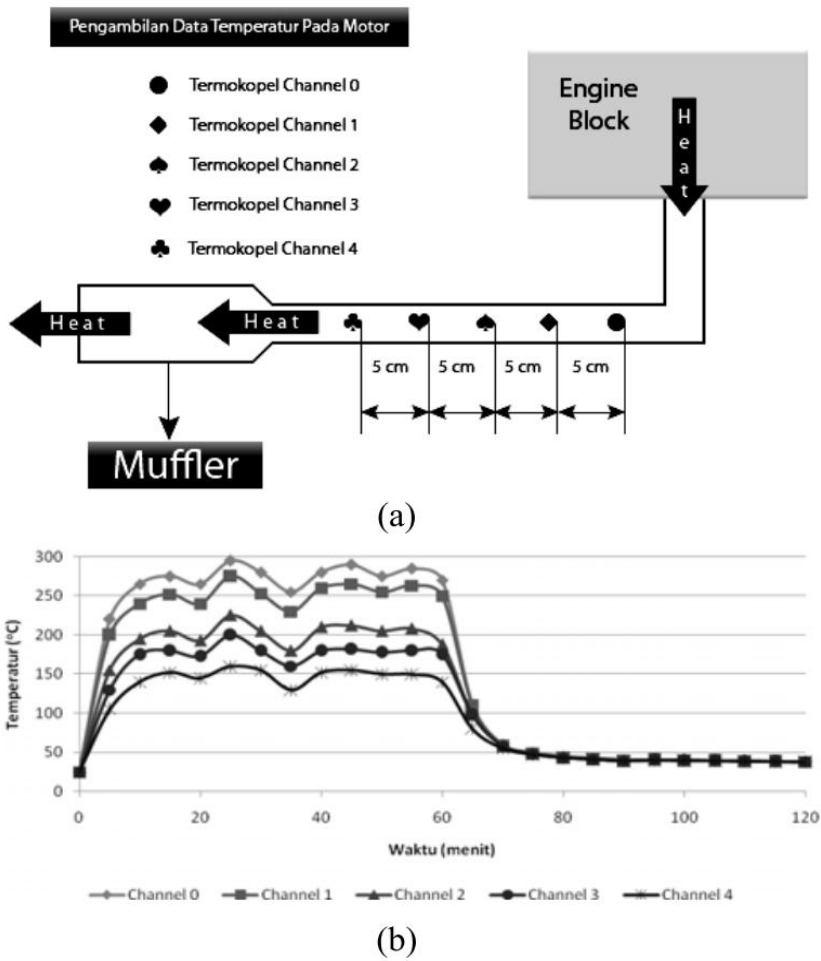


Gambar 3.3 Struktur Pembangkit Daya Modul TEG (Putra et al., 2010)

Sumber panas (*Heat Source*) dari permukaan saluran buang dipasang modul TEG sisi panas dan permukaan sisi dingin modul TEG dipasang *heatsink* yang bersentuhan dengan udara lingkungan, arah aliran panas dari sumber panas ke udara lingkungan melalui *heatsink*. *Heatsink* digunakan untuk membantu meningkatkan pelepasan kalor pada sisi dingin sehingga meningkatkan efisiensi dari modul TEG tersebut. *Heatsink* ini terbuat dari bahan yang mudah memindahkan kalor secara konduksi atau memiliki nilai konduktivitas termal bahan yang besar, seperti aluminium, tembaga, dan lainnya. Selain sisi teknis tersebut, harga bahan juga dipertimbangkan dalam memilih bahan yang digunakan dalam desain karena faktor biaya konstruksi. Potensi perbedaan temperatur ini yang dapat menghasilkan listrik. Sedangkan, besarnya tegangan listrik yang dihasilkan oleh modul TEG sebanding dengan beda temperatur sumber panas dan dingin.

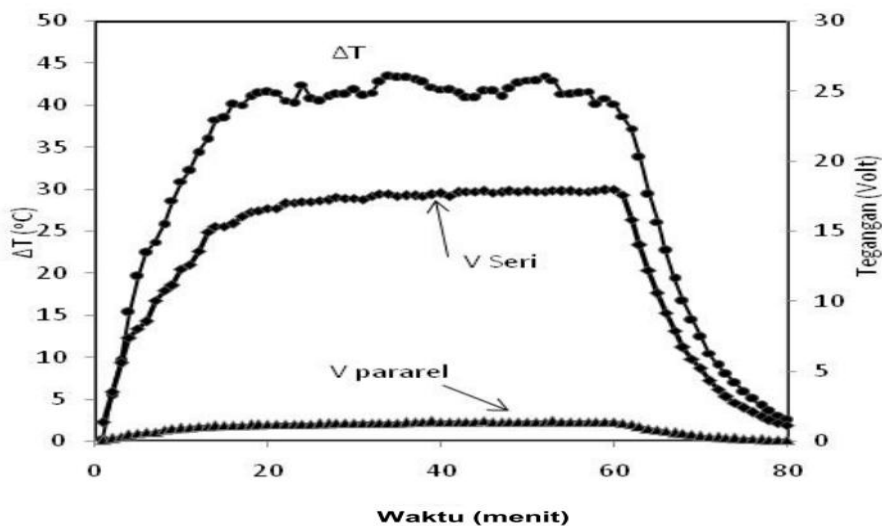
Berdasarkan uraian di atas, Putra et al. (2010) mendesain peralatan pengujian pada kendaraan bermotor memanfaatkan panas pada saluran buang atau *muffler* dengan skala laboratorium sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.5. Gas buang hasil pembakaran di blok mesin kendaraan bermotor dialirkan ke saluran buang dan dipasang peralatan ukur temperatur berupa termokopel dengan 5 titik pada permukaan saluran buang yang masing-masing berjarak 5 cm (gambar 3.4 (a)). Hasil pengujian diperlihatkan pada grafik gambar 3.4 (b). Terlihat pada grafik ini menunjukkan adanya

Pengaruh waktu pengujian terhadap temperatur, setelah 60 menit mesin kendaraan bermotor dimatikan terjadi penurunan temperatur di bawah 50°C.



Gambar 3.4 Skema Peralatan Pengujian (a) Pemasangan Termokopel untuk Pengambilan Data Temperatur pada Saluran Buang Kendaraan Bermotor, (b) Grafik Hasil Pengujian Temperatur dan Waktu (Putra et al., 2010)

Selain itu, temperatur permukaan saluran buang menurun ketika mendekati *muffler* sehingga beda temperatur antara permukaan saluran buang 150°C-300°C dan udara lingkungan sekitarnya memungkinkan untuk menghasilkan listrik apabila diletakkan modul TEG pada permukaan luar saluran buang kendaraan n bermotor ini.



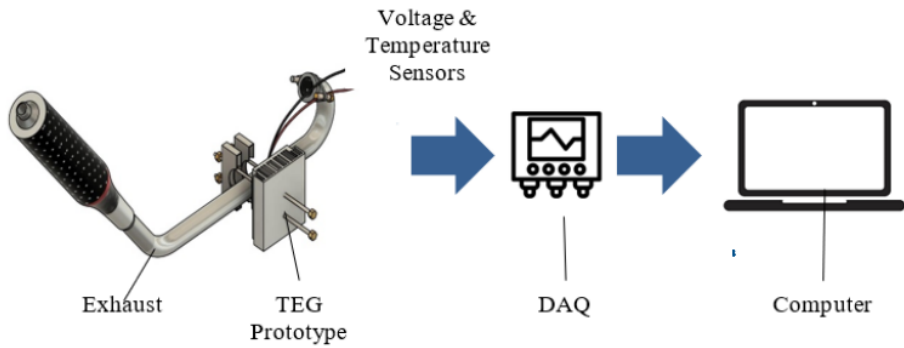
Gambar 3.5 Modul TEG Rangkaian Seri dan Paralel (Putra et al., 2010)

Berdasarkan gambar 3.5, apabila modul TEG didesain dalam rangkaian seri beda temperatur ΔT ($^{\circ}\text{C}$) sisi panas dan dingin permukaan modul TEG lebih besar dibandingkan dalam rangkaian paralel. Modul TEG dalam rangkaian seri menghasilkan tegangan yang lebih besar dibandingkan dengan modul TEG rangkaian paralel.

3.3. Modul TEG untuk Mengecaskan *Mobile Phone*

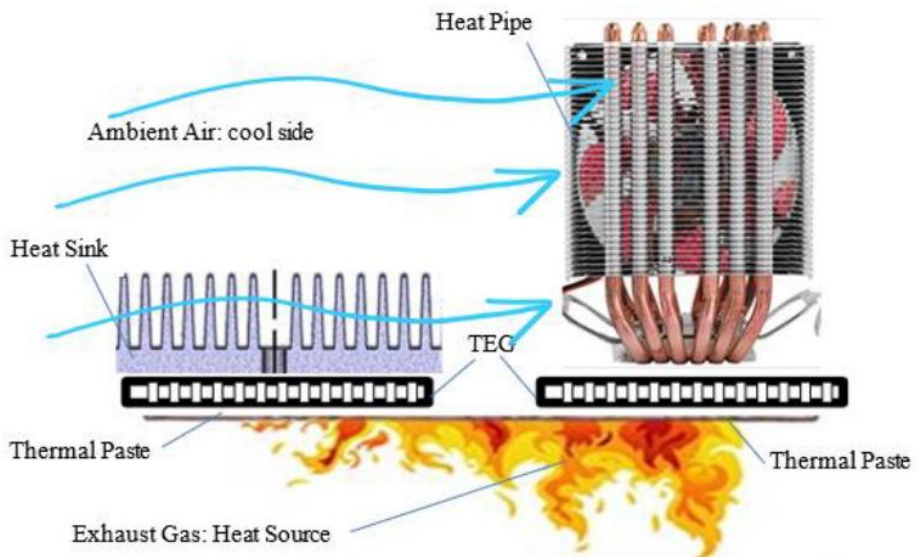
Kendaraan dengan teknologi mesin pembakaran dalam kehilangan energi berkisar 65% dalam bentuk kalor atau *heat*. Umumnya, kehilangan energi ini terbesar di saluran buang kendaraan atau *vehicle's exhaust* (Rizal, Lubis, & Amin, 2021).

Pengujian telah dilakukan pada kecepatan mesin kendaraan adalah 4.000 rpm. Pada pengujian menggunakan *heat pipe* dengan hasil pengukuran $T = 115^{\circ}\text{C}$ di sisi dingin TEG pada tegangan 4,47 V saat sepeda motor dalam keadaan berhenti atau *idle*, di mana relatif lebih baik bila pengujian TEG menggunakan *heatsink* sebagai pendingin sistem. *Heatsink* di sini sebagai peralatan tambahan agar laju perpindahan kalor sisi dingin TEG bertambah. Pengambilan data temperatur menggunakan peralatan data akuisisi (DAQ = *data acquisition devices*). Skema pengujian ini ditunjukkan pada gambar 3.6.

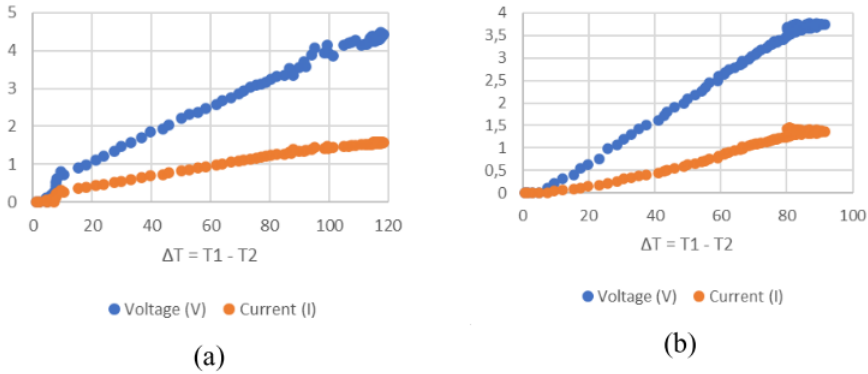


Gambar 3.6 Skema Pengujian TEG di Saluran Gas Buang Sepeda Motor (Rizal et al., 2021)

Alat uji terdiri dari sepeda motor 150 CC memakai sebuah modul TEG dengan sistem pendinginan memakai *heatsink* dan *heat pipe* seperti gambar 3.7.



Gambar 3.7 Sistem Pendingin *Heatsink* dan *Heat Pipe* (Rizal et al., 2021)

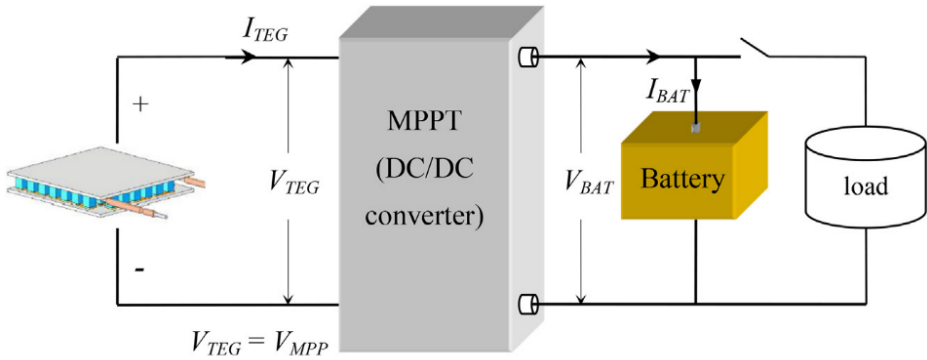


Gambar 3.8 (a) Efek Temperatur terhadap Tegangan dan Arus pada Keadaan Mesin *Idle*, (b) Efek Temperatur terhadap Tegangan dan Arus pada Keadaan Mesin *Running* (Rizal et al., 2021)

T_1 dan T_2 adalah pengukuran temperatur masing-masing pada sisi panas dan dingin modul TEG. Pengujian memakai pendingin *heatsink* didapat pencapaian temperatur cukup tinggi, tegangan dan arus yang dihasilkan bertambah dengan adanya kenaikan temperatur.

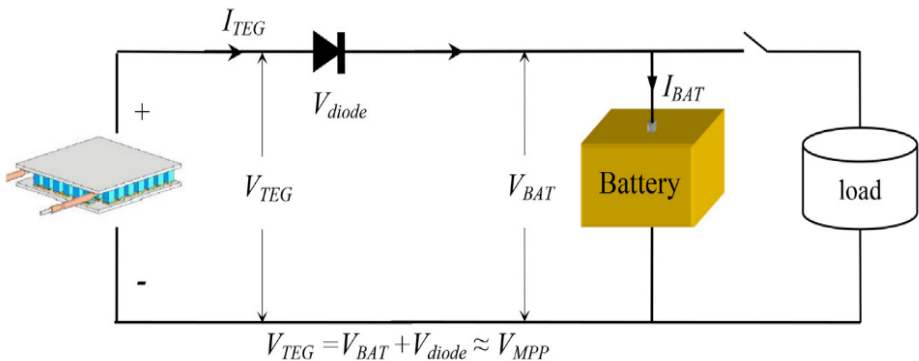
3.4. Modul TEG dengan *Loop Heat Pipe*

Studi ini berfokus pada generator termoelektrik (TEG) menggunakan *loop heat pipe* (LHP) dan desain yang cocok untuk pembangkitan daya maksimum. TEG menggunakan pipa panas loop, perangkat pendingin pasif, untuk menghilangkan panas tanpa mengonsumsi daya dan bebas dari kebisingan. Eksperimen untuk TEG dengan daya terukur 4 W menunjukkan bahwa LHP berkinerja sangat baik dengan ketahanan termal keseluruhan $0,35 \text{ K W}^{-1}$, dari sisi dingin modul TEG hingga lingkungan. LHP mampu membuang panas hingga 110 W dan bebas perawatan. Kecocokan desain TEG untuk pembangkitan daya maksimum, yang disebut "operasi titik daya mendekati maksimum (nMPPO)", dipelajari untuk menghilangkan MPPT (pengontrol pelacakan titik daya maksimum). nMPPO hanyalah sebuah desain sistem yang sesuai dengan tegangan keluaran TEG dengan baterai. Secara experimental ditunjukkan bahwa TEG menggunakan *design match for maximum-power generation* (nMPPO) berkinerja (Huang, Hsu, Tsai, & Hussain, 2015).



Gambar 3.9 Diagram TEG dengan MPPT (Huang et al., 2015)

Gambar 3.9 menunjukkan diagram TEG dengan MPPT dan MPPT dari TEG biasanya dirancang menggunakan daya *switching* rangkaian elektronik, konverter DC/DC. Untuk sistem TEG yang berdiri sendiri, disertakan baterai untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan. Sama seperti modul PV surya, MPPT dapat digunakan untuk mengatur output TEG (V_{TEG}) pada V_{MPP} yang bervariasi dengan kondisi operasi (T_h dan T_c). Namun, rangkaian MPPT akan menyebabkan beberapa efek respon sistem antara input dan output dan memiliki kehilangan energi. Sedangkan, diagram TEG dengan nMPPO ditunjukkan pada gambar 3.10.



Gambar 3.10 Diagram TEG dengan nMPPO (Huang et al., 2015)

3.5. Modul TEG untuk Memanfaatkan Panas Gas Buang

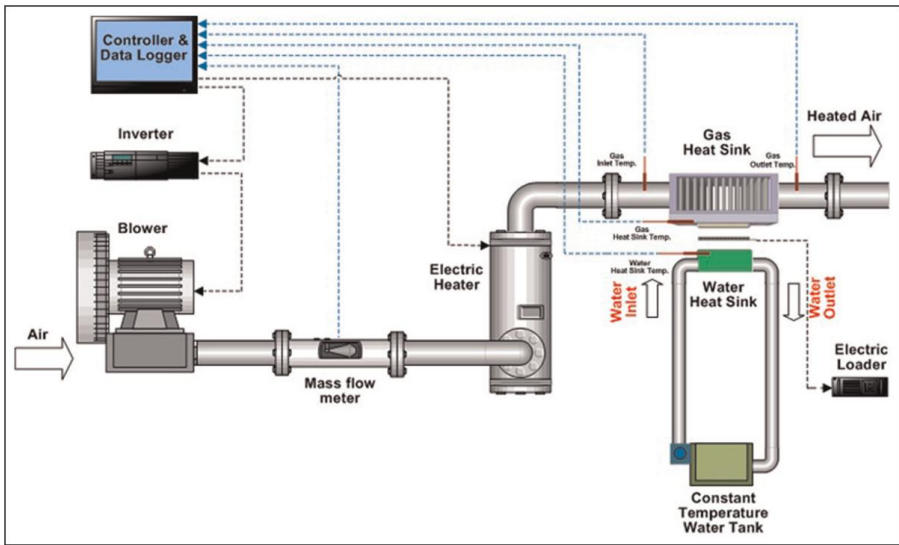
Sistem konversi energi termal ke bentuk energi yang lain, khususnya bentuk energi listrik adalah subjek dari kegiatan penelitian yang menarik terutama di bidang teknik otomotif. Subjek ini menjadi menarik karena penghematan energi, persyaratan perawatan yang rendah dan desain yang kompak. Elemen lainnya adalah peningkatan rentang temperatur kerja di atas maksimum 400 °C. Saat ini, produsen

generator termoelektrik memproduksi perangkat yang dapat beroperasi pada temperatur di atas 850 °C yang membuka peluang penelitian dan aplikasi yang berbeda. Penelitian ini membahas konsep menempatkan unit generator termoelektrik temperatur tinggi langsung ke lubang pembuangan mesin, tepat di luar kepala silinder. Solusi pengembangan baru disajikan, di mana unit generator termoelektrik baru dirancang agar dapat disesuaikan dengan profil lubang pembuangan. Analisis dinamika fluida komputasional dilakukan pada mesin dan model konsep, mengkonfirmasi perpindahan kalor yang konsisten dari ruang bakar mesin ke rakitan unit generator termoelektrik manifold di saluran buang. Pendinginan perangkat dicapai dengan aliran pendingin langsung dari kepala silinder. Bisa juga diwujudkan dengan menggunakan sistem pendingin eksternal (Royale, Simic, & Lappas, 2020).

3.6. Modul TEG pada Mesin Diesel

Menurut In dan Lee (2016) bahwa mesin otomotif memiliki efisiensi termal sekitar 30%, dan sisanya hilang sebagai panas di knalpot dan pendingin. Oleh karena itu, teknologi daur ulang untuk energi yang terbuang diperlukan untuk meningkatkan efisiensi termal mesin. Peningkatan efisiensi termal juga menyebabkan pengurangan emisi karbon dioksida. Sistem kogenerasi telah menarik perhatian sebagai teknologi yang menjanjikan untuk mengatasi peraturan emisi yang ketat dan penipisan energi. Sebuah generator termoelektrik sesuai untuk menghasilkan listrik dari limbah panas; namun, efisiensi konversinya yang rendah harus ditingkatkan. Selain itu, untuk meningkatkan efisiensi generator termoelektrik itu sendiri, perlu memaksimalkan perpindahan kalor dari sumber panas limbah ke generator termoelektrik.

Adapun set up peralatan yang dilakukan ditunjukkan pada gambar (3.11) dan kondisi peralatan uji di tabel 3.1. Peralatan uji ini menggunakan beberapa peralatan bantu, seperti blower, pemanas listrik, pipa-pipa saluran, dan alat ukur laju aliran massa udara yang diletakkan sebelum pemanas listrik setelah blower.

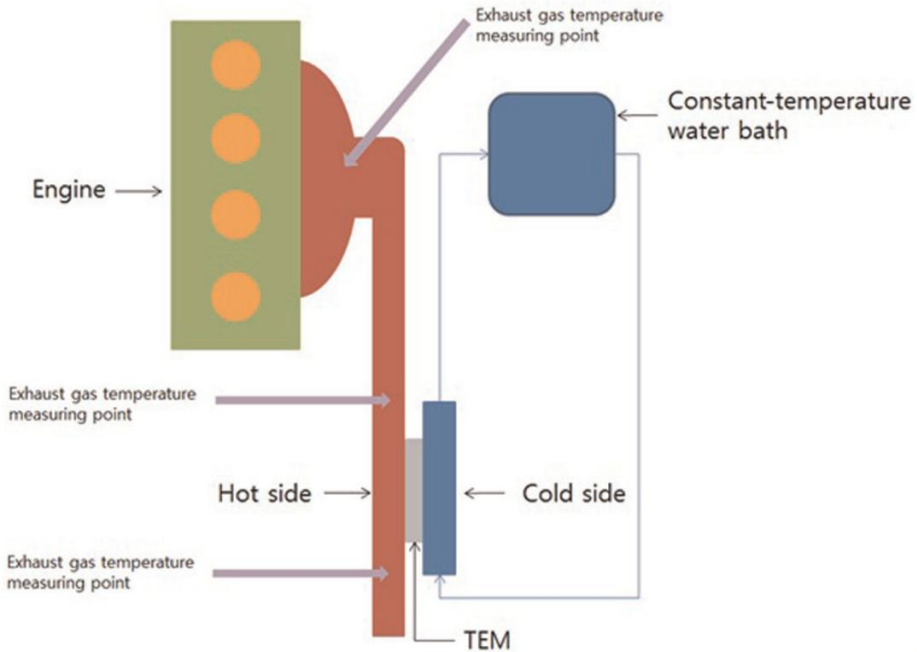


Gambar 3.11 Set Up Peralatan Uji pada Mesin Diesel (In & Lee, 2016)

Tabel 3.1 Kondisi tes peralatan uji

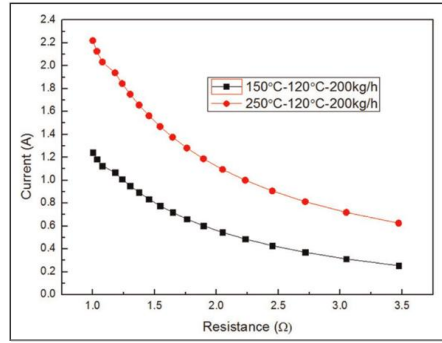
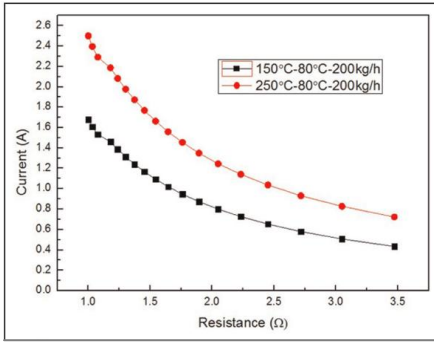
Kondisi	Nilai
Temperatur tinggi (°C)	150, 200
Temperatur rendah (°C)	80,120
Laju aliran pada temperatur tinggi (kg/h)	50,200
<i>Displacement</i>	2199 cm ³
Diameter lubang silinder	85,4 mm
Langkah	96 mm
Rasio kompresi	16
Daya maksimum (hp)	200 pada 3800 r/min
Torsi Maksimum	44,3 pada 1800 r/min

Sumber: (In & Lee, 2016)

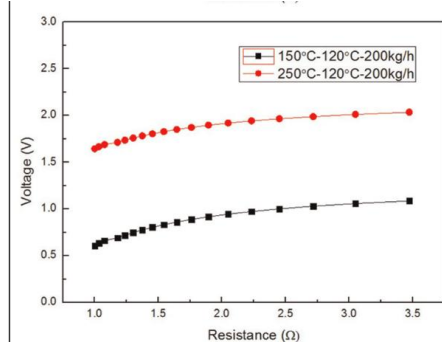
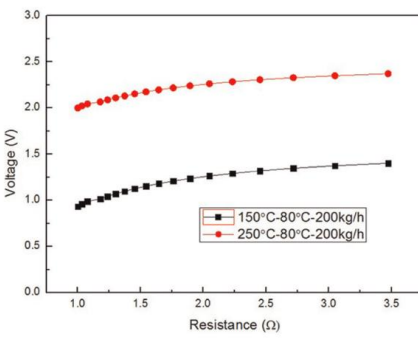


Gambar 3.12 Skematik Modul TEG pada Mesin Diesel (In & Lee, 2016)

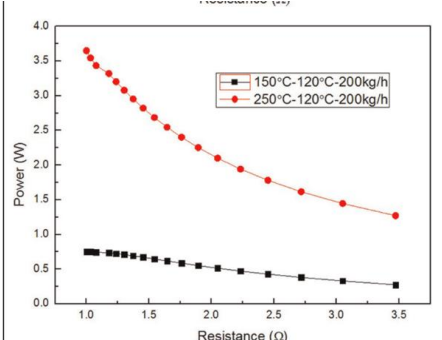
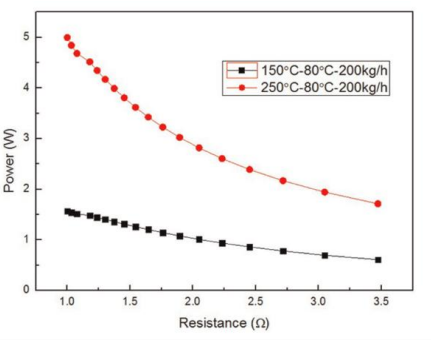
Gambar 3.13 menunjukkan perletakkan permukaan sisi dingin modul TEG pada saluran air dan permukaan sisi panas diletakkan pada bagian panas saluran gas buang dari mesin diesel. Adapun hasil dari penelitian ini dijelaskan pada gambar 3.14 sampai dengan gambar 3.16. Pengaruh tahanan listrik terhadap arus listrik, tegangan listrik, dan daya listrik yang dihasilkan pada temperatur sumber yang tinggi (150°C dan 250°C) dan temperatur rendah (80°C dan 120°C). Arus listrik menurun ketika tahanan listrik tinggi, terjadi kenaikan tegangan listrik ketika tahanan listrik tinggi, dan daya listrik menurun ketika tahanan listrik meningkat. Temperatur sumber yang lebih tinggi (250°C) memiliki kecenderungan nilai lebih besar arus listrik, tegangan listrik, dan daya listrik bila dibandingkan temperatur sumber lebih rendah (150°C). Percobaan ini dilakukan pada laju aliran massa udara yang sama, yaitu 200 kg/h .



Gambar 3.13 Karakteristik Arus dan Tahanan Listrik pada Sumber Temperatur Tinggi (150 °C dan 200 °C) dan Temperatur Rendah (80°C dan 120 °C) (In & Lee, 2016)



Gambar 3.14 Karakteristik Tegangan, Tahanan Listrik pada Sumber Temperatur Tinggi (150 °C dan 200 °C) dan Temperatur Rendah (80°C dan 120 °C) (In & Lee, 2016)



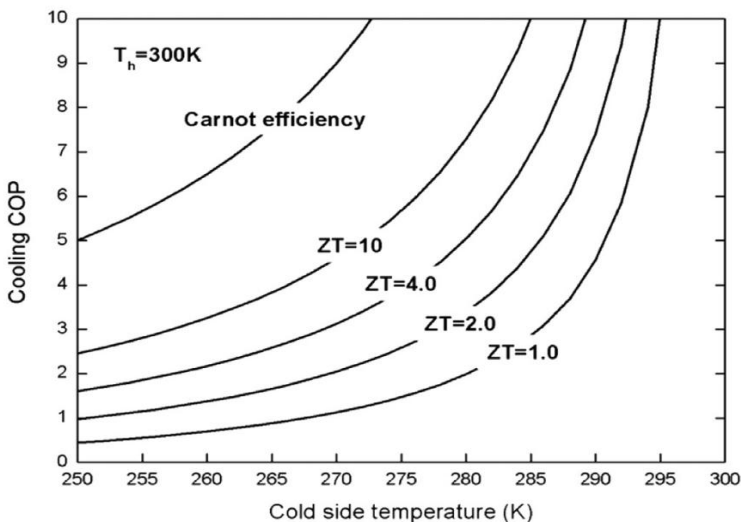
Gambar 3.15 Karakteristik Daya dan Tahanan Listrik pada Sumber Temperatur Tinggi (150 °C dan 200 °C) dan Temperatur Rendah (80°C dan 120 °C) (In & Lee, 2016)

BAB 4

THERMOELECTRIC COOLER

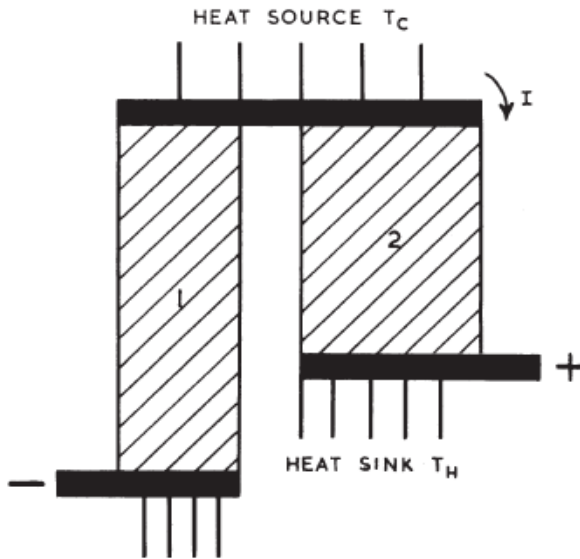
Diketahui bahwa sifat-sifat semikonduktor yang baik adalah sangat bergantung pada temperatur dan mengalami kesulitan menghindari tahanan kontak saat membuat sambungan ke bahannya. Untuk itu, dilakukan penyederhanaan dengan asumsi parameter yang relevan tidak bergantung pada temperatur dan tahanan kontaknya diabaikan.

Berdasarkan data dan penelitian, COP Carnot dan AC modul termoelektrik dengan ZT bervariasi ditunjukkan pada gambar 4.1 (Zhao & Tan, 2014). Hasil penelitian ini dilakukan pada temperatur sisi panas yang konstan $T_H = 300\text{ K}$ dan sisi dingin yang bervariasi $T_C = 250\text{ K} - 300\text{ K}$. Nilai ZT terdiri dari 1, 2, 4, dan 10. Nilai ZT dipengaruhi oleh material semi konduktor yang digunakan dalam pembuatan modul termoelektrik. Modul termoelektrik masih memiliki nilai di bawah COP Carnot tetapi kecenderungan adanya kenaikan bergantung nilai ZT nya. Untuk itu, dapat disimpulkan bahwa nilai ZT yang tinggi akan menghasilkan COP yang tinggi pula.



Gambar 4.1 COP Carnot dan Modul Termoelektrik

Gambar 4-2 memperlihatkan skematik mesin pendingin sederhana dengan termokopel tunggal dengan cabang memiliki parameter α_1 , σ_1 , k_1 dan α_2 , σ_2 , k_2 . Selanjutnya, α adalah koefisien Seebeck absolut, σ adalah konduktivitas listrik, dan k adalah konduktivitas termal. Cabang-cabangnya memiliki luas penampang A_1 dan A_2 dan memiliki panjang L_1 dan L_2 . Cabang-cabang ini bergabung dengan tautan hambatan listrik nol pada sumber panas dan sumber gaya gerak listrik yang menghasilkan arus I di *heatsink* (media pembuangan kalor secara konduksi dan konveksi). Temperatur sumber dan pembuangan kalor masing-masing adalah T_C dan T_H . Asumsi tidak ada kalor yang pindah ke atau lingkungan selain dari sumber dan *sink* atau pembuangan kalor.



Gambar 4.2. Mesin Pendingin Termoelektrik Sederhana (Goldsmid & F.Inst.P, 1964)

Koefisien kinerja atau *Coefficient of Performance* (COP) mesin pendingin didefinisikan sebagai rasio laju pendinginan dari sumber panas dengan laju pengeluaran energi listrik. Kuantitas lain yang menarik adalah perbedaan temperatur maksimum yang dapat dicapai jika tidak ada kalor yang harus dikeluarkan dari sumbernya.

Meskipun efek Peltier hanya terlihat di persimpangan antara dua konduktor, koefisien Peltier absolut (atau koefisien Seebeck) suatu bahan adalah sifat “bulk” lebih besar daripada sifat permukaan. Gambaran ini ditekankan dalam penurunan persamaan berikut ini bagi kekuatan pendinginan pasangan.

Laju aliran kalor dalam salah satu konduktor i ($i = 1$ atau 2) pada jarak x dari sumber kalor diberikan oleh persamaan (4-1).

$$q_i = \mp \alpha_i I T - k_i A_i \frac{dT}{dx} \quad (4-1)$$

T adalah temperatur absolut di atas bidang datar pada x dan aliran kalor Peltier telah dinyatakan sebagai $\alpha_i I T$ memakai hukum pertama Kelvin. Laju pembangkitan kalor per satuan panjang oleh karena pemanasan Joule dijelaskan pada persamaan (4-2).

$$\frac{I^2}{\sigma_i A_i} = -k_i A_i \frac{d^2 T}{dx^2} \quad (4-2)$$

Catatan bahwa efek-efek termoelektrik tidak meliputi persamaan ini selama laju perubahan aliran kalor Peltier sepanjang konduktor sama dengan laju kerja melawan *emf* Seebeck, di sana tidak ada efek Thomson ketika α tidak bergantung pada temperatur.

Persamaan (4-2) harus diselesaikan dengan kondisi-kondisi batas, yaitu $(T=T_C)_{x=0}$ dan $(T=T_H)_{x=l}$. Selanjutnya, menghasilkan persamaan (4-3).

$$q_i = \frac{I^2 [x - (l/2)]}{\sigma_i A_i} - \frac{k_i A_i (T_H - T_C)}{l} \quad (4-3)$$

Daya pendinginan q_c pada sumber kalor adalah jumlah kontribusi dari q_1 dan q_2 pada $x = 0$. Mengingat kembali bahwa aliran arus adalah berlawanan arah pada dua tanda kurung (diasumsikan ini bahwa pendinginan lebih baik dibandingkan pemanasan dari sumber dan $\alpha_2 > \alpha_1$).

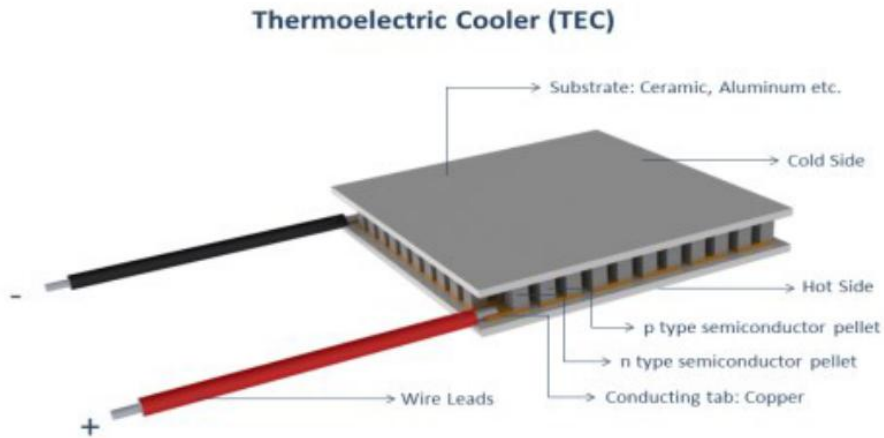
$$q_c = (\alpha_2 - \alpha_1) I T_C - \frac{I^2 R}{2} - K(T_H - T_C) \quad (4-4)$$

$$R = \frac{l_1}{A_1 \sigma_1} + \frac{l_2}{A_2 \sigma_2} \quad (4-5)$$

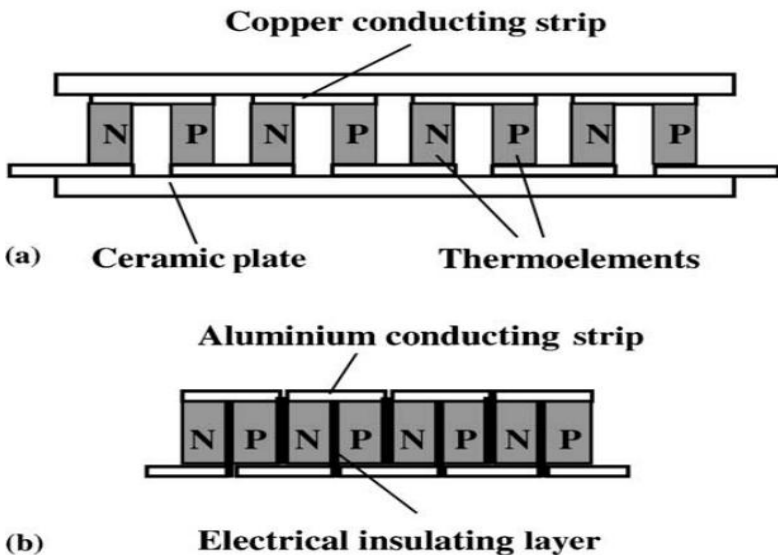
R adalah tahanan listrik total dari cabang dalam susunan seri.

$$K = \frac{A_1 k_1}{l_1} + \frac{A_2 k_2}{l_2} \quad (4-6)$$

Secara umum, adapun komponen TEC ditunjukkan pada gambar 4.3 yang terdiri dari permukaan sisi panas, permukaan sisi dingin dengan bahan keramik atau bahan yang lain, semi konduktor tipe p dan tipe n, kawat untuk arus positif dan negatif, tab konduktor berbahan tembaga.



Gambar 4.3 Komponen TEC (Salah & Abuhelwa, 2020)



Gambar 4.4 Modul TEC Berpasangan (Salah & Abuhelwa, 2020)

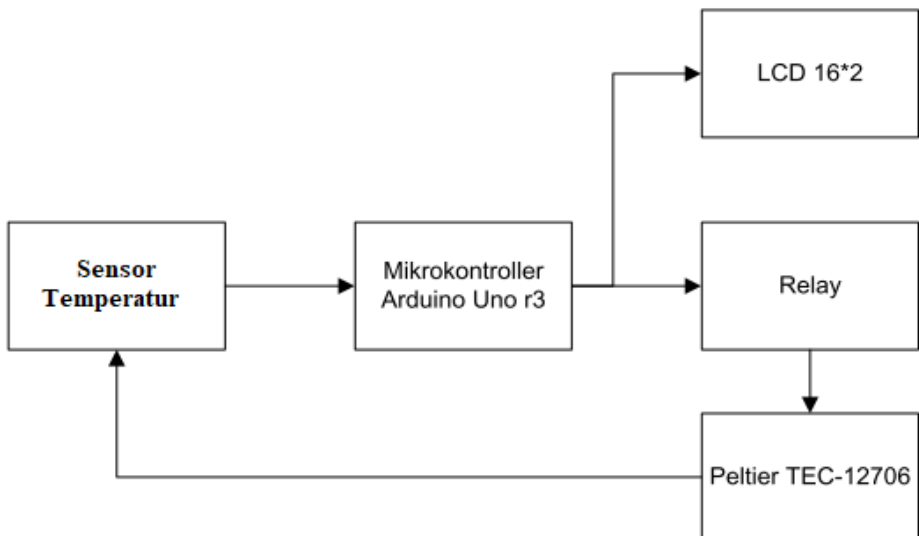
Gambar 4.4 memperlihatkan modul TEC yang dibuat berpasang-pasangan dalam upaya meningkatkan kinerjanya dan di antara semi konduktor diberi Lapisan isolator listrik untuk mencegah saling bersentuhan antara satu dengan lainnya.

4.1. Aplikasi Modul TEC pada Kotak Pendingin

4.1.1 Kotak Pendingin dengan Arduino Uno

Perkembangan teknologi yang menggunakan modul termoelektrik yang dapat menghasilkan pendinginan udara (AC) dan refrigerasi terus dikembangkan dengan tujuan untuk mendesain peralatan yang hemat energi dan ramah lingkungan. Menurut (Rumayar, 2019) bahwa modul *Thermoelectric Cooler* (TEC) dapat dimanfaatkan untuk proses pendistribusian dan penyimpanan obat-obatan, makanan dan minuman, dan lain-lain. Untuk kebutuhan yang praktis dan ringan, kadangkala sering dibutuhkan kotak pendingin yang berukuran kecil dan ringan sehingga mudah dibawa untuk perjalanan. Mendeteksi temperatur kotak pendingin yang dirancang memakai Arduino Uno sebagaimana skema desainnya ditunjukkan pada gambar 4.5.

Sensor temperatur memakai komponen *lm35* digunakan untuk mendeteksi temperatur yang dihasilkan pada bagian sisi dingin dan panas kotak sekaligus menjadi umpan balik. Arduino berfungsi mengatur *Relay* yang terhubung dengan *power supply*. Data temperatur pada bagian TEC dingin akan ditampilkan dalam LCD 16 x 2. Apabila temperatur yang terukur oleh sensor pada bagian dingin melebihi *setting point* maka sensor akan memberikan umpan balik kepada Arduino untuk memutuskan sambungan *relay* ke catu daya. Nilai *Setting point* atau referensi temperatur pada bagian pendingin adalah 10°C.

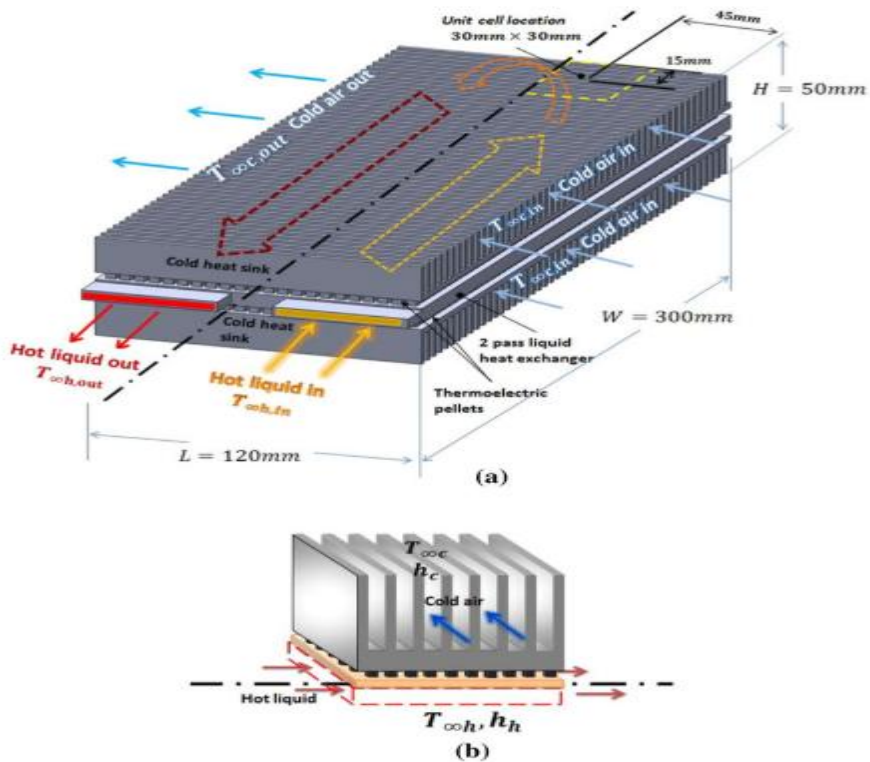


Gambar 4.5 Skema desain Kotak Pendingin dengan Monitoring Temperatur dengan Arduino Uno (Rumayar, 2019)

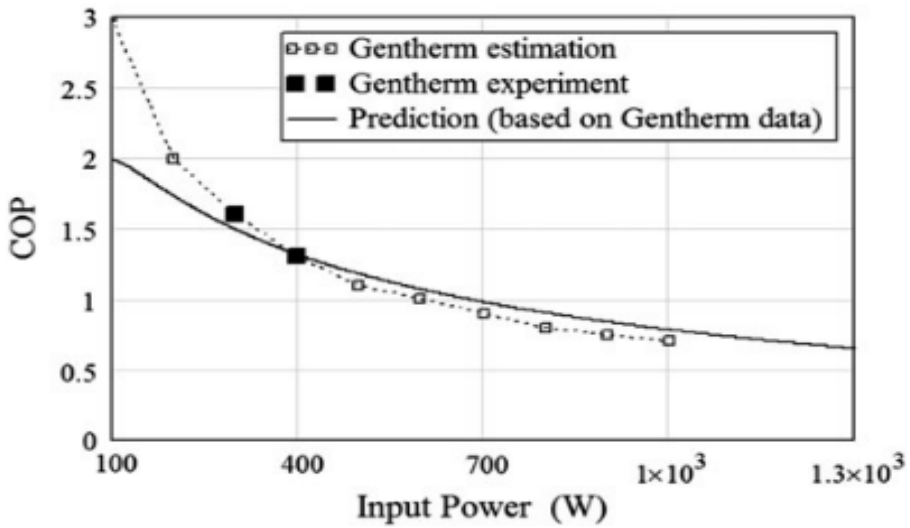
4.2. Aplikasi Modul TEC di Kendaraan

4.2.1 TEAC untuk Kendaraan

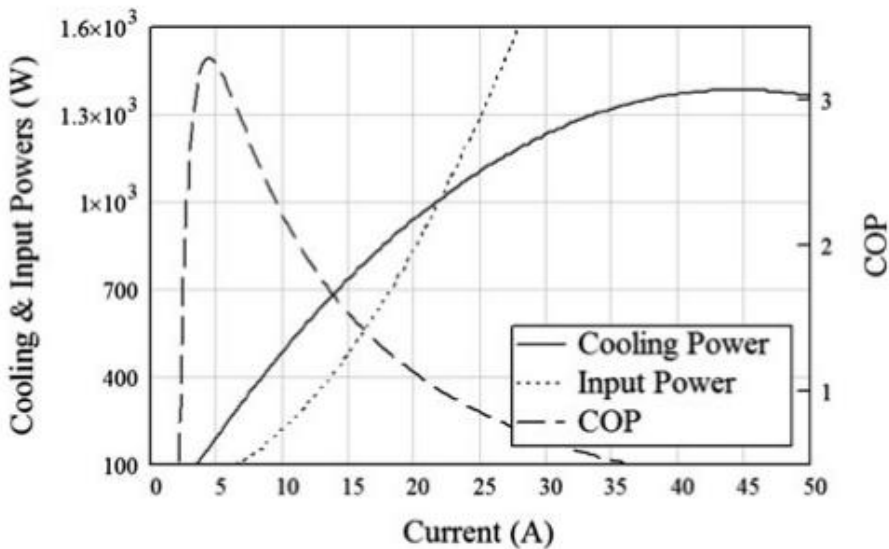
Seluruh kendaraan dilengkapi dengan sistem pendingin ruang kendaraan agar ketika berada di dalam kendaraan terasa nyaman. Menurut (Attar, Lee, & Weera, 2014) bahwa di Amerika Serikat rata-rata 10% dari konsumsi bahan bakar di kendaraan untuk sistem pendingin udara (AC) (sesuai dengan sistem pendingin udara yang dipakai) agar kabin atau ruang kendaraan dalam kondisi nyaman. Refrigeran yang paling umum dan dianjurkan di AC rumah dan mobil adalah R-134a, yang tidak memiliki sifat Freon yang merusak ozon, namun merupakan gas rumah kaca yang kuat dan kemungkinan besar ke depannya akan dilarang. Penggunaan TEAC akan terus dikembangkan untuk dapat dipakai di kendaraan. Selain itu, Fairbanks, (2008) meneliti bahwa 73% jarak tempuh kendaraan terjadi ketika pengemudi adalah satu-satunya penumpang, dan diperkirakan total daya pendinginan yang dibutuhkan untuk mendinginkan zona satu penumpang adalah sekitar 630 W, sedangkan 3,5 kW hingga 4,5 kW diperlukan untuk mendinginkan seluruh kabin. Diagram skematik TEAC ditunjukkan pada gambar 4.6.



Gambar 4.6 (a) Diagram Skematik TEAC Udara-Ke-Cair *Gentherm* dan (b) Skema Sel Unit (Attar et al., 2014)

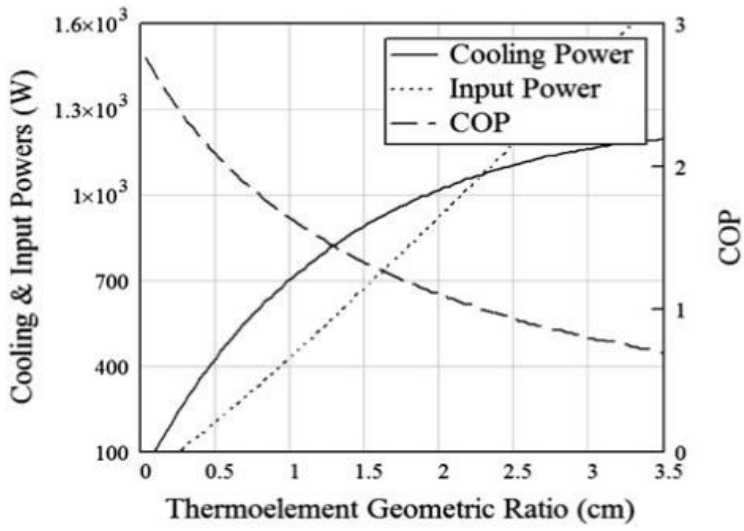


Gambar 4.7 Kurva COP Lawan Daya Masukan dengan Estimasi dan Eksprimen TEAC (Attar et al., 2014)

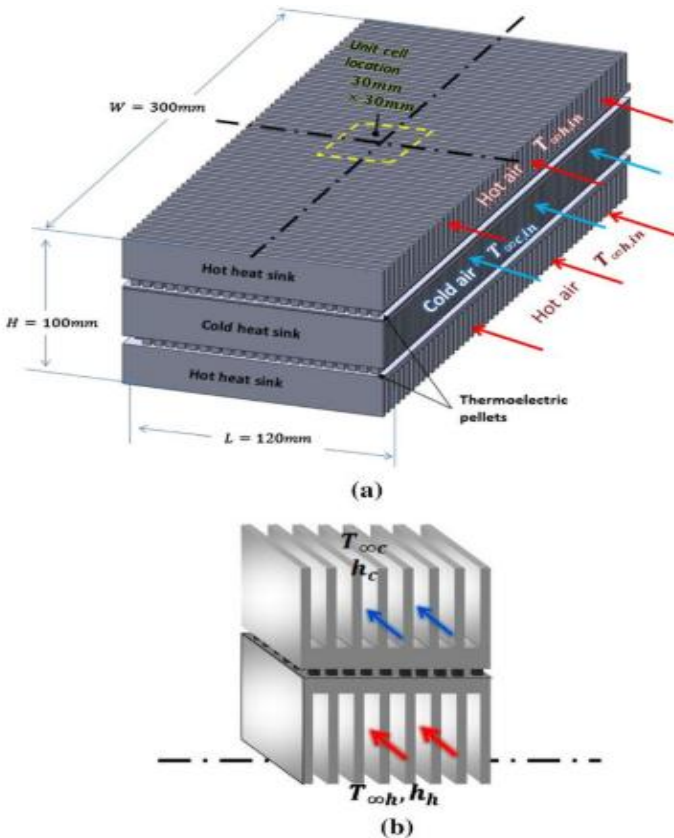


Gambar 4.8 Kurva Daya Pendingin dan Masukan Lawan Arus Listrik (Attar et al., 2014)

Sebagaimana ditunjukkan pada kurva gambar 4.8 bahwa penambahan arus (A) menaikkan daya pendingin (*cooling power*) pada arus 4 A sampai 45 A, tetapi setelah 45 A terjadi penurunan hingga 50 A. Selain itu, COP cenderung naik pada arus listrik yang kecil (< 5 A) tetapi COP menurun ketika arus listrik lebih besar 5 A sampai 35 A.



Gambar 4.9 Daya Pendingin, Masukan Daya, COP Lawan Rasio Geometrik G_e (Attar et al., 2014)

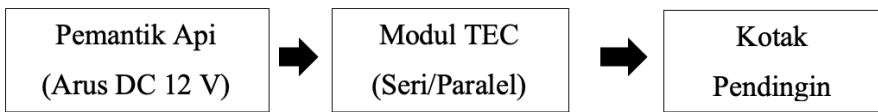


Gambar 4.10 (a) Skema TEAC Udara-ke-Udara dan (b) Skema Sel Satuan. (Attar et al., 2014)

Desain TEAC udara ke cair *Gentherm* ini memiliki peluang untuk dikembangkan sebagai pendingin kabin atau ruang di kendaraan. Mempertahankan parameter operasi dan geometri keseluruhan yang sama, desain TEAC udara-ke-cair yang dioptimalkan menunjukkan peningkatan sekitar 30% dalam COP dibandingkan dengan desain *Gentherm*. Prosedur optimasi memanipulasi masukan arus listrik berdimensi dan rasio konduktansi termal terhadap konveksi konduktansi untuk mengamati pengaruhnya pada daya pendinginan dan COP. Untuk secara bersamaan menentukan daya pendinginan dan COP yang tepat, disarankan di tengah-tengah antara daya pendinginan maksimum dan COP maksimum sebagai poin yang baik. Untuk desain TEAC, kompromi yang dapat dibenarkan terletak di suatu tempat di antara dua pasang nilai tak berdimensi optimal ini. Selain itu, TEAC udara-ke-udara yang optimal desain COP sebanding dengan desain COP TEAC udara-ke-cair dengan biaya dua kali lipat tinggi keseluruhan. Ini menunjukkan keserbagunaan desain TEAC, di mana udara dapat digunakan sebagai cairan pendingin sisi panas, tergantung pada batasan desainnya.

4.2.2 Kotak Pendingin dengan Sumber Listrik DC Kendaraan

Penelitian telah dilakukan untuk menguji aplikasi modul TEC yang dipakai untuk mendinginkan minuman kaleng dengan rangkaian seri dan paralel (Bizzy & Apriansyah, 2013). Penelitian ini dilakukan dengan memanfaatkan arus DC bagian pemantik api di kendaraan roda empat sebagaimana ditunjukkan pada skema pada gambar 4.9.

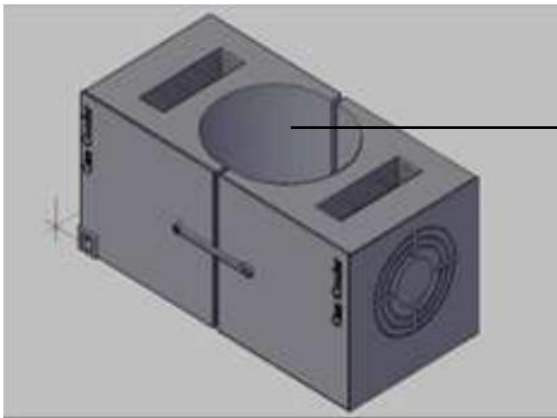


Gambar 4.11 Skema Peralatan Kotak Pendingin dengan Modul TEC (Bizzy & Apriansyah, 2013)

Gambar 4.11 memperlihatkan rangkaian tahapan mendesain kotak pendingin dengan sumber arus listrik DC diambil dari pemantik api di kendaraan roda empat dan dihubungkan ke modul TEC untuk mendinginkan kotak pendingin minuman kaleng. Desain kotak pendingin ditunjukkan pada gambar 4.10 dengan ukuran 16 cm x 8 cm x 9 cm, dan kapasitas minuman kaleng yang didinginkan adalah 330 ml. Minuman kaleng yang didinginkan hanya satu minuman kaleng saja

dengan cara meletakkan kaleng minuman di lubang yang telah disediakan.

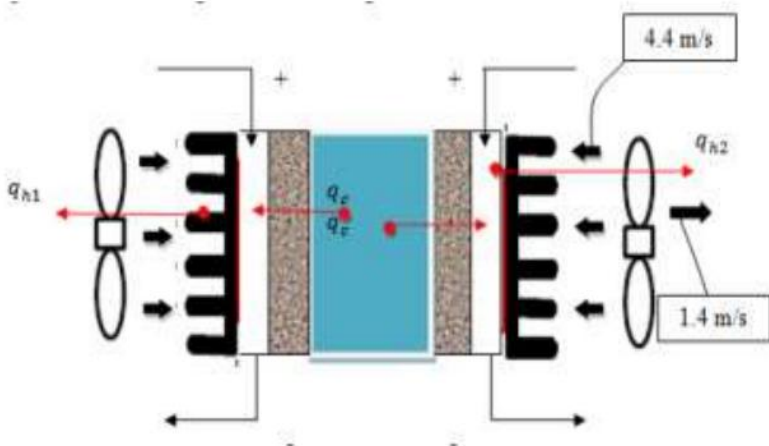
Cara kerja komponen-komponen pada kotak pendingin adalah arus listrik DC bersumber dari pemantik api kendaraan sebesar 12 V dialirkan ke elemen Peltier atau modul TEC, TEC ini yang akan mengubah listrik menjadi panas dan dingin di kedua sisi yang berbeda. Bagian sisi panas diletakkan *heat sink* berbahan alumunium yang dapat memindahkan kalor secara konduksi dan konveksi, permukaan modul TEC dihembuskan udara oleh fan dengan kecepatan udara rata-rata 4,4 m/s, sehingga terjadi perpindahan panas konveksi paksa dari permukaan *heatsink* ke udara. Sedangkan sisi dingin dari modul TEC diletakkan ke bagian kaleng yang berisi air minuman yang dapat mendinginkan air dalam kaleng dan airnya terasa segar ketika diminum.



Lubang
tempat
minuman
kaleng

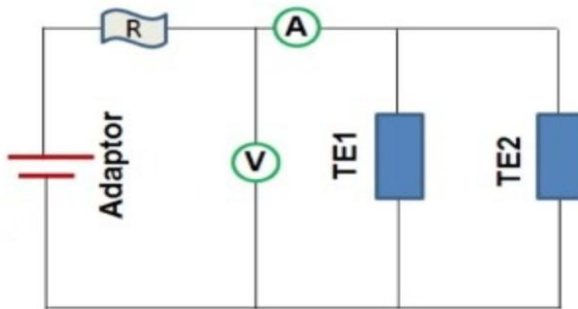
Gambar 4.12 Desain Kotak Pendingin (Bizzy & Apriansyah, 2013)

Sedangkan skema peralatan uji yang dipakai terdiri dari 2 (dua) unit fan, 2 (dua) unit *heatsink*, modul TEC, minuman kaleng, silinder berbahan alumunium seperti gambar 4.12.



Gambar 4.13 Skema Perangkat Uji (Bizzy & Apriansyah, 2013)

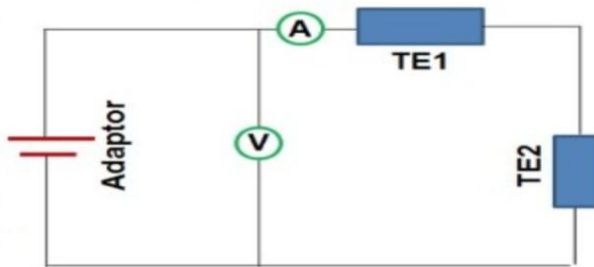
Adapun skematik rangkaian paralel dan seri modul TEC yang digunakan ditunjukkan pada gambar 4.12.



Rangkaian Paralel

(a)

Rangkaian Seri

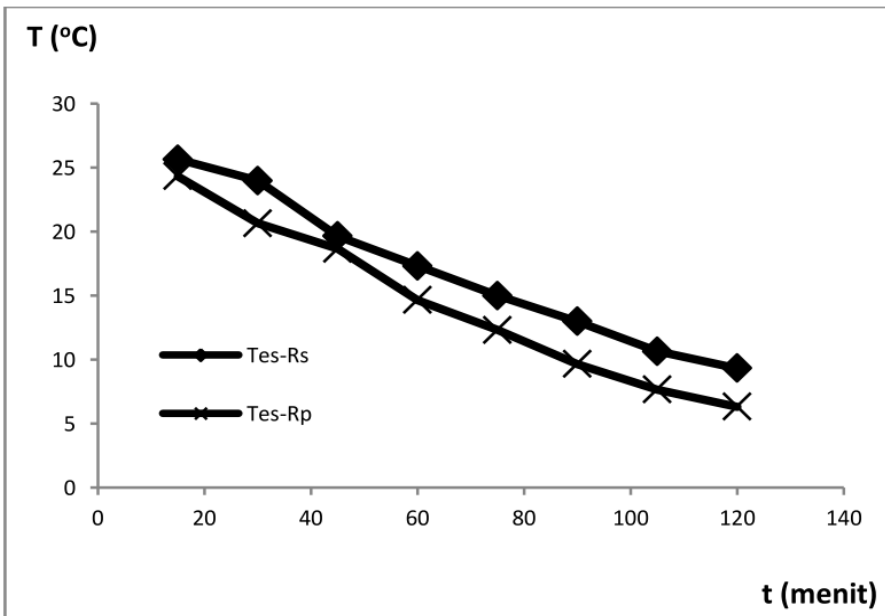


(b)

Gambar 4.14 Rangkaian Paralel dan Seri Modul Termoelektrik (Bizzy & Apriansyah, 2013)

Adaptor pada gambar 4.14 merupakan sebuah perangkat berupa rangkaian elektronika untuk mengubah tegangan listrik yang besar menjadi tegangan listrik lebih kecil, atau rangkaian untuk mengubah arus bolak-balik (arus AC) menjadi arus searah (arus DC). Pengertian adaptor di sini mengubah arus AC menjadi arus DC agar dapat digunakan pada modul termoelektrik.

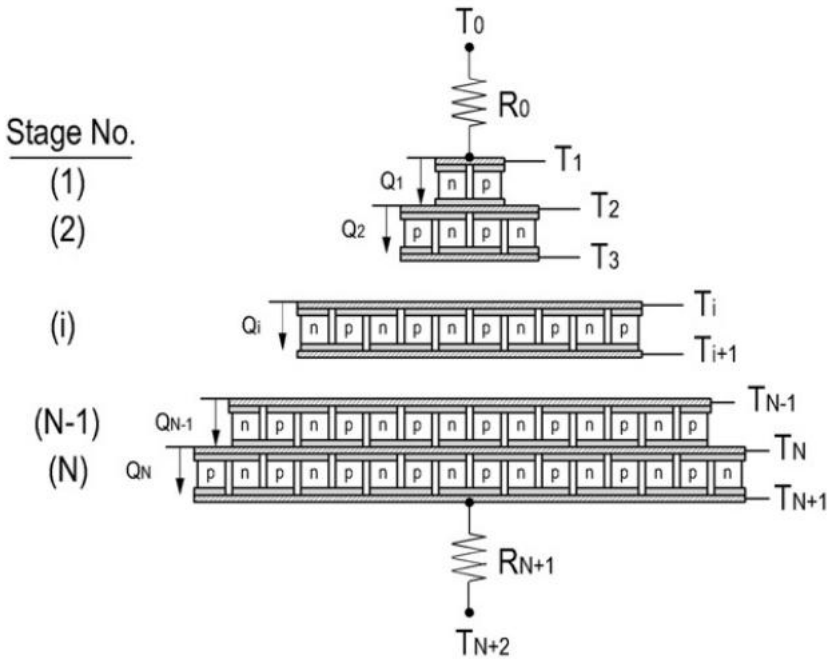
Hasil pengujian didapat penurunan temperatur air minuman kaleng sebagaimana ditunjukkan pada gambar 4.15. Pengujian dilakukan selama 120 menit mampu menghasilkan temperatur air minuman kaleng adalah 5°C.



Gambar 4.15 Penurunan Temperatur Air Minuman Kaleng dengan Rangkaian Seri dan Paralel (Bizzy & Apriansyah, 2013)

4.2.3 Modul TEC Bertingkat

Tujuan TEC dibuat bertingkat adalah untuk memperbesar perbedaan temperatur antara sumber panas dan *heatsink* dibandingkan hanya memakai satu tingkat saja. Gambar 4.16 menunjukkan modul TEC bertingkat menyerupai bentuk susunan piramida.



Gambar 4.16 Modul TEC Bertingkat (Karimi, Culham, & Kazerouni, 2011)

Distribusi temperatur dan fluks kalor pada batas *cascade* diatur oleh sistem persamaan berikut yang diturunkan berdasarkan kekekalan energi dan kondisi batas yang sesuai.

$$Q_0 = (T_0 - T_1)/R_0 \quad (4-1)$$

$$Q_0 = m(\beta T_1 - \gamma - K(T_2 - T_1)) \quad (4-2)$$

$$Q_1 = m(\beta T_2 + \gamma - K(T_2 - T_1)) \quad (4-3)$$

$$Q_1 = \zeta m(\beta T_2 - \gamma - K(T_2 - T_1)) \quad (4-4)$$

$$Q_i = \xi^{i-1} m(\beta T_{i+1} - \gamma - K(T_{i+1} - T_i)) \quad (4-5)$$

$$Q_i = \xi^i m(\beta T_{i+1} - \gamma - K(T_{i+2} - T_{i+1})) \quad (4-6)$$

$$Q_N = \xi^{N-1} m(\beta T_{N+1} - \gamma - K(T_{N+1} - T_N)) \quad (4-7)$$

$$Q_N = (T_{N+1} - T_{N+2})/R_{N+1} \quad (4-8)$$

di mana: $\beta = \alpha l$; $\gamma = \frac{\mathcal{R}l^2}{2}$; $K = \frac{\kappa_{np} A_{np}}{l_{np}}$

dan $\alpha = \alpha_p - \alpha_n$; α_p dan α_n adalah koefisien-koefisien Seebeck dari semi konduktor tipe p dan untuk masing-masing element refrigerasi termoelektrik, dan κ_{np} , A_{np} , dan l_{np} adalah konduktivitas termal, luas penampang, dan panjang masing-masing *junction* tipe p dan n. Q_i adalah laju perpindahan kalor antara dua tingkat berturut-turut dalam sistem.

Persamaan (4-1) sampai (4-8) terdiri dari persamaan linier $2N + 2$ yang berkaitan dengan temperatur-temperatur yang tidak diketahui T_i ($i=1,2,3, \dots, N+1$) dan laju perpindahan kalor Q_i ($i=0,1,2,3, \dots, N$). Untuk masing-masing parameter-parameter awal $\mathcal{O}, \zeta, \alpha, \mathcal{R}, l, T_o$ (target temperatur pendingin) dan T_{N+2} (temperatur ambien), R_o dan R_{N+1} (tahanan termal pada sisi dingin dan panas), sistem memiliki sebuah solusi yang unik. Sebuah balans energi pada sebuah volume atur sekeliling tingkat modul menunjukkan bahwa laju kerja listrik yang dilakukan pada masing-masing tingkat sama dengan persamaan (4-9).

$$P_i = m(\beta \Delta T_i + \gamma) \quad (4-9)$$

P_i adalah daya input dan ΔT_i adalah beda temperatur per tingkat i . $P_i \geq 0$ untuk modul TEC. Hubungan tegangan untuk masing-masing tingkat dapat dihitung dalam bentuk persamaan (4-10).

$$V_i = \frac{P_i}{I} \quad (4-10)$$

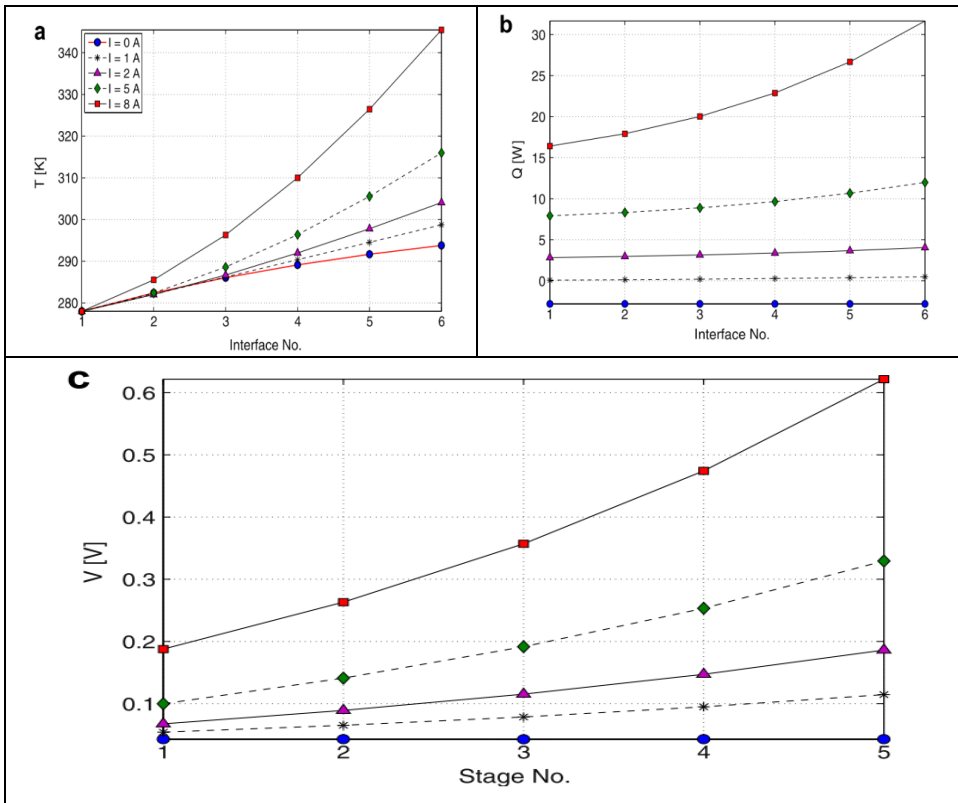
Permasalahan adalah mencari jumlah tingkat, nilai koefisien geometri, dan arus (N , ζ , dan I) agar dapat mencapai unjuk kerja terbaik untuk sistem TEC.

Hasil penelitian telah menunjukkan sifat-sifat TEC dan kondisi-kondisi perencanaan sistem seperti pada Tabel 1.

Tabel 4.1. Sifat-sifat TEC dan Kondisi-Kondisi Perencanaan Sistem

p-n Junction	
α	$401,3 \times 10^{-6} \text{V K}^{-1}$
\mathcal{R}	$0,00118 \Omega$
K	$0,02625 \text{W K}^{-1}$
Sistem	
A_S	5mm^2
R_0	0K W^{-1}
R_{N+1} atau R_{HS}	$1,5 \text{K W}^{-1}$
T_o	278K
T_{N+2} atau T_{amb}	298K
I	$0-8 \text{A}$

Sumber: (Karimi et al., 2011)

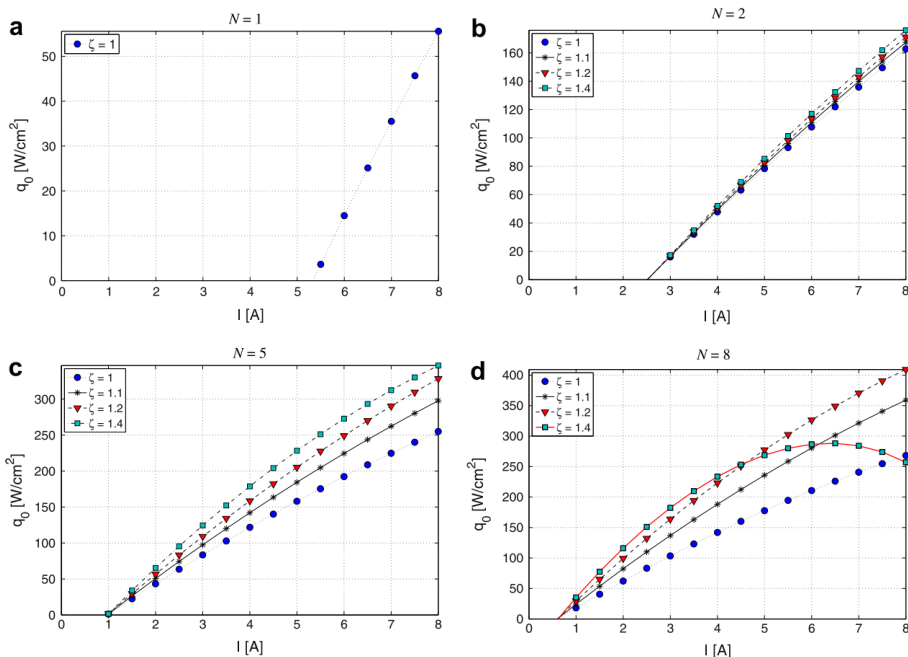


Gambar 4.17 Variasi (a) Distribusi Temperatur, (b) Laju Perpindahan Kalor, (c) Tegangan, Jumlah Tingkat Modul TEC (Karimi et al., 2011)

COP maksimum adalah penting untuk desain dan aplikasi modul TEC. COP menyeluruh untuk modul TEC bertingkat dihitung berdasarkan persamaan (4-11).

$$COP = \frac{Q_o}{\sum_{i=1}^N P_i} \tag{4-11}$$

Q_o adalah laju perpindahan kalor target pendinginan dan P_i adalah daya masukan untuk setiap tingkat modul TEC.



Gambar 4.18 Variasi Fluks Kalor Target Pendinginan dengan Aplikasi pada Arus dan Geometri Satu dan Multi Tingkat Modul TEC (Karimi et al., 2011)

Penelitian modul TEC bertingkat ini telah meningkatkan unjuk kerja COP sehingga dapat menjadi dasar dalam penelitian pengembangan.

BAB 5

KOTAK PENDINGIN MINI

5.1 Pendahuluan

Indonesia merupakan negara beriklim tropis yang hanya memiliki dua musim, yaitu musim kemarau dan musim hujan. Setiap musim menyebabkan kondisi ruangan terasa lebih panas pada saat musim kemarau dan terasa lebih dingin pada saat musim hujan. Pesatnya perkembangan teknologi di dunia mengakibatkan munculnya inovasi-inovasi baru dan penerapan teknologi yang menunjang kehidupan manusia. Untuk itu, telah mendorong para peneliti mengembangkan teknologi yang mampu mengurangi pemakaian listrik dan ramah lingkungan untuk mendukung konservasi energi dan mengurangi pencemaran lingkungan.

Salah satu teknologi yang terus dikembangkan adalah modul termoelektrik. Modul ini dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan. Bila modul ini memanfaatkan efek Seebeck, modul ini berfungsi sebagai generator yang menghasilkan listrik. Sebaliknya, bila modul ini berfungsi sebagai motor akan menghasilkan pada permukaan modul, yaitu permukaan sisi panas dan dingin.

Mesin pendingin atau refrigerasi adalah suatu mesin konversi energi yang digunakan untuk memindahkan kalor dari dalam ruangan ke luar ruangan untuk menjadikan temperatur ruangan tersebut menjadi lebih rendah dari temperatur sebelumnya sehingga menghasilkan temperatur yang diinginkan. Mesin pendingin yang berjenis kompresi uap dan mesin pendingin absorpsi sudah banyak digunakan. Mesin pendingin yang digunakan pada saat ini hampir semuanya menggunakan *refrigeran* sebagai media pembawa kalor. Kelemahan dari *refrigeran* sendiri memiliki kandungan HFC (*hydroflourocarbon*) yang tidak ramah lingkungan. Walaupun tidak mengandung senyawa yang dapat menimbulkan kerusakan lapisan ozon (*Ozon Depleting Substances*) atau ODS tetapi untuk potensi pemanasan global (*Global*

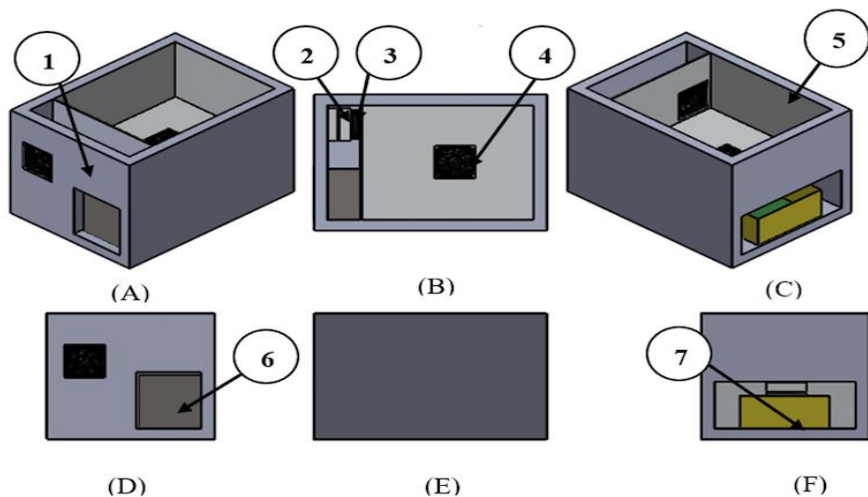
warming potential) atau GWP masih tinggi. Selain itu, senyawa ini masih memiliki harga yang relatif mahal. Pemanasan global dan harganya yang relatif mahal membuat mesin refrigerasi terus diteliti dan salah satunya memakai modul *thermoelectric Cooler* (TEC) untuk menggantikan mesin refrigerasi konvensional. Modul TEC ini tidak memakai refrigeran dan kompresor sehingga ramah lingkungan dan hemat energi.

Prinsip kerja yang digunakan pada TEC adalah menggunakan efek Peltier. Efek ini disebabkan dua logam yang berbeda disambungkan kemudian dialirkan arus listrik pada sambungan tersebut maka akan terjadi fenomena pompa kalor, yaitu menghasilkan permukaan sisi panas dan dingin. Setiap sisi pada TEC memiliki perbedaan temperatur yang signifikan. Sisi dingin digunakan untuk mendinginkan udara sehingga tidak perlu lagi menggunakan kompresor pendingin seperti mesin pendingin konvensional. Walaupun demikian, pendingin termoelektrik masih memiliki kekurangan, yaitu temperatur dingin yang dibutuhkan dipengaruhi oleh pembuangan kalor di sisi panas TEC, jika pembuangan kalor pada sisi panas TEC tidak maksimal maka pendinginan pada sisi dingin juga tidak maksimal.

5.2 Rancang Bangun Kotak Pendingin

Rancang bangun kotak pendingin ini telah dirancang oleh bimbingan tugas akhir mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya sebagaimana ditunjukkan pada gambar 5.1 (Apriyan & Bizzy, 2021). Bahan kotak pendingin adalah *Styrofoam* (1), dan peralatan pendukung lainnya terdiri dari Modul TEC (2), *Heatsink* (3) digunakan untuk menambah laju perpindahan kalor, Fan (4) digunakan sebagai tambahan untuk meningkatkan laju perpindahan kalor yang diletakkan di *heatsink*, *Aluminum Foil* (5) digunakan sebagai isolator agar tidak ada kalor yang masuk dan ke luar ruang kotak pendingin, *Power Supply* (6), dan Kotak berisi air (7).

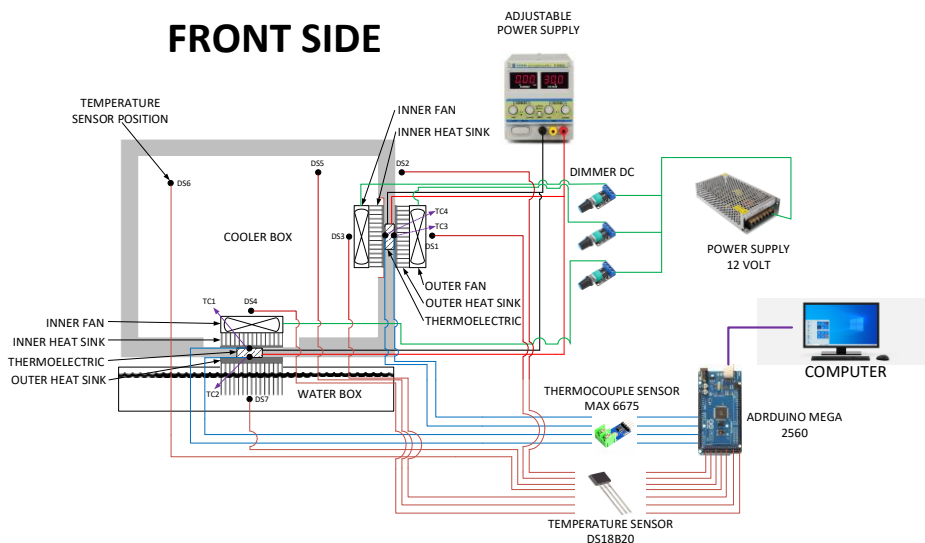
Ukuran kotak pendingin yang dirancang adalah 33,7 cm x 27,5 cm x 7,5 cm. Media pendingin untuk permukaan sisi panas modul TEC memakai 2 (dua) metode media pendingin, yaitu media pendingin air dan udara. Untuk media pendingin air tidak memakai pompa, dengan kata lain air tidak dialirkan, air dalam kondisi diam. Pemasangan modul TEC pada dinding (memakai media pendingin udara) dan dasar kotak pendingin (memakai media pendingin air).



Gambar 5.1 Rancang Bangun Kotak Pendingin (Apriyan & Bizzy, 2021)

5.3 Data Pengukuran

Pengambilan data pengukuran menggunakan perangkat tipe Arduino Mega Atmega 2560 dikarenakan memiliki kemampuan untuk banyak sensor dan hasilnya dihubungkan ke komputer PC atau laptop. Skema peralatan uji dan pengambilan data ditunjukkan pada gambar 5.2.



Gambar 5.2 Skema Peralatan Uji dan Pengambilan Data Uji Kotak Pendingin

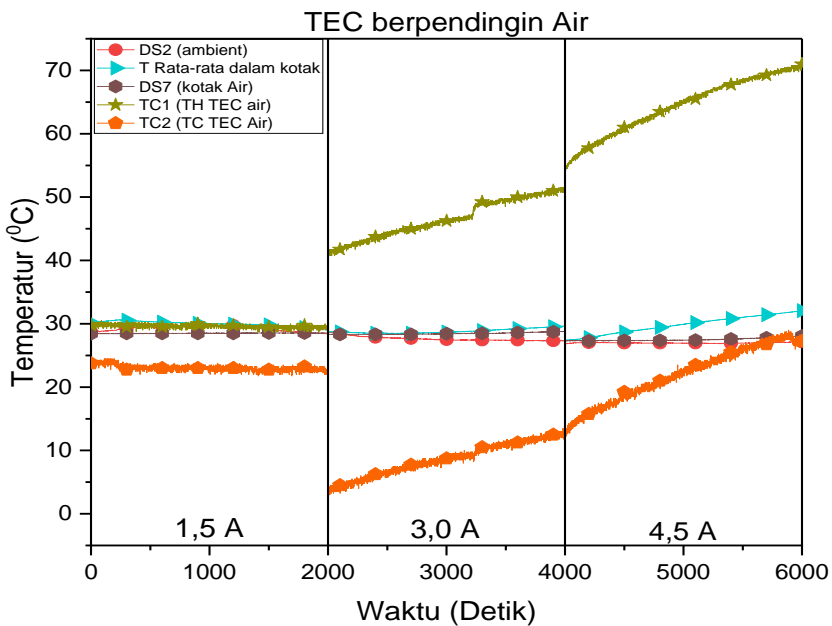


Gambar 5.3 Arduino Mega 2560

Perangkat Arduino Mega 2560 adalah papan mikrokontroler berbasis ATmega 2560. Perangkat ini memiliki 54 pin input/output digital (15 diantaranya dapat digunakan sebagai output PWM), 16 input analog, 4 UART (port serial perangkat keras), osilator kristal 16 MHz, koneksi USB, colokan listrik, *header* ICSP, dan tombol reset.

5.4 Hasil Penelitian

Berdasarkan penelitian yang dilakukan dihasilkan beberapa data sebagaimana ditunjukkan pada grafik hasil yang dijelaskan berikut ini.

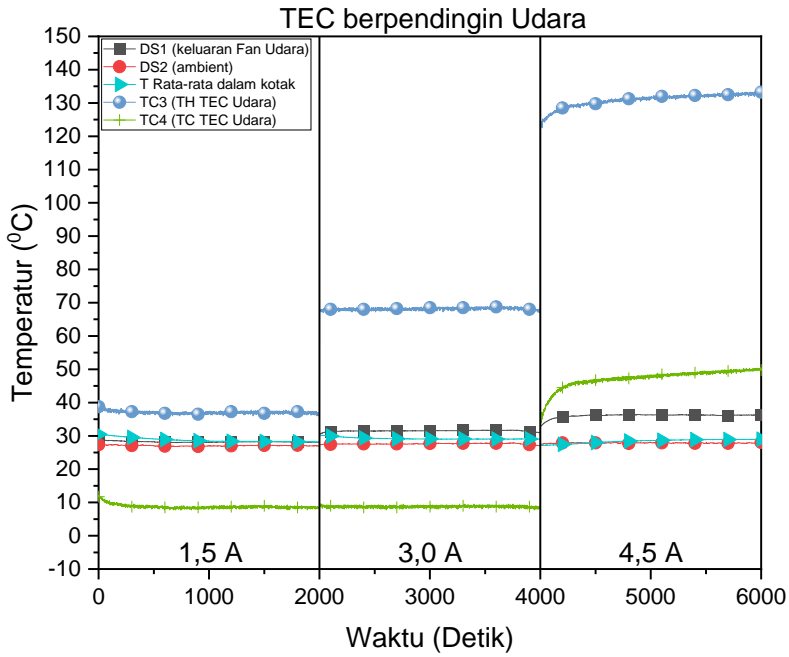


Gambar 5.4 Grafik Temperatur dan Waktu Pendinginan Air

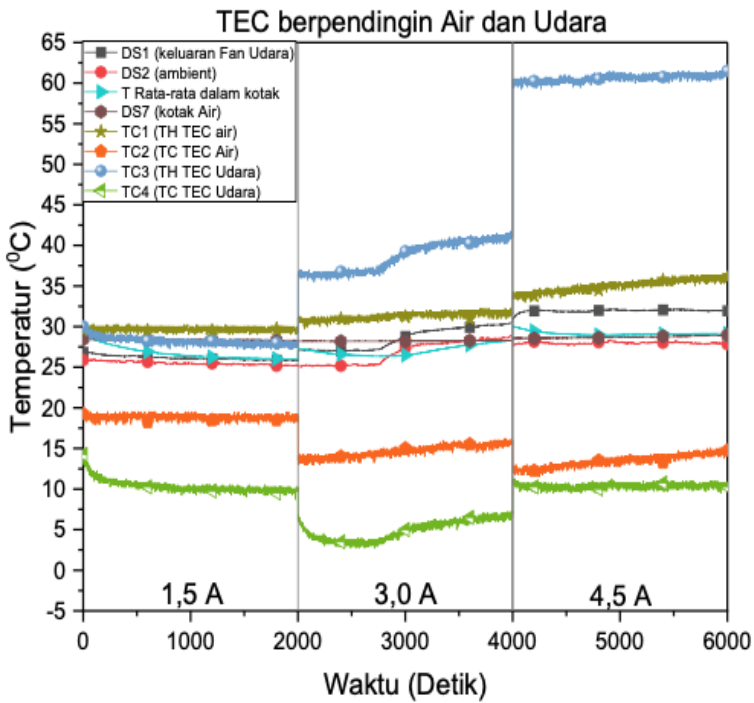
Pendinginan air pada permukaan sisi panas modul TEC telah terjadi peningkatan temperatur pada permukaan sisi dingin TEC (TC2) dengan variasi arus masuk sebesar 3,0 A dan 4,5 A. Air sebagai media pendingin permukaan sisi panas dalam kondisi diam tidak bergerak atau tidak dialirkan. Untuk pengambilan data pada arus 1,5 A, permukaan sisi dingin TEC (TC2) tidak mengalami kenaikan dikarenakan beda temperatur antara temperatur air dan sisi panas TEC (TC1) masih cukup kecil sebesar 1°C. Nilai c_p (*Specific Heat*) air tinggi menyebabkan permukaan sisi panas TEC (TC1) masih bisa dikontrol dengan baik agar tidak terlalu tinggi temperturnya atau dengan kata lain mendekati temperatur air (DS7). Variasi 3,0 A dan 4,5 A menunjukkan hasil temperatur permukaan sisi panas TEC (TC1) mengalami kenaikan secara *linier* disebabkan karena air sudah maksimal dalam menyerap panas dari permukaan sisi panas TEC (TEC1), terlihat pada grafik temperatur air yang semakin lama semakin naik.

Temperatur rata-rata dalam kotak pendingin mengikuti temperatur sisi dingin TEC (TC2), Jika temperatur sisi dingin semakin lama semakin naik maka temperatur rata-rata dalam kotak juga mengalami kenaikan. Sebagai conotoh, pada arus masuk 3,0 A dan 4,5 A memiliki kenaikan temperatur rata-rata di dalam kotak. Dari ketiga variasi arus tersebut temperatur rata-rata dalam kotak pendingin yang terkecil pada variasi 3,0 A sebesar 28,8°C. Untuk variasi 1,5 A dan 4,5 A terjadi kenaikan temperatur yang signifikan dalam kotak pendingin rata-rata masing-masing adalah 29,9°C dan 29,8°C. Arus yang diberikan terhadap modul TEC akan mempengaruhi perubahan temperatur permukaan sisi panas dan dingin modul TEC tersebut. Untuk itu, diperlukan mengisolasi secara baik kotak pendingin agar tidak ada energi dalam bentuk kalor yang masuk dan ke luar kotak pendingin. Dalam penelitian ini telah dilakukan pengisolasian kotak pendingin dengan *aluminum foil* sehingga diasumsikan telah diisolasi dengan baik.

Selanjutnya, grafik pada gambar 5.5 menunjukkan hasil penelitian modul TEC dengan pendinginan udara. Terlihat data temperatur udara, ambien, rata-rata temperatur dalam kotak, TEC sisi panas, TEC sisi dingin.



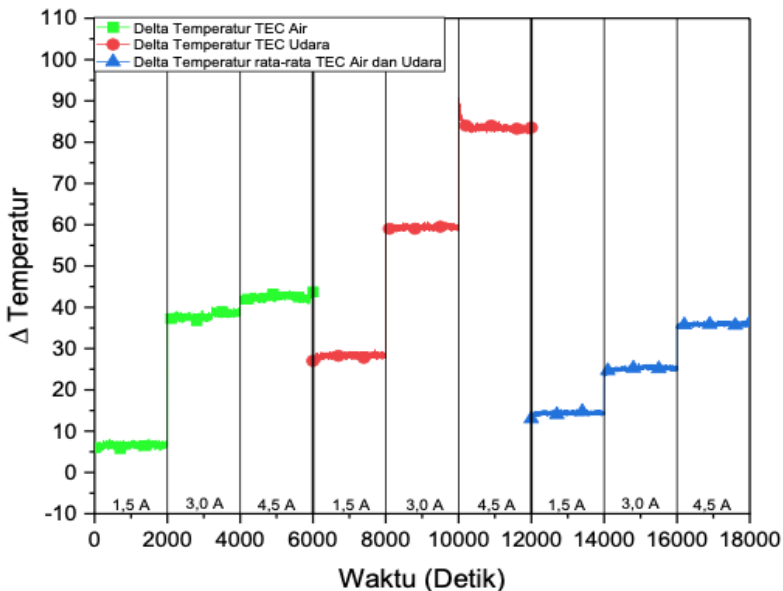
Gambar 5.5 Grafik Temperatur dan Waktu Pendinginan Udara



Gambar 5.6 Grafik Temperatur dan Waktu Pendinginan Air dan Udara

Pendinginan permukaan sisi panas TEC menggunakan air dan udara terdiri dari 2 (dua) modul TEC dengan spesifikasi yang sama, yaitu TEC1-12706 yang masing-masing modul TEC ditempatkan pada posisi vertikal (di dinding kotak pendingin), dan pada posisi mendatar (di dasar kotak pendingin). Arus listrik yang masuk ke masing-masing modul TEC adalah diatur secara paralel sehingga masing-masing modul TEC menerima sebagian dari total arus yang masuk, yaitu 0,75 A, 1,5 A, dan 2,25 A.

Hasil penelitian menunjukkan temperatur rata-rata kotak pendingin 26,7°C (pada arus listrik 1,5 A), 27°C (pada arus listrik 3,0 A), dan 29°C (pada arus listrik 4,5 A). Beda temperatur permukaan modul TEC (media udara) sebesar 3°C (pada arus listrik 3,0 A), beda temperatur permukaan modul TEC (media air) sebesar 12°C (pada arus listrik 3,0 A).



Gambar 5.7 Grafik Beda Temperatur Permukaan Sisi Panas dan Dingin terhadap Waktu Modul TEC

Grafik gambar 5.7 memperlihatkan beda temperatur tertinggi dan terendah permukaan sisi panas dan dingin modul TEC untuk masing-masing kondisi pengujian terdiri dari 83°C pada arus listrik 4,5 A dan 6°C pada arus listrik 1,5 A. Modul TEC yang didinginkan menggunakan air pada permukaan sisi panas mengalami kenaikan yang cukup tinggi dari arus 1,5 A, 3,0 A, dan 4,5 A.

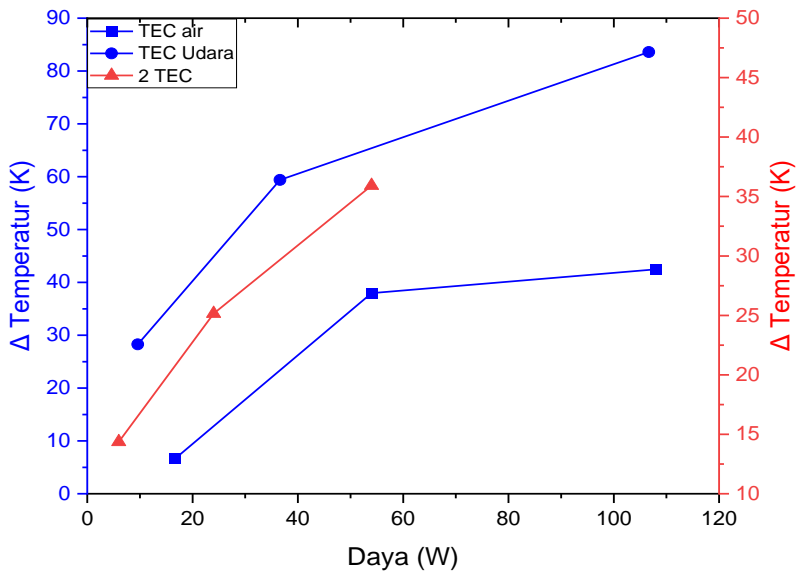
Beda temperatur modul TEC merupakan beban bagi daya listrik P (dalam satuan Watt = W atau J/S) yang dihasilkan. Persamaan (5-1) menunjukkan ketika terjadi kenaikan beda temperatur TEC (beda temperatur pada permukaan sisi panas dan dingin) akan berpengaruh terhadap meningkatnya tegangan listrik V (dalam satuan Volt=V). Untuk itu, berdasarkan penelitian terhadap modul TEC didapat pengaruh beban atau beda temperatur terhadap tegangan listrik (lihat tabel 5.1).

$$P = I.R = I.V \text{ (W)} \tag{5-1}$$

Tabel 5.1 Pengaruh Beda Temperatur (beban) terhadap Tegangan Listrik

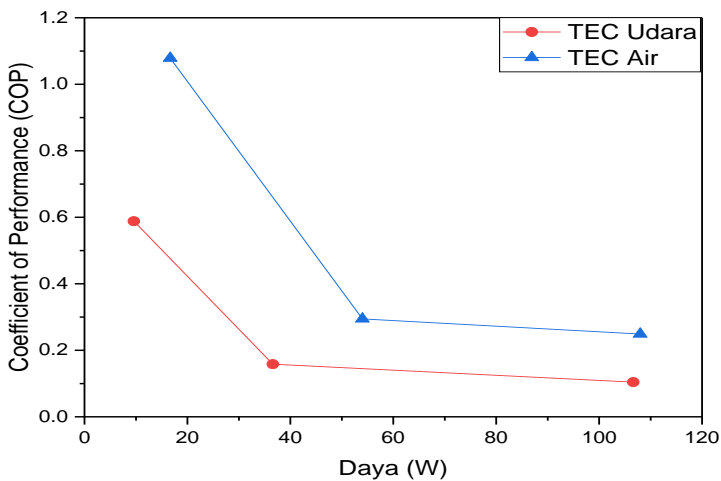
Pengujian	Daya (W)	Arus (A)	Tegangan (V)	Beda Temperatur (ΔT) °C/Beban
2 TEC (Media udara dan air), paralel	6	1,5	4	14,36
	24	3,0	8	25,15
	54	4,5	12	35,92
1 TEC (Media udara)	9,6	1,5	6,4	28,27
	36,6	3,0	12,2	59,38
	106,65	4,5	23,7	83,59
1 TEC (Media air)	16,65	1,5	11,1	6,61
	54	3,0	18	37,96
	108	4,5	24	42,45

Arus listrik I (A) yang dialirkan ke modul TEC akan menyebabkan beda temperatur permukaan sisi panas dan dingin TEC meningkat. Apabila permukaan sisi panas ditambahkan *heatsink* (bahan dari logam yang mampu meningkatkan laju perpindahan kalor) dan fan (peningkatan laju perpindahan kalor secara paksa) atau tanpa fan (perpindahan kalor konveksi bebas) menyebabkan peningkatan beda temperatur modul TEC tersebut. Peningkatan beda temperatur ini sebagai peningkatan beban listrik. Ketika arus listrik I (A) yang dialirkan ke modul TEC konstan dengan menggunakan sebuah regulator, terjadi peningkatan tegangan listrik pula (gambar 5.8). Terlihat daya tertinggi pada TEC memakai media pendingin air dibandingkan TEC memakai media udara dan 2 TEC masing-masing memakai media udara dan air dialirkan listrik secara paralel (1,5 A / 2, 3,0 A / 2, dan 4,5 A / 2).



Gambar 5.8 Grafik Beda Temperatur dan Daya

Selanjutnya, unjuk kerja modul TEC ini atau dikenal sebagai *Coefficient of Performance* (COP) dihitung berdasarkan rasio antara laju perpindahan kalor permukaan sisi dingin (\dot{Q}_c) dan daya listrik (P_{in}) yang dialirkan ke modul TEC.



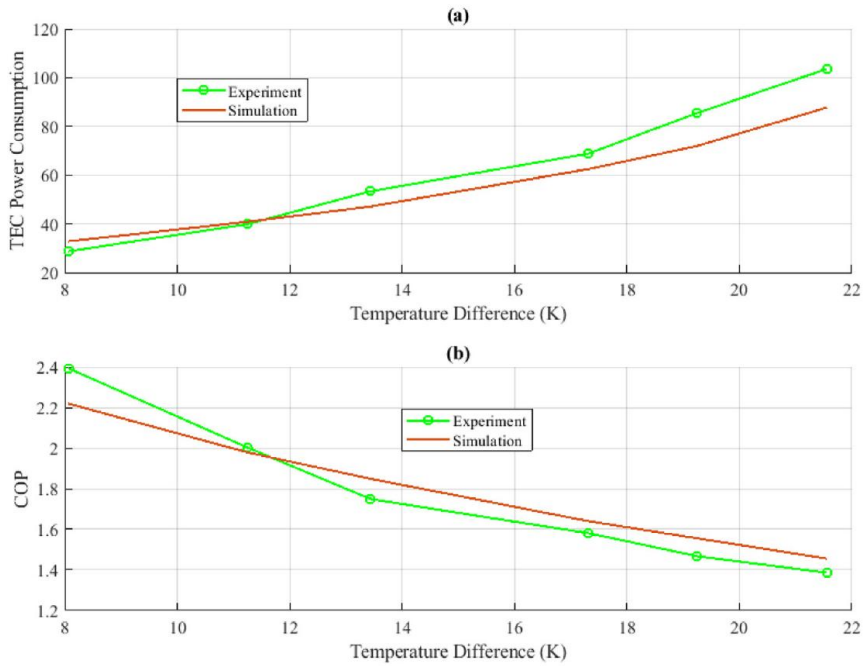
Gambar 5.9 COP dan Daya Listrik Masuk TEC Air dan TEC Udara

Gambar 5.9 menunjukkan perbandingan antara COP dan daya listrik yang masuk ke dalam modul TEC pada pengujian TEC berpendingin air dan TEC berpendingin udara. Terlihat bahwa nilai COP tertinggi sebesar 1,07 dengan daya listrik yang masuk ke modul TEC 16,6W pada pengujian modul TEC menggunakan media pendingin permukaan sisi panas modul berupa air, sedangkan pengujian TEC dengan media pendingin permukaan sisi panas menggunakan udara memiliki nilai lebih rendah yaitu 0,58 dengan daya listrik yang masuk ke modul sebesar 9,6W.

Nilai COP terendah terjadi pada pengujian TEC menggunakan media pendingin udara pada permukaan sisi panas, yaitu $COP = 0,1$ dengan daya listrik yang masuk sebesar 106W. Grafik pada gambar 5.9 memiliki kecenderungan nilai COP semakin rendah jika daya listrik yang masuk semakin besar dikarenakan bahan semikonduktor modul TEC yang memiliki batasan dalam penyerapan kalor pada permukaan sisi dingin modul TEC. Dari kedua pengujian tersebut didapat bahwa pengujian TEC menggunakan media pendingin air pada sisi panas lebih baik daripada pengujian TEC menggunakan media pendingin udara pada sisi panas karena nilai COP pengujian TEC dengan pendingin air selalu lebih tinggi dari pengujian TEC dengan pendingin udara pada setiap daya listrik yang masuk ke modul TEC.

Menurut hasil penelitian bahwa COP dari TEC memiliki nilai lebih dari 1 baik secara pengujian eksperimen dan simulasi matematis sehingga penelitian yang dilakukan oleh Dian (2021) ini mendekati dengan yang dilakukan peneliti lain (Kwan, Zhao, Liu, Xi, & Pei, 2020). Berikut penjelasan hasil penelitian oleh Kwan, dkk (2020).

Gambar 5.10 memperlihatkan hasil penelitian Kwan et.al (2020) yang telah menghasilkan data secara eksperimen dan simulasi. Beda temperatur (K) berpengaruh terhadap konsumsi daya atau daya yang diberikan ke TEC, semakin besar beda temperatur (K) akan meningkatkan konsumsi daya TEC. Sebaliknya, semakin meningkat beda temperatur (K) permukaan sisi panas dan dingin TEC akan menurunkan COP TEC. Terlihat bahwa COP TEC melebihi nilai 1,0, secara eksperimen $COP = 2,4$ dan secara simulasi $COP = 2,21$ untuk beda temperatur 8 K.



Gambar 5.10 Perbandingan antara Data Eksprimen dan Simulasi pada Beda Temperatur (a) Konsumsi Daya TEC, (b) COP Pemanasan (Kwan et al., 2020)

Berdasarkan penelitian oleh Kwan et al. (2020) dan Dian (2021) dapat dinyatakan bahwa material semikonduktor yang digunakan untuk pembuatan modul TEC mempengaruhi keluaran COP dan daya yang diberikan ke modul TEC tersebut. Selain itu, media pendingin yang dipakai pada permukaan sisi panas modul TEC juga mempengaruhi terjadinya beda temperatur (K) permukaan sisi panas dan dingin modul TEC. Penelitian lebih lanjut terhadap material semikonduktor dan media pendingin permukaan sisi panas yang dapat meningkatkan COP modul TEC adalah menarik dan penting untuk terus dikembangkan oleh para peneliti.

DAFTAR PUSTAKA

- Andhale, Y. S., Zisopoulos, G., Nesiadis, A., Atsonios, K., Nikolopoulos, N., Stitou, D., ... Vohra, M. (2021). Thermoelectric HVAC for Light-Duty Vehicle Applications. *Review Literature And Arts Of The Americas*, 8(6), 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102870>
- Apriyan, D., & Bizzy, I. (2021). *Kaji Eksprimental Kotak Pendingin Mni Menggunakan Thermoelectric Cooler (TEC) dengan Media Air dan Udara*.
- Attar, A., Lee, H., & Weera, S. (2014). Optimal design of automotive thermoelectric air conditioner (TEAC). *Journal of Electronic Materials*, 43(6), 2179–2187. <https://doi.org/10.1007/s11664-014-3001-0>
- Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & Dewitt, D. P. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (7th ed.). Connecticut, Los Angeles, Notre Dame, Purdue: John Wiley & Sons, Inc.
- Bhat, D. K., & Shenoy, U. S. (2019). Zn: a versatile resonant dopant for SnTe thermoelectrics. *Materials Today Physics*, 11, 100158. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2019.100158>
- Bizzy, I., & Apriansyah, R. (2013). Kaji Eksperimental Kotak Pendingin Minuman Kaleng Dengan Termoelektrik Bersumber Dari Arus DC Kendaraan dalam Rangkaian Seri dan Paralel. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII)*, (Snttm XII), 23–24.
- Bradly, L. C. D., Orr, G., Rahaoui, K., Date, A., & Akbarzadeh, A. (2015). *Thermoelectric Generators a as Alternative Source for Electric Power*. 9(12), 1312–1316.
- Cekdin, C., Nawawi, Z., & Faizal, M. (2020). The usage of thermoelectric generator as a renewable energy source. *Telkomnika (Telecommunication Computing Electronics and Control)*, 18(4), 2186–2192. <https://doi.org/10.12928/TELKOMNIKA.V18I4.13072>
- Fairbanks, J. (2008). Vehicular Thermoelectric Applications Session DEER 2009. *U.S. Department of Energy*.
- Goldsmid, H. J., & F.Inst.P. (1964). *Thermoelectric Refrigeration*. The General Electric Company Limited, Wembley, England-Springer Science Business Media, LLC.
- Huang, B. J., Hsu, P. C., Tsai, R. J., & Hussain, M. M. (2015). A

- thermoelectric generator using loop heat pipe and design match for maximum-power generation. *Applied Thermal Engineering*, 91, 1082–1091. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.059>
- In, B. D., & Lee, K. H. (2016). A study of a thermoelectric generator applied to a diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 230(1), 133–143. <https://doi.org/10.1177/0954407015576440>
- Kang, C., Wang, H., Bahk, J. H., Kim, H., & Kim, W. (2015). Thermoelectric materials and devices. In *RSC Nanoscience and Nanotechnology* (Vol. 2015-Janua). [https://doi.org/10.1016/0016-0032\(61\)90158-2](https://doi.org/10.1016/0016-0032(61)90158-2)
- Karimi, G., Culham, J. R., & Kazerouni, V. (2011). Performance analysis of multi-stage thermoelectric coolers. *International Journal of Refrigeration*, 34(8), 2129–2135. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.05.015>
- Kwan, T. H., Zhao, B., Liu, J., Xi, Z., & Pei, G. (2020). Enhanced cooling by applying the radiative sky cooler to both ends of the thermoelectric cooler. *Energy Conversion and Management*, 212(March), 112785. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112785>
- Lashin, A., Turkestani, M. Al, & Sabry, M. (2020). Performance of a thermoelectric generator partially illuminated with highly concentrated light. *Energies*, 13(14), 1–12. <https://doi.org/10.3390/en13143627>
- Mani, P. I. (2016). Design , Modeling and Simulation of a Thermoelectric Cooling System (TEC).
- Putra, N., Koestoer, R. A., Adhitya, M., Roekettino, A., & Trianto, B. (2010). Potensi Pembangkit Daya Termoelektrik Untuk Kendaraan Hibrid. *MAKARA of Technology Series*, 13(2), 53–58. <https://doi.org/10.7454/mst.v13i2.466>
- Rizal, T. A., Lubis, K. H., & Amin, M. (2021). Experimental Research on Utilization of Motorcycle Exhaust Heat Using Thermoelectric Generator (TEG) For Mobile Phone Chargers. *Proceedings of the 2nd International Conference on Science, Technology, and Modern Society (ICSTMS 2020)*, 576(Icstms 2020), 244–247. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.210909.054>
- Royale, A., Simic, M., & Lappas, P. (2020). Engine exhaust manifold with thermoelectric generator unit. *International Journal of Engine Research*. <https://doi.org/10.1177/1468087420932779>

- Rumayar, M. J. (2019). Pembuatan Sistem Pendingin Termoelektrik pada Kotak Pendingin Mini dengan Monitoring Suhu Berbasis Arduino. *Tugas Akhir*, 1–17.
- Salah, W. A., & Abuhelwa, M. (2020). Review of thermoelectric cooling devices recent applications. *Journal of Engineering Science and Technology*, 15(1), 455–476.
- Wang, D., Crane, D., & Lagrandeur, J. (2010). Design and analysis of a thermoelectric HVAC system for passenger vehicles. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2010-01-0807>
- Zhao, D., & Tan, G. (2014). A review of thermoelectric cooling: Materials, modeling and applications. *Applied Thermal Engineering*, 66(1–2), 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2014.01.074>

INDEKS

A

adiabatik, 17, 18, 20, 21
Air Conditioning, 2
Al-Baqarah, 1
Allah SWT, 1, 2
Arduino Uno, 45

B

band gap, 12
baterai, 3, 7, 34, 35

C

Carnot, 41
Coefficient of Performance, 9, 42, 65
COP, 9, 10, 41, 42, 47, 48, 49, 56, 65, 66, 67

D

doping elemental, 12

E

Efek Peltier, 5
Efek Seebeck, 5
energi, 2, 3, 10, 11, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 25, 29, 32, 35, 36, 42, 45, 53, 54, 57, 61

F

figure of merit, 10, 25

G

generator, 8, 34, 36, 57, 68, 69
gradien temperatur, 11, 14, 20

H

heat pipe, 32, 33, 34, 69
Heatsink, 12, 13, 30, 32, 58
hibrid, 29
hukum Fourier, 20

J

Jean Peltier, 5

K

koefisien Seebeck, 9, 11, 26, 42, 54
Koefisien Seebeck, 7, 11
konduksi, 13, 14, 16, 19, 20, 21, 26, 30, 42, 50
konduktivitas listrik, 11, 42
konduktivitas termal, 9, 11, 15, 26, 30, 42, 54
Konduktivitas termal, 15
konduktor, 5, 6, 7, 8, 25, 41, 42, 43, 44, 54
konveksi, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 26, 42, 49, 50, 64

L

lingkungan, 2, 3, 11, 12, 26, 29, 30, 31, 34, 42, 45, 57

M

modul, 3, 5, 6, 8, 9, 12, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 38, 41, 44, 45, 49, 50, 51, 52, 54, 55, 56, 57, 58, 61, 63, 64, 65, 66, 67
Muhammad SAW, 1

N

negara-negara maju, 2

O

ozon, 46, 57

P

panas, 3, 6, 8, 9, 12, 15, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 32, 34, 36, 38, 41, 42, 44, 45, 49, 50, 52, 54, 57, 58, 61, 63, 64, 66, 67

S

sistem, 7, 9, 10, 29, 32, 33, 34, 35, 36, 46, 53, 54

T

TEC, 6, 8, 25, 44, 45, 46, 49, 50,
51, 52, 53, 54, 55, 56, 58, 61,
63, 64, 65, 66, 67, 68, 69
TEG, 6, 8, 25, 26, 27, 28, 29, 30,
31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 69
teknologi, 2, 3, 29, 32, 36, 45, 57
temperatur, 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11,
12, 14, 15, 17, 18, 19, 20, 21,
22, 25, 26, 27, 29, 30, 31, 32,
34, 35, 37, 38, 39, 41, 42, 43,
45, 52, 53, 54, 55, 57, 58, 60,
61, 62, 63, 64, 65, 66, 67

termoelektrik, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10,
11, 12, 34, 36, 41, 43, 45, 51,
52, 54, 57, 58

Thermoelectric Cooler, 6, 8, 25,
45, 68

Thermoelectric Generator, 6, 8, 25,
69

Thomas Seebeck, 5

Thomson, 7, 43

Z

Zahl, 11

DAFTAR KATA PENTING

Efek Peltier

Efek Seebeck

Energi

Energi Baru Terbarukan (EBT)

Heatsink

Thermoelectric

Thermoelectric Cooler (TEC)

Thermoelectric Generator (TEG)