

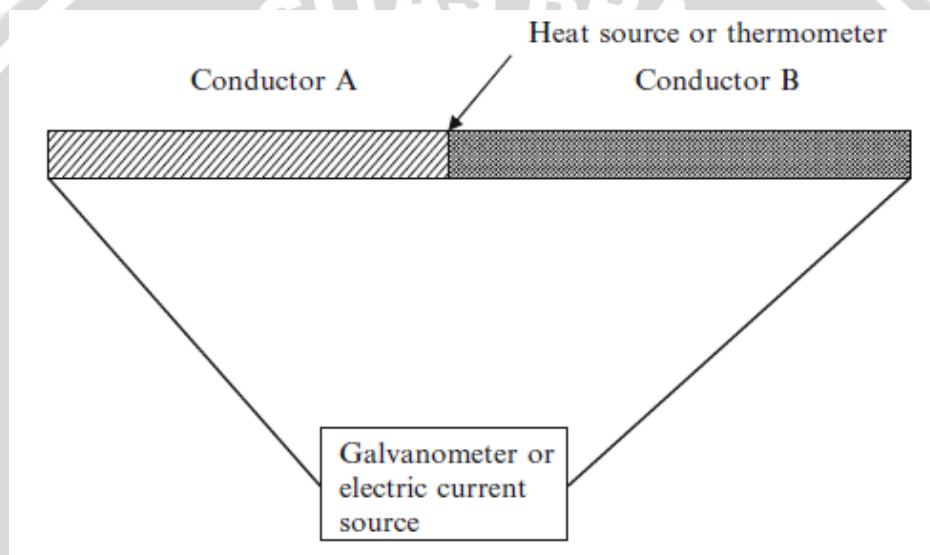
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 The Thermoelectric and Related Effect

2.1.1 Efek Seebeck dan Efek Peltier

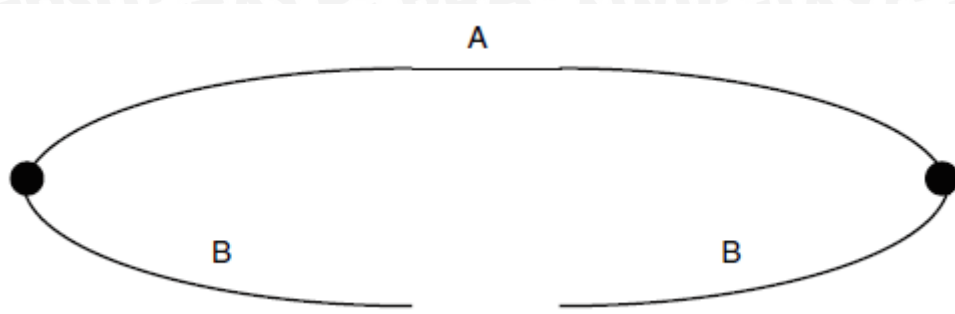
Efek *Seebeck* adalah sebuah fenomena dimana perbedaan temperatur pada konduktor maupun semikonduktor yang menghasilkan beda potensial diantara kedua ujungnya, sedangkan efek *Peltier* adalah sebuah fenomena dimana terjadi perbedaan temperatur yang diakibatkan oleh pemberian beda potensial pada ujung konduktor atau semikonduktor.



Gambar 2.1 Eksperimen yang menggambarkan efek *Seebeck* dan efek *Peltier*
 Sumber : (Goldsmid, 2009 : 2)

Gambar 2.1 menjelaskan mengenai efek Seebeck dan efek Peltier yang terjadi pada dua jenis konduktor yang berbeda, dengan menempatkan sumber panas diantara kedua konduktor, kemudian kedua ujung konduktor dihubungkan dengan galvanometer maka dapat terlihat bahwa terdapat *Electromotive Force (EMF)*, apabila kedua ujung dihubungkan dengan sumber listrik dan pada sambungan antara kedua konduktor diberikan termometer maka terlihat ada efek pemanasan atau pendinginan yang bergantung pada arah arus listriknya.

Percobaan diatas menghasilkan sebuah alat bernama termokopel, besarnya beda potensial pada ujung ujung termokopel sebanding dengan perbedaan temperatur antara sambungan kedua termokopel dengan ujung yang terhubung dengan alat ukur.



Gambar 2.2 Termokopel Sempel
Sumber : (Goldsmid, 2009 : 3)

Pada Gambar 2.2 Kedua ujung dari konduktor A akan dihubungkan dengan konduktor B yang kedua ujungnya akan dihubungkan dengan Voltmeter. Asumsikan konduktor yang digunakan adalah isotropis, apabila terdapat perbedaan temperatur sebesar ΔT diantara sambungan termokopel dan kedua ujung konduktor B, maka akan didapatkan beda potensial sebesar V diantara kedua ujung konduktor B. Koefisien Seebeck diferensialnya (α_{AB}) dapat didefinisikan sebagai rasio antara V terhadap ΔT seperti dalam persamaan :

$$\alpha_{AB} = \frac{V}{\Delta T}$$

(Goldsmid, 2009 : 3) (2-1)

keterangan :

α_{AB} = Koefisien Seebeck (Volt/K)

V = Beda Potensial (Volt)

ΔT = Perbedaan temperatur (K)

Dengan menggunakan termokopel yang sama, koefisien Peltier (π_{AB}) dapat didefinisikan sebagai rasio dari kecepatan pemanasan atau pendinginan pada sambungan terhadap arus listrik sesuai dengan persamaan berikut :

$$\pi_{AB} = \frac{q}{I}$$

(Goldsmid, 2009 : 3) (2-2)

keterangan :

π_{AB} = Koefisien Peltier (Volt)

q = Aliran Kalor (W)

I = Arus Listrik (Ampere)

Diketahui bahwa lebih mudah untuk melakukan pengukuran dari koefisien Seebeck daripada koefisien Peltier. Penemuan Kelvin menarik satu persamaan yang akan menuliskan persamaan koefisien Peltier dalam bentuk koefisien Seebeck. Persamaan Kelvin tersebut ialah :

$$\pi_{AB} = \alpha_{AB} T. \quad (\text{Goldsmid, 2009 : 4}) \quad (2-3)$$

keterangan :

- π_{AB} = Koefisien Peltier (V)
 α_{AB} = Koefisien Seebeck (Volt/K)
 T = Temperatur (K)

Salah satu penemuan kelvin yang lain adalah penggabungan antara koefisien Seebeck dan koefisien Thomson. Koefisien Thomson (τ) itu sendiri dapat didefinisikan sebagai rata rata kecepatan pemanasan atau pendinginan per satuan panjang yang menghasilkan arus pada konduktor yang memiliki beda temperatur. Hubungan tersebut digambarkan dalam persamaan berikut :

$$\tau_A - \tau_B = T \frac{d\alpha_{AB}}{dT}. \quad (\text{Goldsmid, 2009 : 4}) \quad (2-4)$$

keterangan :

- $\tau_A - \tau_B$ = Koefisien Thomson (V/K)
 T = Temperatur (K)
 $d \alpha_{AB}/d T$ = Turunan koefisien Seebeck terhadap Temperatur

2.1.2 Teori Pembangkit dan Refrigerasi Termoelektrik

2.1.2.1 *Transport Effect*

Fenomena termoelektrik memiliki sifat reversibel dalam pengertian tidak terjadi kerugian termodinamika. Namun dalam kondisi yang sesungguhnya selalu terdapat adanya efek yang *irreversible*, hal ini diakibatkan karena adanya resistansi elektrik dan juga konduksi termal. Konduktor memiliki kecenderungan untuk menghantarkan panas dari daerah panas menuju ke daerah dingin, bersamaan dengan perpindahan panas tersebut terdapat gerakan dari ion ion elektrik yang searah dengan perpindahan panasnya (Alemi, Dkk ; 2014). Performansi termokopel sebagai alat konversi energi dapat dinyatakan dalam persamaan yang mencakup koefisien diferensial

Seebeck, konduksi termal, dan resistansi elektrik. Besarnya resistansi elektrik dipengaruhi konduksi termal dan tahanan elektrik dari rasio panjang per satuan luas.

Tahanan elektrik (ρ) adalah kebalikan dari konduktivitas elektrik (σ) yang dinyatakan dalam persamaan :

$$I = \frac{\sigma VA}{L} \quad (\text{Goldsmid, 2009 : 7}) \quad (2-5)$$

keterangan :

- I = Arus Listrik (Ampere)
- σ = Konduktivitas Elektrik (S/m)
- V = Tegangan Listrik (Volt)
- A = Luas Permukaan sel termoelektrik (m^2)
- L = Panjang Sel Termoelektrik (m)

I adalah besarnya arus yang melalui spesimen dengan luasan sebesar A dan panjang sebesar L jika tegangan sebesar V diberikan. Demikian juga dengan Konduktivitas termal (λ) yang dinyatakan dalam persamaan :

$$q = \frac{\lambda A \Delta T}{L} \quad (\text{Goldsmid, 2009 : 7}) \quad (2-6)$$

keterangan :

- q = Aliran Kalor (W)
- λ = Konduktivitas Termal (W/m.K)
- A = Luas Permukaan sel termoelektrik (m^2)
- ΔT = Perbedaan temperatur (K)
- L = Panjang Sel Termoelektrik (m)

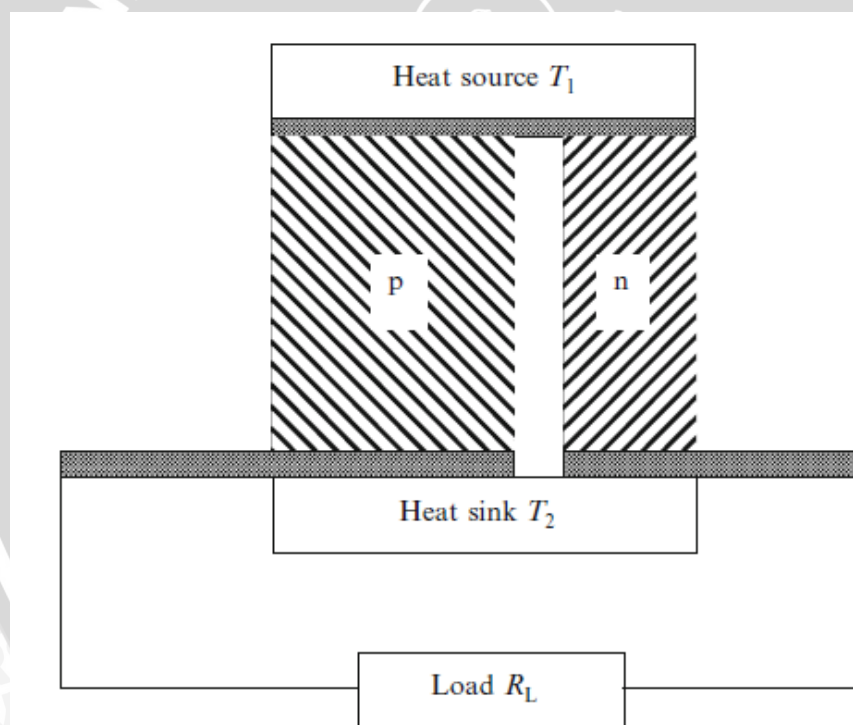
q adalah kecepatan perpindahan kalor rata rata dari spesimen sama yang memiliki perbedaan temperatur sebesar ΔT pada kedua ujungnya. Kita akan mengacu pada koefisien termoelektrik, elektrik, dan konduktivitas termal dari suatu material sebagai karakter transport material tersebut. Karakter tersebut bergantung pada temperatur dan harus diperhitungkan dalam teori yang lebih teliti.

Variasi temperatur dari karakter transport tidak akan memiliki pengaruh banyak dan dapat diabaikan pada beberapa aplikasi efek Peltier dengan perbedaan

temperatur yang tidak terlalu besar, namun hal ini akan sangat penting dalam pembangkit termoelektrik.

2.1.2.2 Pembangkit Termoelektrik

Pembangkit termoelektrik memanfaatkan efek Seebeck dimana terdapat perbedaan temperatur pada termoelektrik akan menghasilkan beda potensial yang akan menghantarkan arus (Tritt, Subramanian; 2006). Saat ini kita akan membahas mengenai aplikasi dari efek Seebeck dalam pembangkitan tenaga listrik. Sekali lagi kita dapat mendapatkan performansi menggunakan permodelan sebuah termokopel dan asumsikan bahwa tidak ada kalor yang mengenai bagian lain selain sambungan dari termokopel tersebut. Susunan termokopel tersebut akan ditunjukkan pada gambar 2.3 dimana termokopel akan dihubungkan dengan beban sebesar R_L sesuai karakter dari termokopel.



Gambar 2.3 Termokopel Sempel sebagai generator
Sumber : (Goldsmid, 2009 : 13)

Dari susunan diatas, dapat dicari besarnya daya elektrik yang akan diberikan pada beban, efisiensi (η) yang merupakan perbandingan dari daya keluaran termokopel terhadap kecepatan rata rata kalor yang diserap dari sumber. Besarnya gaya elektromotif yang terjadi adalah $(\alpha_p - \alpha_n)(T_1 - T_2)$, gaya tersebut berpengaruh terhadap arus listrik yang dinyatakan dalam persamaan :

$$I = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_1 - T_2)}{R_p + R_n + R_L} \quad (\text{Goldsmid, 2009 : 14}) \quad (2-7)$$

keterangan :

- I = Arus Listrik (Ampere)
 $\alpha_p - \alpha_n$ = Seebeck Coeficient (Volt/K)
 $T_1 - T_2$ = Perbedaan temperatur antara heat sink dan heat source (K)
 $R_p + R_n + R_L$ = Beban Tahanan rangkaian (Ohm)

Oleh karena itu, besarnya daya yang disalurkan menuju beban adalah :

$$w = I^2 R_L = \left\{ \frac{(\alpha_p - \alpha_n)(T_1 - T_2)}{R_p + R_n + R_L} \right\}^2 R_L \quad (\text{Goldsmid, 2009:14}) \quad (2-8)$$

keterangan :

- W = Daya (Watt)
I = Arus Listrik (Ampere)
 $\alpha_p - \alpha_n$ = Seebeck Coeficient (Volt/K)
 $T_1 - T_2$ = Perbedaan temperatur antara heat sink dan heat source (K)
 $R_p + R_n + R_L$ = Beban Tahanan rangkaian (Ohm)

Besarnya kalor yang diambil dari sumber digunakan untuk menyeimbangkan pendinginan Peltier yang berhubungan dengan aliran arus listrik. Selain hal tersebut juga terdapat aliran kalor akibat konduksi termal sepanjang sambungan sehingga total aliran kalor dari sumber adalah sebesar :

$$q_1 = (\alpha_p - \alpha_n)IT_1 + (K_p + K_n)(T_1 - T_2) \quad (\text{Goldsmid, 2009 : 14}) \quad (2-8)$$

keterangan :

- q_1 = Heat Flow (Watt)
 $\alpha_p - \alpha_n$ = Seebeck Coeficient (Volt/K)
I = Arus Listrik (Ampere)
 T_1 = Temperatur heat sink (K)
 $K_p + K_n$ = Konduktivitas Termal (W/m.K)
 $T_1 - T_2$ = Perbedaan temperatur antara heat sink dan heat source (K)

Besarnya efisiensi adalah sebesar perbandingan W/q_1 , daya akan mencapai nilai maksimum apabila resistansi beban sama dengan resistansi dari generator. Bagaimanapun, meski tidak ada kerugian kalor dari konduksi termal efisiensinya tidak akan mencapai 50%. Peningkatan resistansi beban akan meningkatkan efisiensi namun mengurangi daya yang dikeluarkan. Dapat disebut bahwa efisiensi akan mencapai maksimum apabila perbandingan (M) antara resistansi beban terhadap resistansi generator seperti pada persamaan berikut :

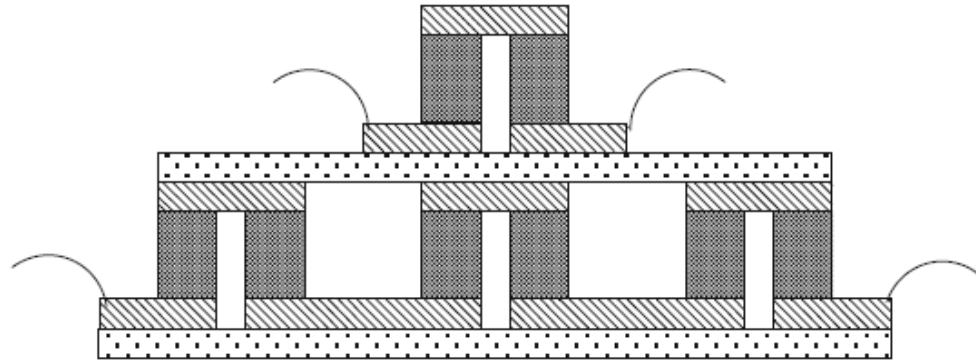
$$M = \frac{R_L}{R_p + R_n} = (1 + Z T_m)^{1/2}. \quad (\text{Goldsmid, 2009 : 14}) \quad (2-8)$$

keterangan :

- M = Masa Atom (Dalton)
 Z = Faktor Daya Termoelektrik
 T_m = Suhu Rata - Rata (K)

2.1.2.3 *Multi-Stage Devices*

Untuk pengoperasian termoelektrik pada daerah kerja temperatur yang luas, dibutuhkan lebih dari satu pasang termokopel. Penggunaan beberapa tahap elemen termoelektrik dapat memperluas rentang perbedaan temperatur maksimal yang diperbolehkan. Dengan anggapan bahwa tidak terdapat kalor yang hilang antara bidang kontak dari satu tahap ke tahapan lainnya akibat resistansi termal, pendinginan dengan beberapa tahap akan memiliki kapasitas pendinginan yang lebih besar. Hal ini dikarenakan setiap tahapan tidak hanya membuang panas dari tahapan sebelumnya namun juga membuang panas yang dihasilkannya sendiri. Modul termoelektrik beberapa tahapan dapat mencapai tinggi hingga 20 mm, tergantung berdasarkan banyaknya tahapan yang digunakan (Nimbalkar, Kshirsagar. 2013).



Gambar 2.4 Susunan termoelektrik dua tahapan
 Sumber : (Goldsmid, 2009 : 16)

Pada susunan termoelektrik dengan tahapan sejumlah N , dapat ditentukan besarnya Coefficient of Performance (COP) dari tahap ke- N adalah ϕ_N , dan q_n adalah kecepatan pendinginan dari sejumlah N tahapan seperti yang dijelaskan dalam persamaan berikut :

$$q_n = q_N \left(1 + \frac{1}{\phi_N} \right) \left(1 + \frac{1}{\phi_{N-1}} \right) \dots \left(1 + \frac{1}{\phi_{N-n}} \right).$$

(Goldsmid, 2009 : 16) (2-9)

keterangan :

- q_n = Masa Atom (Dalton)
- ϕ_{N-1} = Faktor Daya Termoelektrik

Dengan mengasumsikan bahwa tiap tahapan memiliki COP dan ϕ_s yang sama, maka secara keseluruhan COP nya adalah :

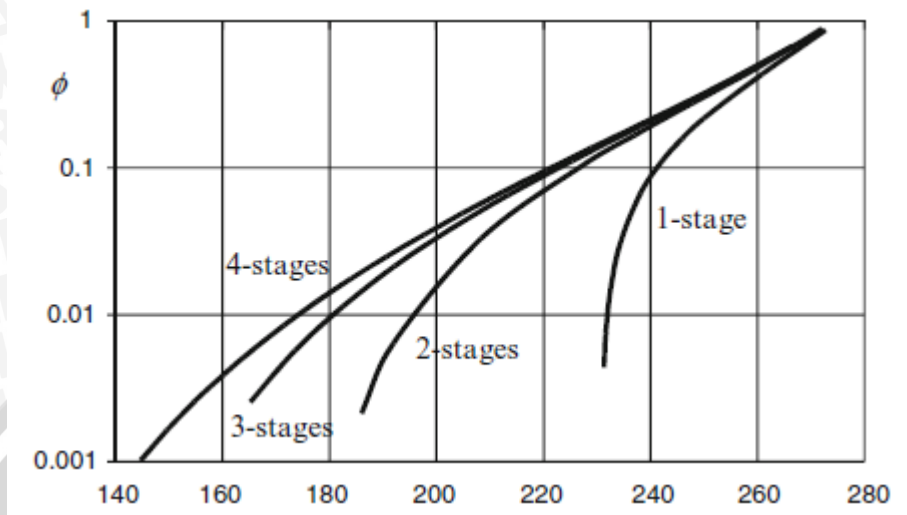
$$\phi = \left[\left(1 + \frac{1}{\phi_s} \right)^N - 1 \right]^{-1}.$$

(Goldsmid, 2009 : 16) (2-10)

keterangan :

- ϕ = Koefisien Performansi
- ϕ_s = Faktor Daya Termoelektrik
- N = Banyaknya Modul Termoelektrik

Dari perhitungan diatas, dapat disajikan grafik COP beberapa tahap susunan termoelektrik dengan ZT sebesar 0,7 dan heatsink yang digunakan berada pada temperatur 300 K



Gambar 2.5 COP susunan termoelektrik dengan ZT= 0.7 dan heatsink pada 300 K
Sumber : (Goldsmid, 2009 : 17)

2.2. Material Termoelektrik

2.2.1. Bismuth

Bismuth adalah salah satu material termoelektrik pertama yang dipelajari dan digunakan selama bertahun-tahun. Bismuth murni memiliki koefisien Seebeck negatif, dan cocok untuk dipasangkan dengan Antimony yang memiliki koefisien Seebeck positif. Bismuth memiliki kristal yang simetris dengan bismuth telurida. Bismuth masuk kedalam golongan material semi logam, belakangan ini ditemui kesulitan untuk memproduksi bismuth yang dikarenakan diperlukan pendinginan ekstrim.

Bismuth telurida dan bismuth selenida sangat cocok digunakan untuk rentangan temperatur ruangan dengan nilai ZT antara 0,8 hingga 1,0. Dengan menggunakan teknologi nano dapat dibuat lapisan struktur *superlattice* Bi₂Te₃ dan Bi₂Se₃ yang memiliki konduktivitas elektrik bagus dan konduktivitas termal yang rendah sehingga bisa didapatkan material dengan ZT hingga 2,4 untuk semikonduktor tipe-P.



Gambar 2.6 Bismuth Telurida
Sumber : DePiep (2014)

2.2.2 Timbal Telurida

Semikonduktor yang memiliki berat atom yang besar adalah material termoelektrik yang baik sehingga beberapa peneliti tertarik dengan material timbal telurida. Timbal telurida memiliki titik lebur yang lebih tinggi apabila dibandingkan dengan Bismuth telurida sehingga meskipun nilai ZT Timbal telurida lebih kecil namun Timbal telurida dapat digunakan untuk temperatur yang lebih tinggi. Material ini kemudian dikembangkan sebagai material termoelektrik untuk penggunaan diluar rentang temperatur ruangan.

Material timbal telurida telah digunakan oleh Josep Heremans dan koleganya sebagai material termoelektrik dan dapat mencapai ZT sebesar 1,5 pada temperatur 773K. Penemuan selanjutnya menyatakan bahwa penggunaan dari Thallium dan Sodium pada paduan timbal dapat meningkatkan konduktivitas elektrik, dan penggunaan Selenium dapat meningkatkan konduktivitas elektrik serta menurunkan konduktivitas termal.

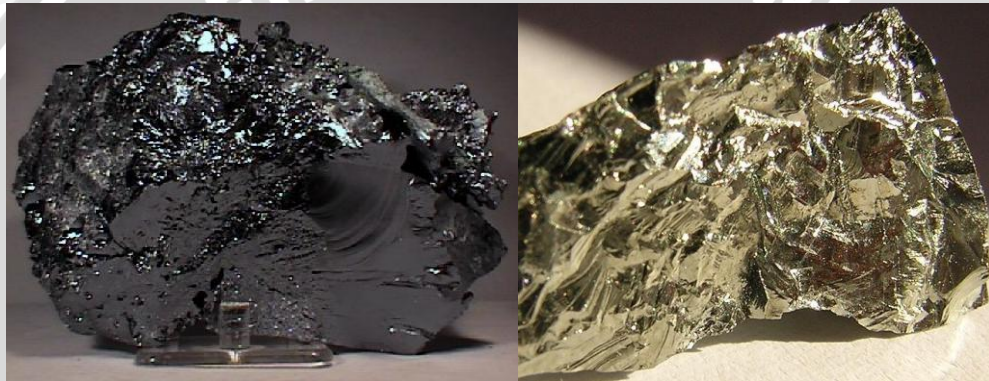


Gambar 2.7 Timbal Telurida
Sumber : Theodore W Gray (2014)

2.2.3 Silikon-Germanium

Baik Silikon maupun Germanium memiliki konduktivitas elektrik yang baik, hal ini dikarenakan kedua material tersebut memiliki mobilitas atom yang tinggi. Silikon dan germanium merupakan material termoelektrik yang sangat baik pada kisaran rentang suhu 1273K, banyak digunakan pada RTG (Radioisotope Thermoelectric Generator) dan beberapa aplikasi lain pada temperatur tinggi.

Penggunaan material ini sedikit terbatas oleh harga yang mahal dan material yang lumayan susah ditemui. Paduan Silikon dan Germanium sebagai material termoelektrik memiliki nilai ZT pada kisaran angka 0,7.



Gambar 2.8 Silikon dan Germanium
Sumber : Graemme Bartlett (2014)

2.2.4 Skutterudite

Skutterudite adalah material dari batuan mineral kobalt arsenat yang memiliki kandungan nikel dan besi. Rumus kimianya adalah $(\text{Co,Ni,Fe})(\text{P,Sb,As})_3$. Material ini dapat ditingkatkan kemampuan termoelektriknya dengan menurunkan konduktivitas termal tanpa mengurangi konduktivitas elektriknya dengan cara memproduksi sumber untuk hamburan phonon.

Skutterudite cocok digunakan pada termoelektrik yang terdiri atas beberapa tahap karena memiliki nilai ZT lebih dari 1,0, namun sayangnya sifat-sifat material ini belum banyak diketahui dan optimisasi struktur materialnya masih dalam tahap pengembangan.



Gambar 2.9 Skutterudite
Sumber : Vsmith (2014)

2.2.5 Clathrate

Clathrate adalah substansi kimia yang memiliki struktur terbuka dengan molekul molekul didalamnya. Clathrate sebenarnya merupakan bentuk kristal kompleks dari H_2O dengan atom yang terjebak. Clathrate es diketahui memiliki nilai konduktivitas termal yang sangat kecil dan memiliki jumlah atom yang sangat banyak untuk tiap unit sel nya. Clathrate es tipe 1 memiliki 46 molekul H_2O , sedangkan tipe 2 memiliki 136 molekul sejenis.

Clathrate diprediksi memiliki nilai ZT sekitar 0,5 pada temperatur ruangan, dan dapat mencapai 1,7 pada temperatur 800K dengan komposisi yang optimal. Pengembangan material ini sebagai material termoelektrik lebih banyak pada clathrate tipe 1 karena pada tipe ini memungkinkan optimasi efek transpor.

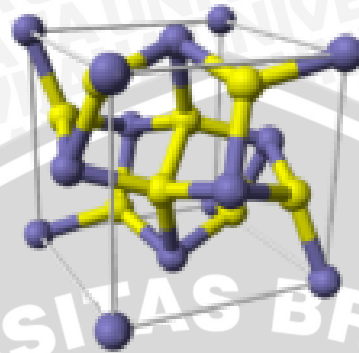


Gambar 2.10 Ice Clathrate
Sumber : Doug L.Hofmann (2014)

2.2.6 Paduan Half Heusler

Paduan Half Heusler Cu_2MnAl adalah material feromagnetik yang memiliki struktur dimana atom tembaga membentuk kubus dengan sel yang mengandung atom

Mn dan Al. Paduan ini memiliki potensi yang cukup besar untuk digunakan pembangkit listrik pada temperatur tinggi khususnya sebagai semikonduktor tipe-N. Paduan ini diklaim memiliki faktor daya yang besar dengan harga material yang murah. Hingga saat ini paduan tipe ini hanya digunakan untuk material termoelektrik tipe-N saja.



Gambar 2.11 Struktur atom paduan Half Heusler
Sumber : F Casper (2014)

2.2.7 Metal Silicides

Besi silisida, FeSi_2 telah lama dipertimbangkan sebagai material pembangkit termoelektrik meskipun material ini tidak memiliki nilai ZT yang paling besar. Kelebihan material ini adalah kestabilan dan kekuatannya, selain itu kedua material penyusunnya dapat ditemukan dalam jumlah banyak serta murah. Paduan dari material ini dapat digunakan untuk bahan semikonduktor tipe-P maupun tipe-N.



Gambar 2.12 Besi Silisida
Sumber : Karyn Gorra (2014)

2.2.8 Tin Selenide

Timah selenida adalah material paduan yang didapatkan dengan mereaksikan timah dengan selenium diatas temperatur 350°C , material ini memiliki konduktivitas termal yang rendah dengan konduktivitas elektrik yang tinggi. Sekelompok grup

peneliti pada tahun 2014 menemukan bahwa Timah selenida memiliki faktor daya sebesar 2,6. Hingga saat ini, nilai faktor daya inilah yang diketahui paling besar dibandingkan dengan material termoelektrik lainnya.



Gambar 2.13 Timah Selenida
Sumber : ESPICorp (2014)

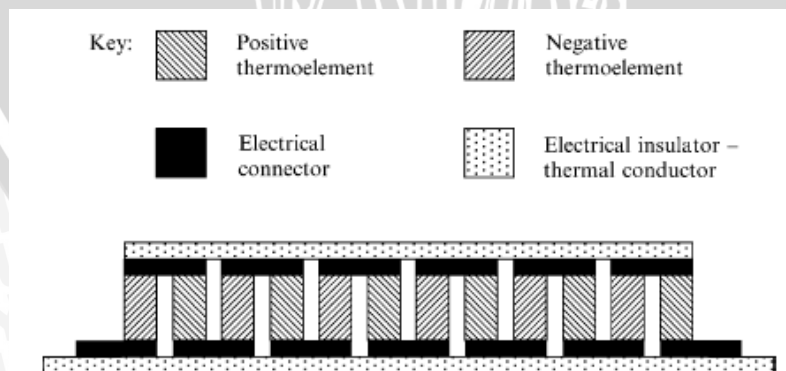
2.3. Modul Termoelektrik

2.3.1 Definisi Modul Termoelektrik

Sebuah termokopel dapat digunakan untuk memberikan efek pendinginan seperti pada kulkas, namun termokopel tersebut akan beroperasi dengan tegangan dan arus yang rendah. Untuk kebutuhan yang lebih luas, beberapa termokopel akan disambungkan secara elektrik dalam rangkaian seri.

Modul Termoelektrik adalah gabungan antara semikonduktor tipe P dan tipe N yang dihubungkan seri secara elektrik dan paralel secara termal (Fardy, M.A.; 2010).

Skema susunan dari modul termoelektrik digambarkan sebagai berikut :



Gambar 2.14 Skema Susunan dari Modul termoelektrik
Sumber : (Goldsmid, 2009 : 168)

Elemen-elemen dalam Modul termoelektrik akan dihubungkan dengan menggunakan konduktor elektrik yang bagus seperti tembaga. Penghubung tersebut akan dijaga kontaknya dengan plat insulasi yang bagus konduktivitas termalnya. Modul termoelektrik satu tahap tingginya bervariasi antara 1 mm hingga 5 mm dan didalamnya terdapat 3 hingga 127 termokopel (Nimbalkar, Kshirsagar. 2013). Bentuk dari Modul Termoelektrik dapat dilihat pada gambar 2.14 dibawah ini.



Gambar 2.15 Sel Termoelektrik dengan daya sebesar 72 W
Sumber : (Anonymous 8; 2014)

2.3.2 Aplikasi Efek Peltier

Pada saat ini, performansi dari pendingin termoelektrik masih berada di bawah pendingin konvensional dengan kompresor. Salah satu karakteristik dari peralatan Peltier yang unggul daripada mesin pendingin konvensional adalah ukurannya yang kecil. Pabrikan menilai bahwa pendinginan termoelektrik berguna untuk alat portabel seperti kulkas pendingin portabel yang menggunakan sumber listrik 12 volt.

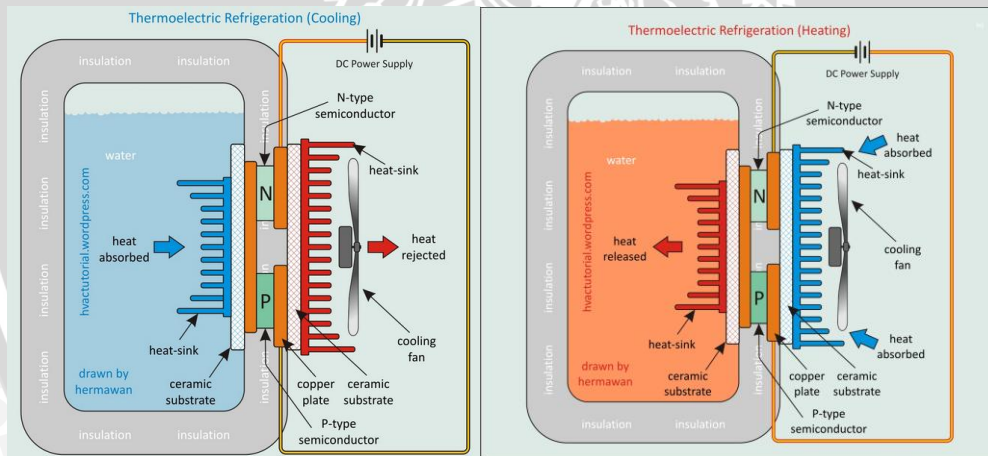
Salah satu fitur lainnya dari peralatan yang menggunakan prinsip efek Peltier adalah dapat digunakan untuk memanaskan selain hanya sebagai pendingin. Dengan prinsip tersebut maka dimungkinkan untuk menjaga makanan yang membutuhkan pendinginan dalam suatu wadah hingga pada saatnya akan digunakan, makanan tersebut dapat dipanaskan kemudian dikonsumsi.

Kegunaan lainnya dari pendinginan termoelektrik adalah untuk pengkondisian udara sekitar. Pengkondisian udara dengan termoelektrik ini pernah diterapkan pada kereta api di Prancis dimana pada salah satu gerbongnya membutuhkan pendinginan atau pemanasan.



Gambar 2.16 Kulkas Portabel dengan Termoelektrik
 Sumber : (Anonymous 9, 2014)

Prinsip kerja dari mesin Kalor termoelektrik dapat dijelaskan sebagai berikut, dengan adanya arus listrik, akan terjadi pergerakan atom dari material termoelektrik, pergerakan atom tersebut sekaligus membawa kalor sehingga dengan prinsip tersebut bisa didapatkan efek pendinginan atau pemanasan dengan membalik polaritas dari modul termoelektrik. Prinsip tersebut dijelaskan melalui gambar 2.16 dibawah ini.



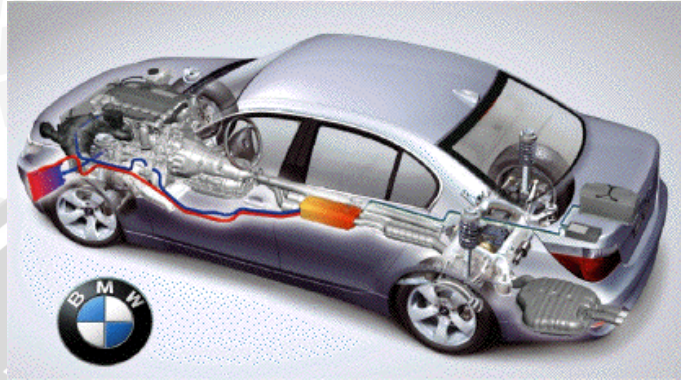
Gambar 2.17 Prinsip kerja mesin Kalor Termoelektrik
 Sumber : (Anonymous 10, 2014)

2.3.3 Alat - Alat Seebeck

Meskipun sebagian besar penelitian mengenai termoelektrik selama 50 tahun difokuskan kepada efek Peltier, tidak dapat dipungkiri bahwa pembangkit termoelektrik akan menjadi aspek penting apabila faktor dayanya dapat ditingkatkan. Metode baru akan dicari seiring dengan bertambahnya sumber sumber panas. Sebagai contoh, Radio Isotope Generator (RTG) pada kendaraan luar angkasa telah menggunakan termoelektrik.

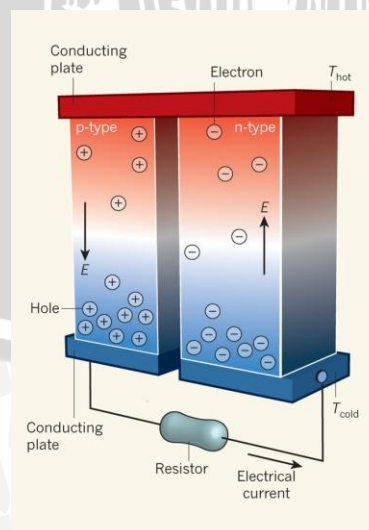


Kelebihan termoelektrik sebagai pembangkit tidak hanya mengenai kehandalan, tetapi juga mengenai ketahanan, umur pakai yang panjang, serta ketidaksensitifan terhadap radiasi dan degradasi dari lingkungan. Tidak seperti generator lainnya, generator termoelektrik bebas dari getaran, kebisingan, dan tidak ada peralatan yang bergerak.



Gambar 2.18 Aplikasi pembangkit termoelektrik pada exhaust mobil BMW
Sumber : (Anonymous 11, 2014)

Prinsip kerja dari pembangkit termoelektrik adalah berdasarkan perbedaan temperatur yang ada pada kedua sisi modul termoelektrik. Dengan perbedaan temperatur pada kedua sisi modul, terdapat aliran kalor dari sisi panas menuju sisi dingin sehingga terjadi pergerakan elektron dan photon. Pergerakan elektron dan photon yang diakibatkan oleh aliran kalor tersebut akan menyebabkan timbulnya beda potensial. Prinsip kerja pembangkit termoelektrik dapat dijelaskan oleh gambar 2.18 berikut ini.



Gambar 2.19 Prinsip kerja pembangkit termoelektrik
Sumber : (Anonymous 11, 2014)

2.4. Rangkaian Listrik pada Termoelektrik

Komponen dari suatu rangkaian elektronik dapat disusun dengan beberapa cara. Dua hal paling simpel dari rangkaian elektronik tersebut adalah rangkaian seri dan rangkaian paralel. Penjelasan dari rangkaian seri dan rangkaian paralel akan dijelaskan dalam sub-bab berikut.

2.4.1 Rangkaian Seri pada Termoelektrik

Komponen elektronik yang disusun secara seri akan mendapatkan aliran arus yang besarnya sama terhadap seluruh komponen. Modul termoelektrik pada prinsipnya menyerupai sebuah baterai di dalam rangkaian elektronika, sehingga jika modul termoelektrik disusun dalam rangkaian seri maka besarnya tegangan yang dihasilkan akan meningkat dengan besar arus yang tetap.

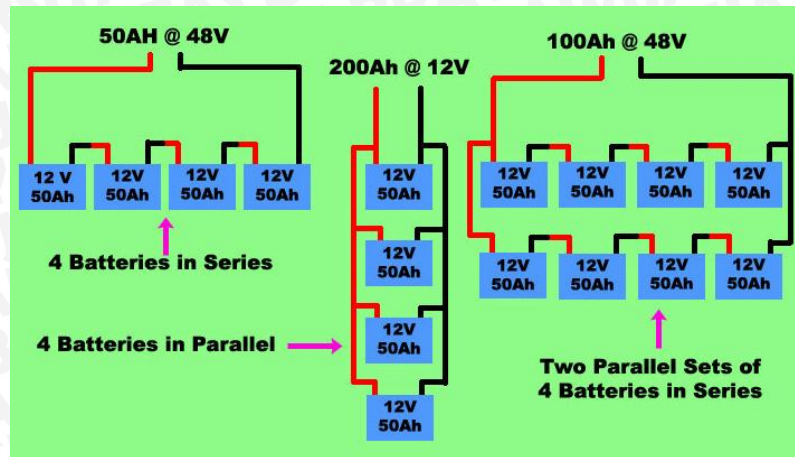
2.4.2 Rangkaian Paralel pada Termoelektrik

Komponen elektronik yang disusun secara paralel akan mendapatkan tegangan yang besarnya sama untuk semua komponen. Sama seperti penjelasan pada rangkaian seri pada termoelektrik, modul termoelektrik yang disusun secara paralel dapat menghasilkan sejumlah arus yang meningkat dengan beda potensial yang tetap.

2.4.3 Gabungan antara Rangkaian Seri dan Paralel pada Termoelektrik

Komponen elektronik dapat digabungkan secara seri dan paralel untuk mendapatkan tegangan dan arus yang sama, prinsip ini dapat diterapkan pula pada modul termoelektrik. Dengan menggabungkan rangkaian seri dan paralel pada modul termoelektrik maka bisa didapat arus serta beda potensial yang lebih tinggi. Penjelasan

Penjelasan dari susunan seri dan paralel pada modul termoelektrik dapat diterangkan dengan menggunakan baterai sebagai pengganti modul termoelektrik karena penggunaan modul termoelektrik sebagai pembangkit memiliki kesamaan dengan penyimpanan listrik pada baterai. Prinsip dasar rangkaian seri dan paralel elektronik pada termoelektrik akan dapat lebih mudah dimengerti melalui bantuan gambar berikut ini.



Gambar 2.20 Rangkaian Seri dan Paralel Pada Baterai
Sumber : (Anonymous 12, 2014)

2.5. Hipotesis

Pada beda temperatur yang sama, dengan merangkai Modul termoelektrik seri secara termal dan paralel secara elektrik akan didapatkan tegangan dan arus yang lebih rendah daripada modul termoelektrik tunggal karena pergerakan ion listrik dalam termoelemen terhambat, dengan merangkai modul termoelektrik paralel secara termal dan seri secara elektrik akan didapatkan tegangan yang lebih besar daripada modul termoelektrik tunggal akibat semakin banyak ion listrik berkumpul di salah satu sisi sel.