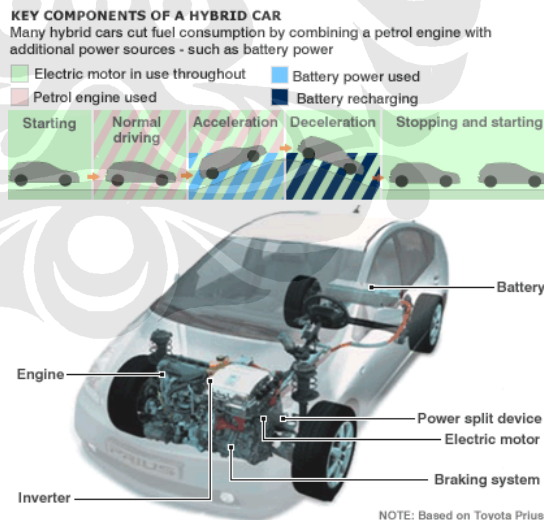


## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1 SISTEM HIBRID

Mesin pendorong mobil berteknologi *hybrid* memiliki dua mesin yang berbeda yaitu memiliki satu unit mesin bensin atau diesel dan sebuah mesin elektrik atau bisa disebut juga generator. Mesin utama yang digunakan adalah mesin bensin atau diesel. Namun ukurannya relatif kecil dan memiliki tenaga yang lebih kecil dibandingkan mesin mobil normal. Ketika mesin bensin/diesel bergerak dengan putaran mesin yang relatif tinggi atau berlebih saat itu pula mesin elektrik merubah energi dari perputaran mesin yang relatif tinggi atau berlebih menjadi energi listrik dan selanjutnya disimpan di sebuah baterai khusus (Gambar 2.1). Energi yang berlebihan ini timbul dari mesin bensin/diesel.[6]



Gambar 2.1 Komponen utama mobil hybrid

Sumber: [www.bengkelmasboy.com](http://www.bengkelmasboy.com)

Sebagai contoh yaitu pergerakan mobil pada jalan yang datar. Mesin *hybrid* memanfaatkan energi gerak yang dihasilkan oleh mesin bensin/diesel. Hal ini terjadi apabila pengemudi melepaskan pedal gas dan ketika menginjak pedal

rem. Hal ini bisa disebut *renewable energi* atau energi yang dapat didaur ulang atau dapat digunakan kembali. Apabila energi yang telah tersimpan di baterai sewaktu-waktu diperlukan secara otomatis maka energi yang tersimpan ini langsung di salurkan ke mesin elektrik dan kemudian dari mesin elektrik ini diubah menjadi energi gerak. Misalnya ketika mobil dalam keadaan menanjak atau ketika mobil ingin mendahului.[6]

Mesin *hybrid* dapat di juluki mesin yang dapat berpikir. Misalnya ketika menunggu di persimpangan jalan atau lampu merah, mesin bensin/diesel secara otomatis akan mati. Mesin bensin/diesel juga akan mati ketika pengereman dan ketika mesin tidak melakukan pembakaran/kompresi. Mobil *hybrid* tidak memerlukan tempat untuk pengisian baterai seperti telepon genggam, karena baterai akan diisi secara otomatis oleh mesin elektrik. Kedua mesin ini dapat bekerja sama dengan bantuan komputer dan sensor yang telah diprogram berdasarkan kebutuhan. Mobil *hybrid* adalah mobil ramah lingkungan dan hemat energi.[6]

## **2.2 KONSEP THERMOELECTRIC**

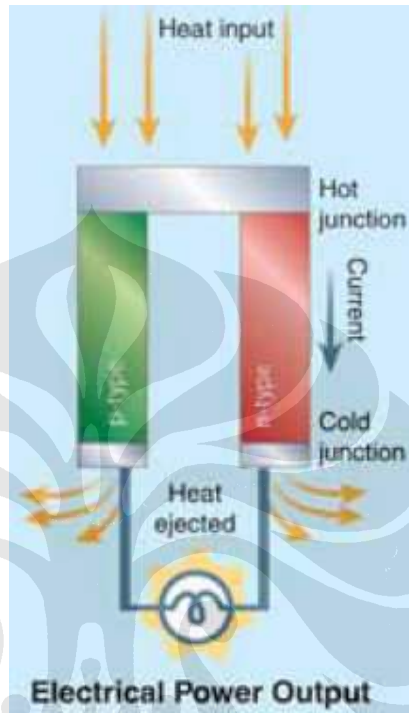
Modul termoelektrik adalah suatu alat yang dapat mengubah energi termal dari gradien temperatur tertentu menjadi energi listrik ataupun sebaliknya dari energi listrik menjadi gradien temperatur. Membahas termoelektrik modul tidak dapat dipisahkan dari “figure of merit” atau  $ZT$  dari material termoelektrik dan dampaknya terhadap efisiensi konversi termal ke listrik dalam aplikasi pembangkit listrik atau pendingin termoelektrik. [16]

### **2.2.1 Dasar-dasar Termoelektrik**

#### *2.2.1.1 Pembangkit Listrik Termoelektrik*

Pembangkit termoelektrik (TEG) berdasarkan pada efek Seebeck –*Jika panas digunakan pada suatu sirkuit di ujung dua konduktor yang berbeda, arus listrik akan dihasilkan.* Fenomena termoelektrik pertama kali ditemukan tahun 1821 oleh ilmuwan Jerman, Thomas Johann Seebeck. Ia menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian. Di antara kedua logam tersebut lalu diletakkan jarum kompas. Ketika sisi logam tersebut dipanaskan, jarum kompas ternyata

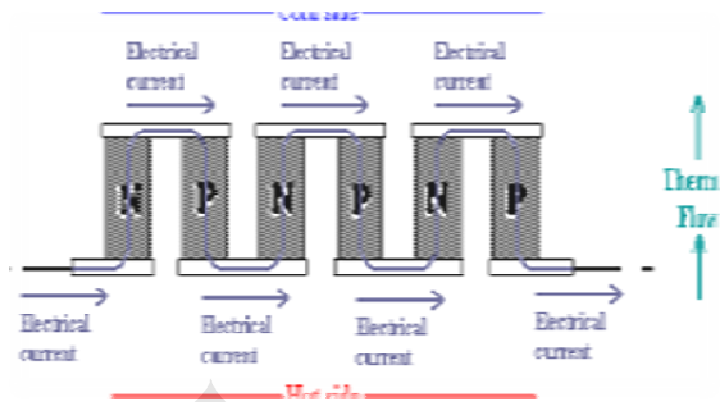
bergerak. Belakangan diketahui, hal ini terjadi karena aliran listrik yang terjadi pada logam menimbulkan medan magnet. Medan magnet inilah yang menggerakkan jarum kompas. Fenomena tersebut kemudian dikenal dengan efek *Seebeck*. [16]



Gambar 2.2 Pembangkit listrik termoelektrik

Sumber: *Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery*, U.S Department of Energy (November 2006)

TEG yang paling sederhana terdiri dari suatu termokopel yang terdiri dari elemen tipe-n (material dengan kelebihan elektron) dan tipe-p (material dengan kekurangan elektron) yang dihubungkan secara listrik dalam seri dan secara termal dalam paralel. Panas masuk pada satu sisi dan dibuang dari sisi yang lainnya, menghasilkan suatu tegangan yang melewati kopel TE (Gambar 2.3). Besarnya tegangan yang dihasilkan sebanding dengan gradien temperatur.[16]

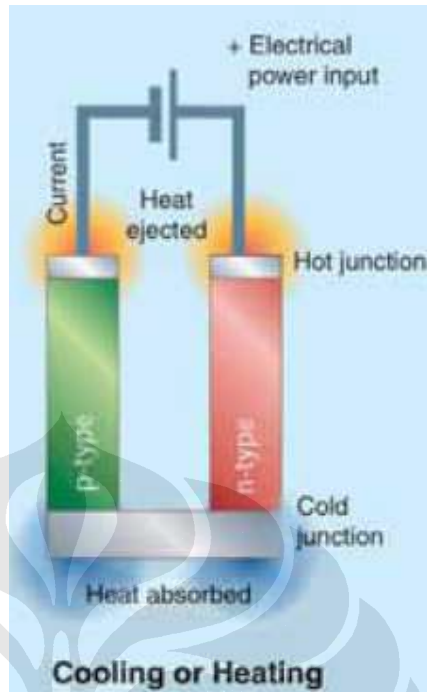


Gambar 2.3 Seri secara listrik dan paralel secara termal  
 Sumber: [www.directscience.com](http://www.directscience.com)

### 2.2.1.2 Thermoelectric Heating and Cooling

Penemuan Seebeck ini memberikan inspirasi pada Jean Charles Peltier untuk melihat kebalikan dari fenomena tersebut. Dia mengalirkan listrik pada dua buah logam yang direkatkan dalam sebuah rangkaian. Ketika arus listrik dialirkan, terjadi penyerapan panas pada sambungan kedua logam tersebut dan pelepasan panas pada sambungan yang lainnya. Pelepasan dan penyerapan panas ini saling berbalik begitu arah arus dibalik. Penemuan yang terjadi pada tahun 1934 ini kemudian dikenal dengan efek *Peltier* [2]. Efek *Seebeck* dan *Peltier* inilah yang kemudian menjadi dasar pengembangan teknologi termoelektrik.

Ketika input listrik diberikan ke termokopel TE, elektron bergerak dari material tipe-p ke material tipe-n menyerap energi termal pada sisi dingin. Elektron membuang energi lebihnya pada sisi panas ketika elektron mengalir dari tipe-n kembali ke material tipe-p melalui konektor listrik. Memindahkan panas dari sisi panas akan menurunkan temperatur pada sisi dingin dengan cepat, besarnya penurunan tergantung pada arus listrik yang digunakan.



Gambar 2.4 Thermoelectric Cooling

Sumber: *Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery*, U.S Department of Energy (November 2006)

Teknologi termoelektrik bekerja dengan mengonversi energi panas menjadi listrik secara langsung (generator termoelektrik), atau sebaliknya, dari listrik menghasilkan dingin (pendingin termoelektrik). Untuk menghasilkan listrik, material termoelektrik cukup diletakkan sedemikian rupa dalam rangkaian yang menghubungkan sumber panas dan dingin. Dari rangkaian itu akan dihasilkan sejumlah listrik sesuai dengan jenis bahan yang dipakai.

Tabel 2.1 Spesifikasi beberapa *Thermoelectric Generator*

TE Module No.	I <sub>max</sub> (A)	Q <sub>max</sub> (W)	V <sub>max</sub> (V)	DT <sub>max</sub> (°C)	T	Dimensions (mm)		
						W	L	H
9500/017/060	6,0	7,6	2,3	72	1	15,10	15,10	4,16
9500/031/060	6,0	14,0	4,3	72	1	20,00	20,00	4,16
9500/035/060	6,0	16,0	4,8	72	1	15,10	29,80	4,16
9500/071/060	6,0	32,0	9,8	72	1	29,80	29,80	4,16
9500/127/060	6,0	57,0	17,5	72	1	39,70	39,70	4,16
9501/127/060	6,0	57,0	17,5	72	1	29,70	29,70	3,61
9500/128/060	6,0	57,0	17,6	72	2	39,70	39,70	4,16

(Sumber : [www.ferrotec.com](http://www.ferrotec.com))

Pembangkit termoelektrik memiliki aplikasi dalam hal apapun yang menggunakan sumber panas sebagai penghasil listrik. mobil, *furnace*, dan *burner* adalah sedikit contoh dari aplikasi termoelektrik. Secara sederhana, pembangkit termoelektrik adalah suatu pembangkit yang menggunakan elemen peltier yang mengubah energi termal menjadi energi listrik. Hal ini didasari pada efek *Seebeck*. Ketika perbedaan temperature terjadi, elemen peltier ini akan mengalir arus sehingga menghasilkan perbedaan tegangan. Prinsip inilah yang akan digunakan untuk energi listrik alternatif pada mobil *hybrid*.

Modul termoelektrik dengan material dasar *Bismuth-Telluride* didesain utamanya untuk aplikasi pendinginan atau kombinasi pendinginan dan pemanasan dimana daya listrik membuat suatu perbedaan temperatur yang melewati modul. Jika aplikasi modul dibalik dimana perbedaan temperatur terjadi dimuka modul, hal ini memungkinkan terjadinya daya listrik. Walaupun daya keluarannya dan efisiensi pembangkitan sangat kecil, daya yang diinginkan dapat dicapai jika sumber panas tersedia. Suatu modul termoelektrik yang digunakan untuk pembangkit daya memiliki kesamaan dengan termokopel konvensional.[8]

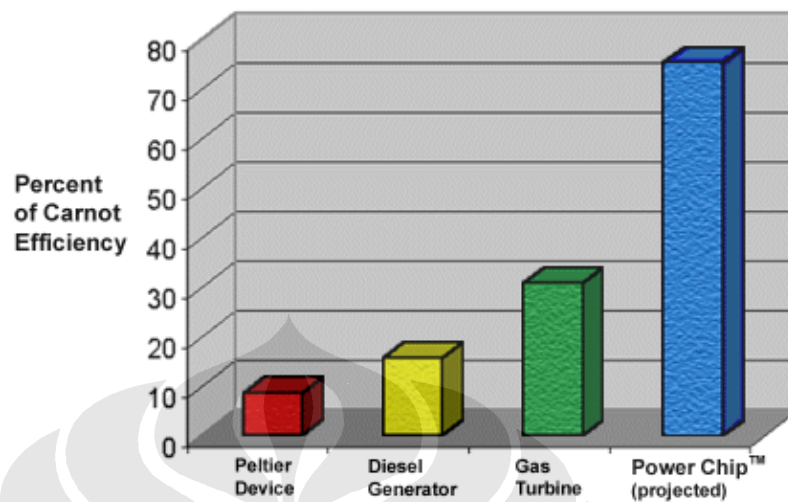
### **2.3 EFISIENSI MODUL TERMOELEKTRIK (ZT)**

Dalam aplikasi pembangkit listrik, terdapat jumlah maksimum energi yang dapat diambil. Jumlah ini adalah efisiensi karnot maksimum. Hal ini berarti perbedaan temperatur yang lebih besar antara sisi panas dan dingin, maka semakin besar daya yang dapat dihasilkan.[9]

Efisiensi karnot menggambarkan batas teoritis. Jika kita memiliki suatu mesin kalor “sempurna”, berarti mesin tersebut memiliki efisiensi karnot 100% hal ini berbeda dengan efisiensi termal, yang hampir selalu lebih kecil dari efisiensi karnot ideal.[9]

Siklus karnot dapat dipertimbangkan sebagai siklus mesin kalor yang paling efisien. Ketika hukum kedua termodinamika menyatakan bahwa tidak semua kalor yang disuplai dalam suatu mesin kalor dapat digunakan untuk melakukan kerja, efisiensi karnot menetapkan nilai batas pada fraksi kalor yang dapat digunakan.[9]

**Table: Carnot Efficiency**



Gambar 2.5 Perbandingan efisiensi peltier dengan pembangkit lainnya.

Sumber: [www.ferrotec.com](http://www.ferrotec.com)

Sebagai perbandingan, pembangkit termoelektrik memiliki efisiensi karnot sekitar 5-8%. Pembangkit siklus Rankine, seperti turbin gas, memiliki efisiensi karnot sekitar 30%, sementara itu pembangkit diesel atau *gasoline* hanya memiliki efisiensi karnot sekitar 10-15%. *Power chips* diproyeksikan mencapai efisiensi karnot sekitar 70-80%, efisiensi ini adalah yang paling besar diantara pembangkit yang lainnya (Gambar 2.8). [9]

Material TE yang baik memiliki karakteristik berikut ini:

- Konduktivitas listrik tinggi untuk meminimalkan *Joule heating* (Kenaikan dalam temperatur dari hambatan ke arus listrik yang mengalir melewatinya).
- Koefisien *Seebeck* yang besar untuk konversi panas maksimum ke daya listrik atau daya listrik ke performa *cooling*
- Konduktivitas termal yang rendah untuk mencegah konduksi termal melalui material.

Ketiga properties ini umumnya dikombinasikan kedalam parameter tertentu yang mengukur performa keseluruhan dari alat termoelektrik yaitu “figure-of-merit” atau  $Z$ . Figure-of-merit suatu material termoelektrik didefinisikan sebagai:

$$Z = \alpha^2 \sigma / \lambda \quad (2.1)$$

Dimana  $\alpha$  adalah koefisien Seebeck dari material ( $\text{volt.kelvin}^{-1}$ ),  $\sigma$  adalah konduktivitas listrik material ( $\text{ampere.volt}^{-1}.\text{meter}^{-1}$ ), dan  $\lambda$  konduktivitas termal material ( $\text{watt.meter}^{-1}.\text{kelvin}^{-1}$ ). [16]

Karena  $Z$  memiliki satuan per derajat temperatur, figure-of-merit tak berdimensi yang lebih berguna didefinisikan sebagai  $ZT$ , dimana  $T$  adalah temperature operasi rata-rata. Parameter penting ini berpengaruh pada besarnya efisiensi konversi daya maksimum atau koefisien refrigerasi maksimum dari performa alat TE. [16]

Awalnya, material TE diteliti pada tahun 1950an dan 1960an yaitu campuran *bismuth-telluride* ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), *lead-telluride* ( $\text{PbTe}$ ), dan *silicon-germanium* ( $\text{SiGe}$ ) sebagai material dengan  $ZT$  yang baik dalam daerah temperature tertentu.  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  dan campurannya telah digunakan secara luas dalam aplikasi refrigerasi TE dan beberapa aplikasi pembangkit listrik rendah, dan memiliki temperatur optimal 180-450 K. material  $\text{PbTe}$  dan  $\text{SiGe}$  telah digunakan secara luas dalam aplikasi pembangkit listrik temperatur yang lebih tinggi, umumnya pembangkit listrik untuk *spacecraft*, dan memiliki temperatur operasi optimal 500-900 K dan 800-1300K. [16]

### 2.3.1 ZT Maksimum

Walaupun tidak diketahui batas teoritis pada  $ZT$ , dalam prakteknya sulit untuk mencapai nilai  $ZT$  yang tinggi karena adanya konduktivitas listrik dan termal pada material. Konduktivitas listrik yang tinggi diperlukan untuk meminimalkan hambatan *Joule heating*, sementara itu konduktivitas termal yang rendah diperlukan untuk menjaga gradien temperatur yang besar antara sisi panas dan dingin. Memodifikasi logam untuk merubah konduktivitas listriknya



menghasilkan perubahan yang sebanding pada konduktivitas termalnya dan begitupun sebaliknya.[16]

Hubungan ini berdasarkan fakta fisik bahwa kedua perpindahan panas dan listrik melibatkan elektron-elektron bebas dalam logam. Hal ini menyebabkan batasan pada peningkatan ZT pada material, sejak peningkatan Z akan tidak membutuhkan pasangan antara kuantitas dua konduktivitas tersebut, sehingga hubungan tersebut seharusnya terjadi kebalikan tetapi hal ini tidak terjadi pada material yang sebenarnya. [16]

Sampai tahun 1990an, banyak ditemukan campuran logam dan semikonduktor untuk mendapatkan material TE yang lebih baik. Umumnya nilai ZT saat ini berkisar 1. Peneliti pada NASA-JPL, MIT-Lincoln Labs, Michigan State University dan organisasi lainnya telah melakukan eksperimen untuk mencari generasi baru dari material TE. Material tersebut yaitu *skutterudites*, *thin-film superlattice materials*, *quantum well materials*, and PbAgSbTe (LAST) *compounds* dan turunannya. Hasil eksperimen menunjukkan nilai ZT 1,5-2 atau berhasil menembus nilai ZT yang lebih tinggi 3 atau 4. Material-material ini membuatnya menjadi mungkin untuk membuat sistem TE bahwa menunjukkan nilai ZT yang lebih tinggi dari material sebelumnya karena efek *quantum well* yang cenderung mencapai dua efek penting: 1) material tersebut cenderung secara signifikan meningkatkan densitas dari material yang meningkatkan koefisien *seebeck* dalam material tersebut, 2) material tersebut cenderung memisahkan konduktivitas termal dan listrik yang menunjukkan konduktivitas termal yang rendah tanpa penurunan konduktivitas listrik. [16]

### **2.3.2 Efisiensi, ZT dan Perbedaan Temperatur**

Penting untuk mengetahui bahwa semua alat TE sangat tergantung pada temperatur, tidak hanya gradien temperatur operasi, tetapi juga nilai temperature absolut. Alat TE dapat digunakan untuk menghasilkan arus listrik searah ketika perbedaan temperature terjadi. Bagaimanapun, material termoelektrik yang tersedia saat ini memiliki nilai ZT kurang dari 1 dan efisiensi alat penghasil daya listrik jarang sekali melebihi 5%. [16]

Performa ini membatasi pembangkit TE pada aplikasi tertentu dimana kebutuhan untuk operasi terpencil, daya tahan, *no moving parts*, dan tidak bising yang merupakan kelebihan TEG. TEG juga memiliki aspek negatif dimana biaya pembuatannya cukup mahal dan efisiensi konversi yang rendah.[6]

Efisiensi maksimum pembangkit listrik termoelektrik adalah sebagai berikut:

$$\eta_{\max} = \left[ \frac{T_h - T_c}{T_h} \right] \cdot \left[ \frac{(1 + Z^* \bar{T})^{1/2} - 1}{(1 + Z^* \bar{T})^{1/2} + 1} \right] \quad (2.2)$$

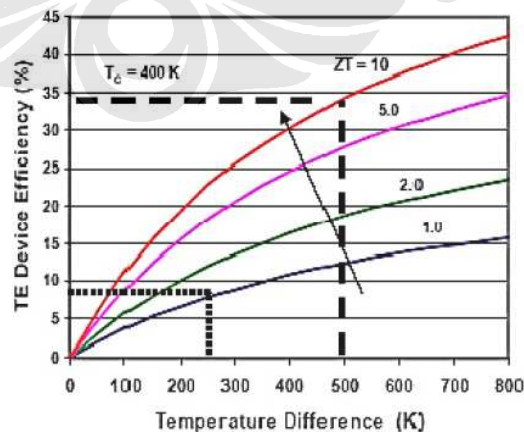
Dimana,  $Z^*$  adalah  $Z$  optimum dari kopel tipe-p/tipe-n,

$T_h$  dan  $T_c$  adalah temperature sisi panas dan dingin,

$T$  adalah rata-rata  $T_h$  dan  $T_c$ .

Dalam aplikasi pendingin TE, COP (*Coefficient of Performance*) adalah suatu kuantitas untuk mengukur efisiensi dari konversi. Jika daya listrik,  $P$ , disuplai untuk mencapai kapasitas pendinginan,  $Q_c$ , COP maksimum sebagai berikut:

$$COP_{\max} = \left[ \frac{Q_c}{P} \right] = \left[ \frac{T_c}{T_h - T_c} \right] \cdot \left[ \frac{(1 + Z^* \bar{T})^{1/2} - \frac{T_h}{T_c}}{(1 + Z^* \bar{T})^{1/2} + 1} \right] \quad (2.3)$$



Gambar 2.6 efisiensi sebagai fungsi temperatur

Sumber: *Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery*, U.S Department of Energy (November 2006)

Seperti pada Gambar 2.6 Untuk nilai T absolut yang diberikan, ZT yang lebih tinggi, efisiensi maksimum konversi panas ke listrik menjadi lebih tinggi dalam pembangkit listrik atau COP maksimum lebih tinggi dalam aplikasi refrigerasi. [16]

### 2.3.3 Teori *Thermoelectric*

Material dengan *thermoelectric properties* memiliki kemampuan untuk mengkonversi antara energi listrik dan energi panas akibat adanya *Seebeck Effect* dan *Peltier Effect*. *Seebeck Effect* berperan dalam kenaikan beda potensial akibat perbedaan temperatur yang terjadi pada *junction* dengan material yang berbeda. Material tersebut memiliki *Seebeck Coefficient* yang didefinisikan sebagai [14]:

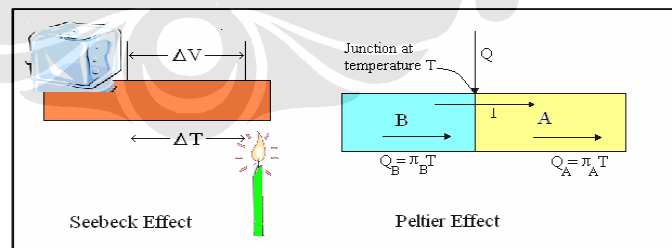
$$\alpha = \Delta V / \Delta T \quad (2.4)$$

Dimana :  $\alpha$  = koefisien seebeck V/K

$\Delta V$  = beda potensial (Volt)

$\Delta T$  = beda temperatur (K)

Material-material yang digunakan untuk modul *thermoelectric* memiliki tipe *Seebeck Coefficient* dengan range  $200\mu\text{V/K}$ . Gambar 2.7 mengiustrasikan bagaimana *Seebeck Effect* bekerja. Perbedaan temperatur menimbulkan tegangan yang melewati material.



Gambar 2.7 Ilustrasi *Seebeck Effect* dan *Peltier Effect*

Sumber: [www.directscience.com](http://www.directscience.com)

*Peltier Effect* merupakan pertukaran panas yang *reversible* yang terjadi ketika aliran arus terjadi melalui *junction* dengan dua material berbeda. Kalor  $Q$  yang dipancarkan sebagai aliran arus  $I$  dari A ke B. *Peltier coefficient*

didefinisikan sebagai  $\pi_{AB} = Q/I$ . Kemudian,  $\pi_{AB} = -\pi_{BA}$ . Ketika berhubungan dengan *thermoelectric*, sangatlah tepat untuk menandakan  $\pi_B I$  sebagai jumlah kalor yang mengalir ke *junction* dari material B akibat aliran arus terhadap *junction*. Kalor dapat dilepaskan atau diserap bergantung pada arah aliran. *Seebeck Effect* dan *Peltier Effect* dikaitkan dengan hubungan :  $\pi_A = T\alpha_A$ . Kedua efek ini sangatlah nyata dari *Joule resistance heating*. Karena kedua efek ini bekerja akibat *junction* dengan konduktor yang berbeda, kedua efek ini membuat *thermoelectric device* sangatlah unik dengan kemampuannya untuk mentransfer energi termal ke energi listrik dan sebaliknya.[14]

### 2.3.4 Modul *Thermoelectric*

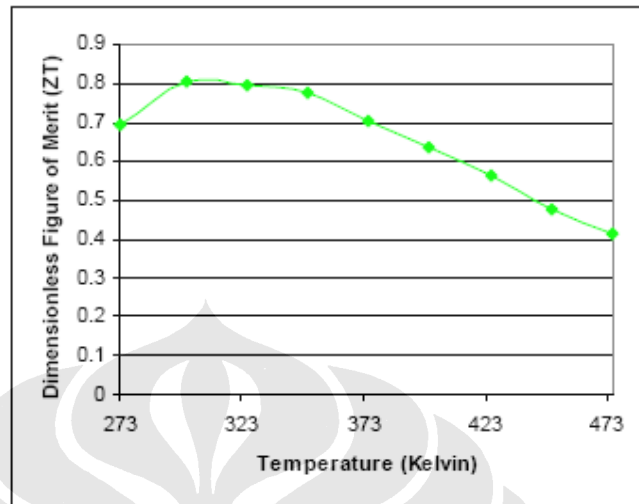
Karena ketersediaan, harga, dan temperatur operasinya, *thermoelectric*  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  sangatlah cocok untuk *waste heat recovery* sebagai *engine coolant* dan *exhaust loops*. Berikut ini adalah *properties* dari modul *thermoelectric* tipe MELCOR HT6-12-40 (n\_couple=127 dan G=0.121 cm). G merupakan perbandingan Luas/Panjang. Properties utama, seperti yang dilaporkan oleh pembuatnya, ditunjukkan pada tabel 2.2 dibawah ini. G is the ratio of Area / Length. Modul *thermoelectric* memiliki temperatur sisi panas maksimum 225 °C .[14]

Table 2.2 *Properties* penting untuk Modul *Thermoelectric*

T [K]	$\alpha$ [ $10^{-4}$ V/K]	$\rho$ [ $10^{-3}$ $\Omega$ -cm]	$\kappa$ [ $10^{-2}$ W/cm·K]	Z [ $10^{-3}$ 1/K]
273	1.94	0.92	1.61	2.54
300	2.02	1.01	1.51	2.68
325	2.07	1.16	1.53	2.44
350	2.10	1.28	1.55	2.22
375	2.00	1.37	1.58	1.88
400	1.96	1.48	1.63	1.59
425	1.90	1.58	1.73	1.32
450	1.86	1.68	1.88	1.06
475	1.79	1.76	2.09	0.87

(Sumber : Jurnal Opportunities For Thermoelectric Energy in Hybrid Vehicles)

### Nilai ZT untuk modul thermoelectric terhadap temperatur



Gambar 2.8 ZT untuk modul *thermoelectric* terhadap temperatur

Sumber: [www.directscience.com](http://www.directscience.com)

Gambar 2.8 menampilkan nilai bilangan tak berdimensi *Figure of Merit* (ZT). Seperti yang terlihat bahwa modul *Bismuth-Telluride* memiliki maksimum ZT 0.8 pada 300 K. Untuk tiap-tiap modul karakteristik kelistrikan dan termal diberikan dengan persamaan berikut :

$$V_{oc} = n_{couple} \times 2 \times \alpha \times \Delta T \quad (2.5)$$

$$K_{mod} = n_{couple} \times 2 \times \kappa \times G \quad (2.6)$$

$$R_{mod} = \frac{n_{couple} \times 2 \times \rho}{G} \quad (2.7)$$

$V_{oc}$  adalah tegangan *open circuit* atau sirkuit terbuka yang dibangkitkan melalui modul,  $K_{mod}$  adalah total *thermal conductivity* modul,  $R_{mod}$  adalah *internal resistance* modul akibat *resistivity* dari semikonduktor *p-type* dan *n-type*. Pada temperatur 400K, *internal resistance* modul adalah 3.1 ohm dan *thermal conductivity* nya adalah 0.5 W/K. Ini tidak termasuk sambungan yang digunakan dalam modul atau *thermal* dan *electrical contact resistance*, yang mana tidak diketahui nilainya.  $\Delta T$  adalah perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul *peltier*. Dari persamaan :

$$P_{gen} = I^2 R_{load} = IV \quad (2.8)$$

Arus sama dengan tegangan *open circuit* dibagi dengan total jumlah tahanan :

$$I = \frac{V_{oc}}{R_{mod} + R_{load}} \quad (2.9)$$

Aliran kalor termal yang memasuki dan keluar modul didefinisikan dengan persamaan berikut, dimana  $Q_c$  merepresentasikan kalor yang meninggalkan sisi dingin dan  $Q_h$  merepresentasikan kalor yang memasuki sisi panas. Untuk memaksimalkan daya yang dibangkitkan,  $R_{load}$  diatur hingga memiliki nilai sama dengan  $R_{mod}$ , sehingga menghasilkan :

$$Q_h = K_{mod} \Delta T + n_{couple} 2\alpha T_h I - \frac{1}{2} I^2 R_{load} \quad (2.10)$$

$$Q_c = K_{mod} \Delta T + n_{couple} 2\alpha T_c I + \frac{1}{2} I^2 R_{load} \quad (2.11)$$

Khususnya, tahap awal, *thermal conductivity* menghasilkan 70% *heat flux*. *Seebeck Effect* dan *Peltier Effect* berperan dalam 25%, dengan *Ohmic resistance* menghasilkan sisanya yaitu 5%. *Actual generated power* atau daya aktual yang dibangkitkan dari kombinasi ini ditentukan sebagai fungsi arus dan *load resistance*:

$$P_{gen} = I^2 R_{load} = \frac{V^2}{R_{load}} \quad (2.12)$$

Dengan mendefinisikan *thermal efficiency* sebagai perbandingan antara *electrical power* dan kalor yang memasuki sisi panas menghasilkan :

$$\eta_{TE} = \frac{P_{gen}}{Q_h} \quad (2.13)$$

Ketika pendekatan daya maksimum digunakan, efisiensi *thermoelectric* dapat ditulis sebagai [14] :

$$\eta_{TE} = \frac{T_h - T_c}{\frac{4}{Z} - \frac{T_h - T_c}{2} + 2T_h} \quad (2.14)$$

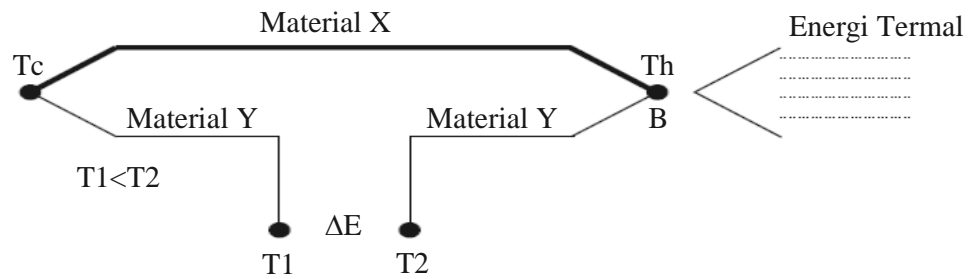
### 2.3.5 *Thermoelectric Effect*

Pada rangkaian termoelektrik terdapat tiga macam gaya gerak listrik (ggl, *emf = electro motive force*), yaitu : ggl Seebeck yang disebabkan oleh dua material logam yang berbeda, ggl Peltier yang disebabkan arus yang mengalir di dalam rangkaian, serta ggl Thomson yang disebabkan oleh adanya gradien temperatur pada material[2,13].

#### 2.3.5.1 *Efek Seebeck*

Efek ini menjelaskan bahwa jika dua kawat logam dengan material yang berbeda dihubungkan dalam suatu rangkaian tertutup dan kedua sambungannya (*junction*) dipertahankan pada temperatur yang berbeda maka arus listrik akan mengalir dalam rangkaian tersebut dan ketika salah satu kawatnya diputuskan lalu disambung dengan sebuah galvanometer, maka akan terlihat perbedaan tegangan dari kedua ujung tersebut. Sehingga dengan demikian dapat dikatakan bahwa perbedaan temperatur dapat mengakibatkan perbedaan tegangan atau akan menghasilkan gaya gerak listrik[2,13].

Saat ini Efek Seebeck dipergunakan luas sebagai prinsip kerja termokopel. Gambar 2.9 menjelaskan prinsip kerja termokopel untuk mengukur temperatur dengan menggunakan efek Seebeck. Dalam penerapan pengukuran temperatur, sambungan termokopel pada titik A digunakan sebagai titik referensi dan dijaga pada temperatur dingin relatif,  $T_c$ . Sedangkan sambungan termokopel B diletakkan pada titik yang ingin diketahui temperaturnya ( $T_h$ ), dimana dalam contoh ini nilainya lebih tinggi dari temperatur  $T_c$ . Dengan adanya energi termal yang berpindah dari titik B ke titik A, maka timbul tegangan dan arus listrik akan mengalir melewati terminal  $T_1$  dan  $T_2$ . [2,13]



Gambar 2.9 Fenomena efek Seebeck  
 Sumber:www.efunda.com

Tegangan yang muncul ( $V_0$ ), yang dikenal sebagai *emf* Seebeck, dapat dinyatakan dengan persamaan Seebeck [13]:

$$V_0 = \alpha_{XY} (T_h - T_c) \quad (2.15)$$

Di mana :

$V_0$  = Tegangan keluaran (Volt)

$\alpha_{XY}$  = Koefisien Seebeck antara dua material, X dan Y, (Volt/K)

$T_h, T_c$  = Temperatur termokopel panas dan dingin (K)

Nilai koefisien Seebeck ( $\alpha_{XY}$ ) tergantung dari jenis material yang digunakan, dan nilai koefisien tersebut bisa bernilai positif atau negatif. Dengan mengetahui nilai koefisien Seebeck, maka arah aliran arus juga bisa diketahui apakah mengalir dari  $T_1$  ke  $T_2$  atau sebaliknya. Koefisien Seebeck (*thermoelectric sensitivities*) beberapa material umum pada 0 °C (32 °F) tercantum dalam tabel berikut menjelaskan beberapa kemungkinan pasangan kawat. Sebagai contoh, besi atau tembaga dapat diletakkan pada terminal positif sedangkan konstantan digunakan untuk terminal negatif dari rangkaian termokopel (termokopel jenis J dan T)[13].



Tabel 2.3 Koefisien *Seebeck*

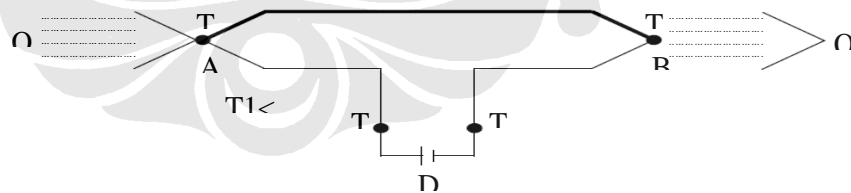
<u>MATERIAL</u>	<u>SEEBECK</u> <u>COEFF.*</u>	<u>MATERIAL</u>	<u>SEEBECK</u> <u>COEFF.*</u>	<u>MATERIAL</u>	<u>SEEBECK</u> <u>COEFF.*</u>
Aluminum	3.5	Gold	6.5	Rhodium	6.0
Antimony	47	Iron	19	Selenium	900
Bismuth	-72	Lead	4.0	Silicon	440
Cadmium	7.5	Mercury	0.60	Silver	6.5
Carbon	3.0	Nichrome	25	Sodium	-2.0
Constantan	-35	Nickel	-15	Tantalum	4.5
Copper	6.5	Platinum	0	Tellurium	500
Germanium	300	Potassium	-9.0	Tungsten	7.5

\*: Units are  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ; all data provided at a temperature of  $0^\circ\text{C}$  ( $32^\circ\text{F}$ )

(Sumber [http://www.efunda.com/designstandards/sensors/thermocouples/thmcpole\\_theory.cfm](http://www.efunda.com/designstandards/sensors/thermocouples/thmcpole_theory.cfm))

### 2.3.5.2 Efek Peltier

Fenomena efek peltier merupakan kebalikan dari fenomena efek Seebeck. Terlihat pada Gambar 2.10, bahwa jika 2 buah kawat logam dengan material yang berbeda (material A dan B) diberikan perbedaan tegangan, maka akan menghasilkan perbedaan temperatur. [2] Perbedaan temperatur yang dihasilkan sebanding dengan jumlah arus searah yang dialirkan, sehingga nantinya ada bagian yang akan menyerap kalor dan ada bagian yang melepaskan kalor[2,13].

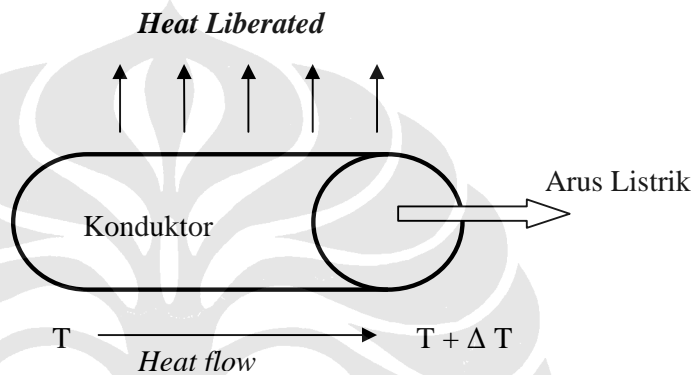


Gambar 2.10 Efek *Peltier*  
Sumber: [www.efunda.com](http://www.efunda.com)

Yang perlu diperhatikan dari efek Seebeck dan Peltier adalah bahwa keduanya bersifat reversibel. Artinya jika proses tersebut terbalik, maka panas dan dinginnya akan bertukar tempat pada ujung-ujung sambungan.[13]

### 2.3.5.3 Efek Thomson

Ketika suatu arus listrik dilewatkan melalui suatu konduktor yang memiliki gradien temperatur melebihi panjangnya, kalor hanya akan diserap oleh konduktor atau dilepaskan dari konduktor (hanya salah satu, diserap atau dilepas, tidak keduanya)[13,16]. Kalor diserap atau dilepaskan tergantung pada arah arus listrik dan gradien temperatur. Efek ini digunakan untuk menganalisa kalor yang dilepas atau yang diserap oleh seluruh permukaan modul termoelektrik.



Gambar 2.11 Efek Thomson

Sumber: Idam Bariyanto. "DESAIN AWAL, MANUFATUR DAN PENGUJIAN VACCINE CARRIER MENGGUNAKAN PELTIER GANDA DAN HEATSINK-FAN SEBAGAI ALAT PENDINGIN SISI PANAS PELTIER"

Berdasarkan gambar Gambar 2.11 nilai kalor yang dilepas atau diserap tersebut untuk setiap satuan panjangnya adalah [13]:

$$Q_{\tau} = \tau \times I \times \frac{dT}{dx} \quad (2.16)$$

di mana :

$Q_{\tau}$  = Jumlah kalor yang diserap/dilepaskan persatuan panjang (W/m)

$\tau$  = Koefisien Thomson (Volt/K)

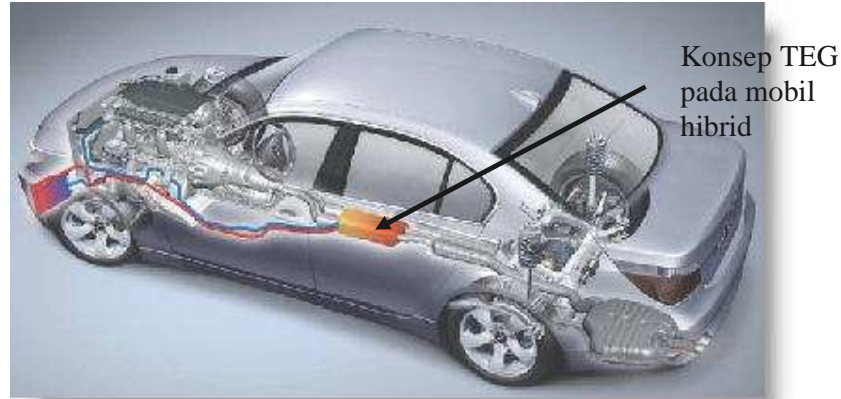
$I$  = Arus listrik yang mengalir (A)

## 2.4 PERKEMBANGAN *THERMOELECTRIC GENERATOR*

Saat ini banyak sekali isu-isu yang berkembang tentang masalah makin menipisnya cadangan minyak diseluruh dunia. Karena itu, untuk mengatasi permasalahan tersebut Jepang sudah mengembangkan teknologi untuk menggunakan bahan bakar alternatif yaitu mobil *hybrid*. [10]

Khusus untuk mobil *hybrid* menggunakan suplai listrik ,selain *gasoline*, untuk menjalankannya. Suplai listrik ini berasal dari baterai yang ditempatkan dibagian mobil. Sebagai tambahan suplai energi listrik dapat digunakan teknologi pembangkit termoelektrik dengan hanya sumber panas yang akan diubah menjadi energi listrik. Pembangkit termoelektrik ini sangat ramah lingkungan karena tidak menimbulkan polusi bahkan menambah efisiensi dari mobil dimana panas buang dimanfaatkan kembali untuk suplai energi listrik. Sejumlah modul termoelektrik yang telah didesain tertentu dapat dipasang dibagian *manifold* mesin atau disekitar *muffler*. Panas buangnya lalu diubah menjadi arus DC yang akan mengisi baterai pada mobil *hybrid*. Suatu mesin pembakaran akan mengalami rugi sekitar 36% dari energi potensialnya dalam *gasoline* melalui panas yang dibuang kelingkungan. Jadi, terdapat energi yang cukup besar dalam bentuk panas yang dapat diubah menjadi daya untuk membantu suplai listrik pada mobil *hybrid* (Gambar 2.12). [11]

Hasil penelitian dengan dua belas modul termoelektrik yang dipasang disekitar sisi-sisinya. Output dari pembangkit termoelektrik ini sekitar 8 watt. Daya ini memang cukup kecil akan tetapi hal ini telah menunjukkan bahwa pembangkit termoelektrik memiliki prospek yang cerah dimasa depan sebagai alternatif energi listrik. Jadi, dimanapun ada energi buang dalam bentuk panas pembangkit termoelektrik dapat menghasilkan daya. [15]



Gambar 2.12 konsep *thermoelectric generator* pada mobil *hybrid*  
Sumber: [www.thermo1.com](http://www.thermo1.com)

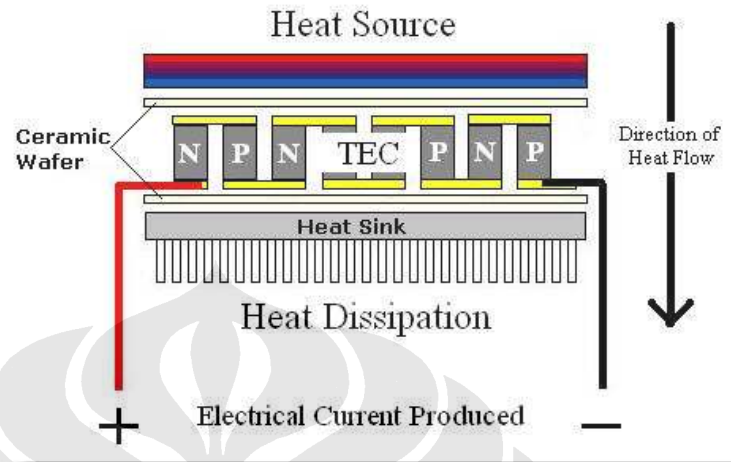
Modul termoelektrik adalah sirkuit terintegrasi dalam bentuk solid yang menggunakan tiga prinsip termodinamika yang dikenal sebagai efek Seebeck, Peltier dan Thompson. Konstruksinya terdiri dari sepasang material semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang membentuk termokopel yang memiliki bentuk seperti *sandwich* antar dua wafer keramik tipis.



Gambar 2.13 Elemen peltier  
Sumber: [www.powerchips.com](http://www.powerchips.com)

Termoelektrik di atas dihubungkan secara listrik dalam seri dan paralel secara termal (Gambar 2.13). Modul ini dapat digunakan untuk menghasilkan panas dan dingin dimasing-masing sisinya jika arus listrik digunakan atau untuk

menghasilkan listrik ketika panas dan dingin digunakan sebagai perbedaan temperaturnya.



Gambar 2. 14 prinsip kerja *thermoelectric generator*  
Sumber: [www.powerchips.com](http://www.powerchips.com)

Sejumlah arus dihasilkan berdasarkan perbedaan temperatur antar kedua sisi modul. Heat sink digunakan untuk membantu meningkatkan pelepasan kalor pada sisi dingin sehingga meningkatkan efisiensi dari modul tersebut (Gambar 2.14). Potensi pembangkitan daya dari modul termoelektrik tunggal akan berbeda-beda tergantung pada ukurannya, konstruksinya dan perbedaan temperaturnya. Perbedaan temperatur yang makin besar antara sisi panas dan sisi dingin modul akan menghasilkan tegangan dan arus yang lebih besar. Modul-modul termoelektrik dapat juga disambungkan bersama baik secara seri ataupun paralel seperti baterai untuk menghasilkan tegangan atau arus. Tiap modul mampu menghasilkan tegangan rata-rata 1-2 volt DC dan bahkan sampai 5 volt DC tergantung variasi panas dan pendinginan, tetapi umumnya satu modul termoelektrik menghasilkan 1.5-2 volt DC. Keuntungan system ini adalah ia akan terus menghasilkan listrik selama panas masih ada pada *manifold* mesin atau *muffler* walaupun mesin telah dimatikan.[10]

Nilai ini sangat tergantung dari perbedaan temperature yang didapatkan. Karena panas buang kendaraan bersifat fluktuatif, nilai daya yang dihasilkan mungkin berubah-ubah tetapi selama mesin dinyalakan nilai dayanya akan terus ada. Hal penting yang patut lainnya adalah bahwa daya keluaran adalah hasil

perbedaan temperature kedua sisi modul termoelektrik. Artinya bukan berarti bagaimana mendapatkan temperatur panasnya, akan tetapi seberapa besar perbedaan temperatur yang didapatkan. Semua ini berhubungan dengan efisiensi dari termoelektrik itu sendiri. Jika perbedaan temperaturnya makin besar maka daya keluaranya juga makin besar, hingga titik maksimum efisiensi peltier tersebut. Jadi ada kemungkinan walaupun perbedaan temperaturnya sangat besar tetapi daya yang dihasilkannya lebih kecil.

Nilai efisiensi modul termoelektrik dapat ditingkatkan dengan cara panas didisipasi diatas sisi dingin modul, seperti penggunaan *heat sink*, *fan water jacket* atau hanya dengan memberika temperatur lingkungan diatas sisi dingin modul untuk menjaga perbedaan temperatur dengan sisi panasnya.

Unuk penelitian ini modul dapat dipasang dibagian *manifold* mesin atau *muffler* dari kendaraan. Jika ingin mendapatkan sumber panas yang cukup tinggi maka perlu dipasang di *manifold* mesin karena suhunya dapat mencapai 100 °C. Udara yang mengalir di atas modul dapat digunakan untuk mendisipasi panas dari modul pada sisi dinginnya. Modul termoelektrik ini telah didesain tertentu agar dapat dipasang dibagian manifold hingga *muffler* kendaraan. Jadi kita dapat menempatkannya sesuai dengan keinginan kita yaitu seberapa besar perbedaan temperature yang diinginkan dan daya keluaran yang dihasilkan.

Jika lebih dari satu modul sedang digunakan, hubungkan modul secara listrik dalam susunan seri. Alasannya adalah tiap-tiap modul memiliki tegangan yang berbeda. Tegangan tiap-tiap modul perlu disamakan jika modul-modul tersebut dihubungkan secara paralel. Dan tegangan yang didapatkan diubah dengan DC-DC *converter* untuk mengetahui seberapa besar nilai tegangan yang didapatkan[11]. Hasil penelitian ini direncanakan akan dihubungkan ke baterai yang dapat diisi ulang. Baterai ini tentunya akan membantu suplai listrik bagi mobil *hybrid*.

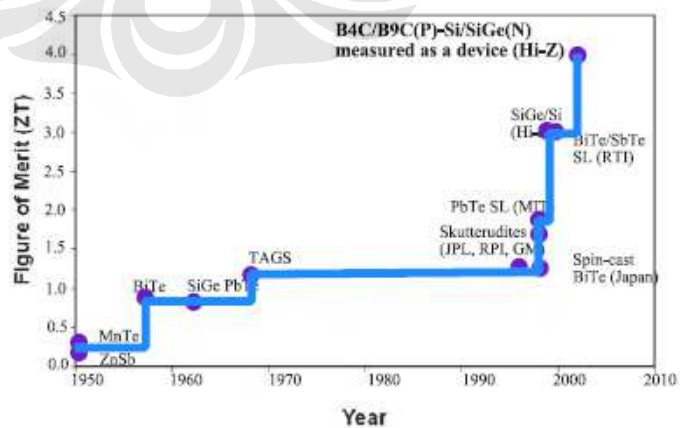
Saat ini aplikasi TEG telah banyak diterapkan diberbagai bidang. seperti delapan modul peltier (HZ-14) digunakan pada *glycol generator* dapat menghasilkan 60 Watt dengan temperatur ambien 15-30<sup>0</sup>C dan temperatur operasi berkisar 175-200<sup>0</sup>C [18]. Besarnya daya yang dihasilkan dikarenakan modul yang digunakan tersebut adalah khusus TEG bukan TEC dan perbedaan

temperaturnya mencapai  $170^{\circ}\text{C}$ . Perkembangan teknologi Hi-Z mengalami kemajuan yang pesat, karena saat ini teknologi Hi-Z mampu mencapai nilai ZT 3,2 walaupun diproduksi masih dalam skala kecil.[19]



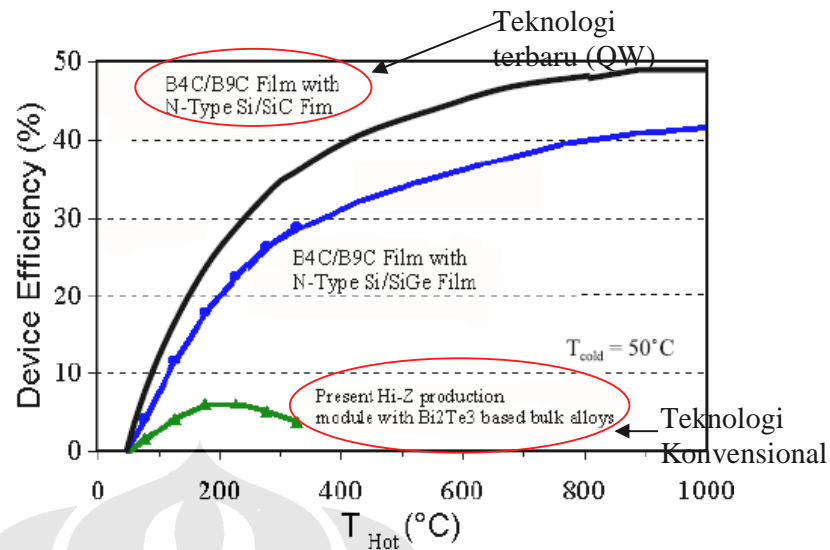
Gambar 2.15 Modul termoelektrik H-Z

Teknologi Hi-Z umumnya disusun dengan material  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  dimana nilai ZT yang dicapai hanya berkisar 1 (Gambar 2.15) dan efisiensi modul yang dicapai kurang dari 10%. Kemudian Hi-Z ini mengalami perkembangan dengan materialnya terdiri dari tipe-n terbuat dari Si/SiGe dan material tipe-p terbuat dari  $\text{B}_4\text{C}/\text{B}_9\text{C}$ . Material tersebut seringkali dikenal dengan *Quantum Well material* (QW). Dengan tipe Hi-Z ini mampu beroperasi dengan  $T_c = 50^{\circ}\text{C}$  dan  $T_h = 300^{\circ}\text{C}$  dan nilai ZT yang dicapai sekitar 4 (Gambar 2.16). Untuk efisiensi dari QW ini mampu mencapai lebih dari 40% (Gambar 2.17).[20]



Gambar 2.16 Sejarah perkembangan ZT dari material tertentu

(Sumber: S. Ghamaty and N. B. Elsner. *Hi-Z Technology, Inc. "QUANTUM WELL THERMOELECTRIC DEVICES"*. 2005)



Gambar 2.17 Efisiensi modul

(Sumber: S. Ghamaty and N. B. Elsner. *Hi-Z Technology, Inc. "QUANTUM WELL THERMOELECTRIC DEVICES". 2005*)

## 2.5 PERPINDAHAN KALOR

Perpindahan kalor yang terjadi pada *Thermoelectric Generator* adalah dengan cara konduksi dan konveksi. Konduksi terjadi pada dinding bodi aluminium. Sedangkan konveksi terjadi pada sirip-sirip *Heatsink*. [4,5]

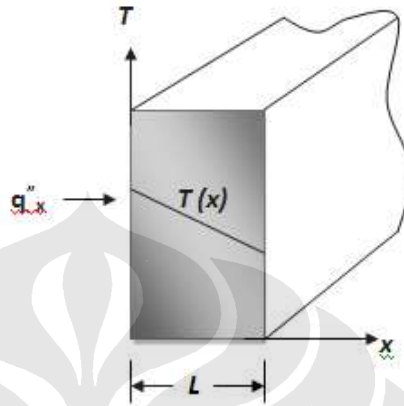
Konveksi yang terjadi pada sirip-sirip heat sink dan udara di sekitar alat uji adalah konveksi bebas atau alamiah dan *forced convection* dengan kipas angin. Konveksi bebas terjadi karena pergerakan fluida yang terjadi dikarenakan adanya gaya apung (*bouyancy force*) akibat perbedaan densitas fluida tersebut. Sedangkan konveksi yang terjadi pada sirip-sirip *Heatsink* adalah konveksi paksa, karena terdapat gaya luar yang berasal dari *Fan* yang menggerakkan fluida disekitar *Heatsink*. [4,5]

### 2.5.1 Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan kalor yang terjadi secara konduksi berarti perpindahan kalor/panas tanpa diikuti oleh perpindahan dari molekul benda tersebut. Konduksi juga dapat dikatakan sebagai transfer energi dari sebuah benda yang memiliki energi yang cukup besar menuju ke benda yang memiliki energi yang rendah.



Contoh kasus perpindahan kalor konduksi terlihat pada Gambar 2.18 perpindahan kalor yang terjadi secara konduksi adalah pada saat kita memanasi sebuah besi pada salah satu ujung besi tersebut. Maka panas yang berasal dari salah satu ujung besi akan merambat menuju ke sisi yang lainnya[16].



Gambar 2.18 Perpindahan kalor Secara Konduksi

Persamaan yang digunakan untuk perpindahan kalor konduksi dikenal dengan Hukum Fourier, yaitu :

$$q = -k.A \frac{T_0 - T_1}{\Delta x} \quad (2.17)$$

Jika suatu benda padat disusun berlapis dari material yang berbeda, maka untuk mengetahui nilai perpindahan kalor yang terjadi dapat digunakan pendekatan sistem resistansi listrik. Besarnya tahanan termal yang terjadi adalah perbandingan selisih suhu diantara kedua permukaan ( $T_0 - T_1$ ) dengan laju aliran kalor  $q$  (J/s)[4,5].

Untuk mencari nilai tahanan termal dari suatu material padatan digunakan rumus :

$$R_T = \frac{T_0 - T_1}{q} = \frac{l}{kA} \quad (2.18)$$

dimana :

$q$  = energi kalor (W)

$k$  = konduktivitas thermal (W/m.K)

- $A$  = luas permukaan ( $m^2$ )
- $\Delta x$  = tebal penampang permukaan (m)
- $T_0$  = Temperatur yang lebih tinggi (K)
- $T_1$  = Temperatur yang lebih rendah (K)

Nilai minus, (-) dalam persamaan diatas menunjukkan bahwa kalor selalu berpindah ke arah temperatur yang lebih rendah.[4,5]

### 2.5.2 Perpindahan Kalor Konveksi

Perpindahan kalor yang terjadi secara konveksi berarti perpindahan kalor tersebut disertai dengan gerakan benda tersebut. Sebagai contoh dari peristiwa terjadinya perpindahan kalor secara konveksi adalah pada saat kita memasak air. Fenomena pada air yang kita masak terlihat bahwa molekul air yang panas akan bergerak naik keatas sedangkan molekul air yang bersuhu lebih dingin akan turun ke bawah karena berat jenisnya lebih berat. Pergerakan yang terjadi pada molekul air ini yang dapat kita sebut sebagai perpindahan kalor yang terjadi secara konveksi[4,5].

Konveksi sendiri dapat dibagi menjadi 2, yaitu konveksi bebas atau konveksi alamiah dan konveksi paksa. Konveksi bebas atau konveksi alamiah terjadi apabila pergerakan fluida dikarenakan gaya apung (*bouyancy force*) akibat perbedaan densitas fluida tersebut. Perbedaan kerapatan itu sendiri bisa terjadi karena adanya perbedaan temperatur akibat proses pemanasan. Sedangkan pada konveksi paksa pergerakan fluida terjadi akibat oleh gaya luar seperti dari kipas (*Fan*) atau pompa. Pada perpindahan kalor konveksi berlaku hukum pendinginan Newton, yaitu[4,5] :

$$q = h.A(T_s - T_\infty) \quad (2.19)$$

dimana :

- $q$  = energi kalor (W)
- $h$  = koefisien perpindahan kalor konveksi ( $W/m^2.K$ )
- $A$  = luas area permukaan ( $m^2$ )

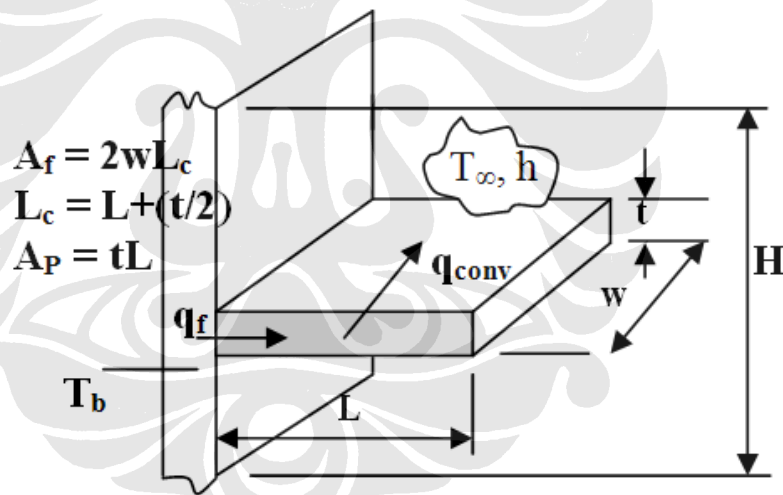
$T_s$  = temperatur permukaan (K)

$T_\infty$  = temperatur *ambient*

### 2.5.3 Perpindahan Kalor Konveksi Pada Fin

Salah satu komponen penting dari alat ini adalah heat sink. *Heatsink* ini digunakan untuk membantu mendisipasi panas dari sisi dingin ke lingkungan. Berarti tujuan penggunaannya adalah meningkatkan proses transfer panas agar perbedaan temperature antara sisi dingin dengan sisi panas dapat meningkat.

Umumnya heat sink yang digunakan dari campuran aluminium atau dari bahan perak. Kedua material tersebut memiliki konduktivitas termal yang tinggi. Walaupun termal konduktivitas termal perak lebih tinggi dari aluminium, aluminium adalah pilihan umum sebagai *heatsink*. Aluminium memiliki beberapa keuntungan diantaranya harganya lebih murah dan beratnya lebih ringan dibandingkan perak.



Gambar 2.19 Profil *extended surface* (fin)

Masing-masing fin memiliki unjuk kerja tertentu tergantung pada bentuk dan dimensinya. Untuk pengujian ini, digunakan *rectangular fin* (Gambar 4.1 (a), (b)). Dengan mengkondisikan fin pada alat uji berlaku sifat *one-dimensional* dan *steady state conduction*, maka dapat dihitung laju perpindahan kalor dan besar efisiensi pada fin. Fin yang digunakan pada pengujian ini diasumsikan luas permukaannya seragam. Sehingga laju perpindahan kalor untuk fin tunggal,  $q_f$ , sebagai berikut [Sumber: Incropera hal 136-144]:

$$q_f = \sqrt{hPkA_c} \theta_b \frac{\sinh mL + (h/mk) \cosh mL}{\cosh mL + (h/mk) \sinh mL} \quad (2.20)$$

Unjuk kerja dari fin dikenal dengan efisiensi fin,  $\eta_f$ . Efisiensi fin merupakan ukuran dari unjuk kerja termal dari fin dimana efisiensi ini menunjukkan perbandingan laju transfer fin dengan laju transfer kalor maksimum. [incropera]

$$\eta_f = \frac{q_f}{q_{\max}} = \frac{q_f}{hA_f \theta_b} \quad (2.21)$$

Dimana  $A_f$  adalah area permukaan fin,  $h$  adalah koefisien konveksi lingkungan,  $\theta_b = T_b - T_{\text{amb}}$ . Efisiensi di atas merupakan efisiensi untuk fin tunggal (Gambar. 4.1. (a)). Untuk fin lebih dari satu, formula yang umum digunakan adalah *overall surface efficiency*,  $\eta_o$ . Efisiensi permukaan keseluruhan ini didefinisikan sebagai:

$$\eta_o = \frac{q_t}{q_{\max}} = \frac{q_t}{hA_t \theta_b} \quad (2.22)$$

Dimana  $q_t$  merupakan laju kalor total dari luas permukaan  $A_t$ . Jika pada fin terdapat  $N$  jumlah susunannya, permukaan fin  $A_f$ , luas permukaan dasar  $A_b$ , maka luas permukaan total  $A_t$  sebagai berikut:

$$A_t = NA_f + A_b \quad (2.23)$$

Persamaan-persamaan tersebut berlaku bila permukaan fin keseluruhan dijaga pada temperature tertentu (temperatur pada permukaan dasar),  $T_b$ . Nilai koefisien konveksi diasumsikan sama untuk permukaan fin dan dasar. Laju kalor total karena konveksi dari fin dan permukaan dasarnya adalah:

$$q_t = hA_t \left[ 1 - \frac{NA_f}{A_t} (1 - \eta_f) \right] \theta_b \quad (2.24)$$

Efisiensi permukaan keseluruhan dapat juga dirumuskan dalam bentuk fin tunggal,  $\eta_f$  :

$$\eta_o = 1 - \frac{NA_f}{A_t} (1 - \eta_f) \quad (2.25)$$