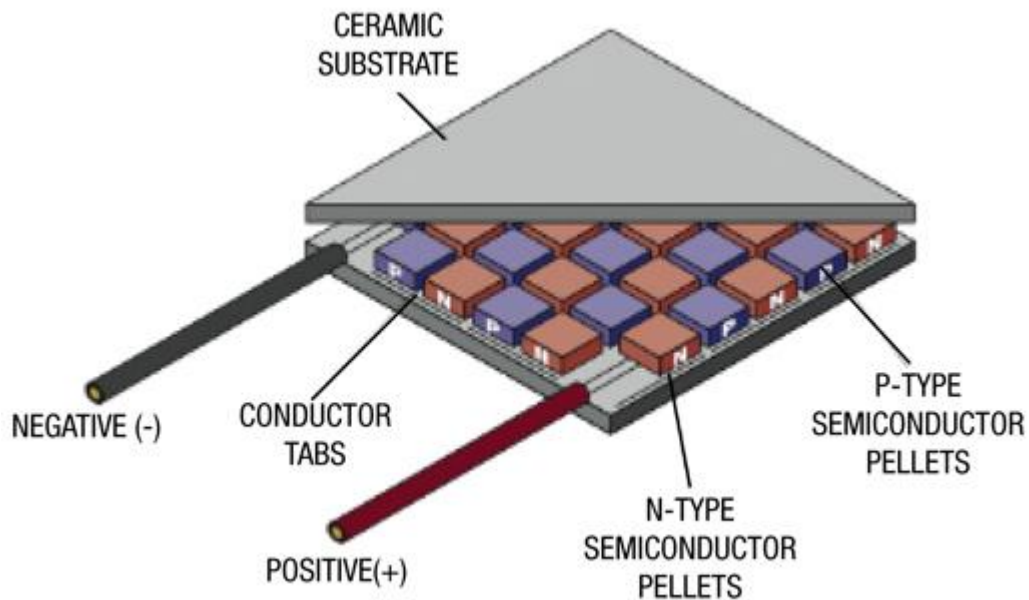


2. DASAR TEORI

2.1. Modul *Thermoelectric*

Modul *Thermoelectric* merupakan sebuah alat yang dapat berfungsi sebagai modul pendingin dan modul generator yang dapat menghasilkan energi listrik. Modul ini terdiri dari dua atau lebih unsur semikonduktor bahan yang terhubung elektrik secara seri. Secara termal, Sisi panas dan sisi dingin dari modul tersebut disusun secara paralel. Elemen termoelektrik dan penghantar listrik tersebut diapit di antara dua substrat keramik.



Gambar 2. 1 *Thermoelectric Generator*

Sumber : <http://theelectricenergy.com/thermoelectric-generator-teg/>

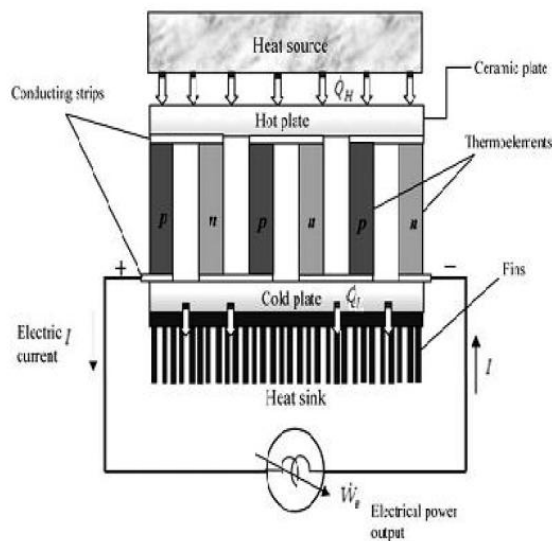
Elemen *thermoelectric* terdiri dari semikonduktor yang berpasangan yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik. Terdapat banyak jenis bahan semikonduktor yang dapat digunakan menyusun elemen tersebut. Elemen tersebut biasanya terbuat dari bahan semikonduktor, seperti *bismuth-telluride*, *lead-telluride*, *antimony telluride*, dan *silicon-germanium semiconductor alloys*. Pemilihan jenis bahan elemen tersebut tergantung tempat pemakaian dan range suhu pengoperasian.

Material keramik yang membungkus modul tersebut berfungsi melindungi elemen-elemen semikonduktor yang menyusun di dalamnya. Penggunaan bahan keramik ini mempunyai tujuan yaitu keramik merupakan material yang kuat, keras dan juga tahan korosi. Selain itu keramik memiliki kerapatan yang rendah dan juga titik lelehnya yang tinggi. Sifat termal bahan keramik adalah memiliki konduktansi termal yang baik untuk menyediakan perpindahan panas dengan tahan panas minimal. Keramik yang paling banyak digunakan pada *thermoelectric* adalah keramik *aluminium oksida* (Al_2O_3).

Konduktor listrik digunakan sebagai kontak listrik antara pelet satu dengan pelet yang lain dari elemen semikonduktor. Kontak antar pelet tersebut disusun sedemikian rupa sehingga semua pelet terhubung elektrik secara seri. Kabel pada termoelektrik berfungsi untuk menghubungkan modul dengan beban sehingga energi listrik yang dihasilkan modul tersebut dapat menyalakan komponen elektronik.

2.2. Prinsip Kerja *Thermoelectric*

Teknologi *thermoelectric generator* (TEG) adalah teknologi termoelektrik yang menggunakan prinsip efek Seebeck untuk mengubah secara langsung panas menjadi energi listrik, yaitu dengan cara menempelkan salah satu sisi modul ke sumber panas namun menjaga sisi yang lain pada suhu yang lebih rendah. Selanjutnya jika dua terminal keluaran diberi suatu beban, maka arus listrik akan mengalir ke beban tersebut. Panas dari sumber panas akan mengalir pada sisi panas plat keramik menuju termoelemen yang berada di dalam termoelektrik dan kemudian akan melewati plat keramik sisi satunya untuk didinginkan oleh media pendingin. Media pendingin umumnya menggunakan udara atau air menggunakan alat penukar panas (*heat exchanger*) berupa sirip-sirip.



Gambar 2. 2 Prinsip efek Seebeck pada *thermoelectric*

Sumber : Sugiyanto, Umam, M. T., & Suciawan, E. (2015). Forum Teknik Vol 36. *Rancang Bangun Konstruksi TEG (Thermoelectric Generator) Pada Knalpot Sepeda Motor untuk Pembangkit Listrik Mandiri* , 56-63.

2.3. Efek – efek dalam *Thermoelectric*

Termoelektrik modul beroperasi berdasarkan perpindahan energi, entropi, pembawa muatan dalam semikonduktor, yang dipengaruhi oleh *Seebeck Effect* dan *Peltier Effect*. Efek-efek yang terjadi pada termoelektrik dapat dianalisa oleh pendekatan rumus *Osnager*, yang merumuskan interferensi dari dua atau lebih proses *irreversible* yang terjadi secara bersamaan dalam sebuah sistem (konduksi listrik dan konduksi panas adalah proses *irreversible* yang muncul ketika energi listrik dialirkan untuk TEM). Parameter penting dari pendekatan *Osnager* adalah koefisien kinetik L_{ij} , pendekatan ini untuk kasus tertentu dari efek termoelektrik :

$$L_{11} = \frac{T}{e^2} \frac{1}{\rho}$$

$$L_{12} = -\frac{T^2}{e^2} \frac{1}{\rho} S$$

$$L_{13} = \frac{T^3}{e^2} \frac{1}{\rho} S^2 + T^2 k$$

Dimana S adalah entropi per *carrier*, e merupakan muatan elektron, ρ merupakan hambatan listrik, k merupakan konduktivitas termal, T merupakan temperatur.

Aliran panas dan arus termoelektrik dapat dihitung melalui persamaan koefisien kinetik, yang berhubungan dengan sifat-sifat termoelektrik seperti konduktivitas termal dan listrik. Dari persamaan 1, kita dapat mencari termoelektrik koefisien efek-efek di dalam termoelektrik.

$$\text{Peltier coefficient} \quad \pi_{AB} = \frac{T}{e} (S^B - S^A)$$

$$\text{Thomson coefficient} \quad \tau = \frac{T}{e} \frac{dS}{dT}$$

$$\text{Seebeck coefficient} \quad \alpha_{AB} = \frac{1}{e} (S^B - S^A)$$

Salah satu parameter yang paling relevan dari sistem termoelektrik, yang menggabungkan koefisien (2) dan memberikan ukuran efisiensi TEM, yaitu *figure of merit* Z . *Figure of Merit* adalah nilai untuk menentukan karakteristik dari performa suatu termoelektrik.

$$Z = \frac{\alpha^2}{\rho k}$$

Seebeck koefisien α adalah tegangan yang dihasilkan per unit suhu. Koefisien ini merupakan sifat utama dari material, dan hal itu berkaitan dengan transpor muatan. Perlu diingat bahwa α berbanding lurus dengan entropi dibawa oleh fluks S , yang diperoleh dengan rumus :

$$S = e \alpha$$

Termoelektrik sudah dikembangkan untuk meningkatkan nilai efisiensinya. Nilai efisiensi tersebut dapat ditingkatkan melalui kombinasi dari perbedaan material dari segmen-segmennya hingga jenis kaki pada termokopelnya, tetapi dengan kondisi bahwa material harus sesuai dengan kriteria kesesuaian, hal itu diungkapkan oleh *Snyder*. Pendekatan ini menggunakan analisa

termodinamika tentang studi sifat-sifat dari termoelektrik, seperti *Seebeck Coefficient*, hambatan listrik, dan konduktivitas termal. Melalui pendekatan ini, kita dapat menghitung faktor kesesuaian s ,

$$s = \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\alpha T}$$

Dengan Z adalah *Figure of Merit*, T adalah suhu rata-rata, dan α adalah *Seebeck Coefficient*.

Menurut informasi di atas, penting untuk menganalisis dampak dari Koefisien *Seebeck* pada kinerja sistem untuk memahami sifat dari sistem termoelektrik jika ditempatkan pada konfigurasi yang berbeda. Menurut koefisien *Seebeck*, disebutkan bahwa ketika terjadi perbedaan suhu pada permukaan logam, $\Delta T = T_h - T_c$, dengan $T_h > T_c$, terjadi peristiwa difusi elektron dari ujung panas ke bagian ujung dingin. Kondisi tersebut menyebabkan elektron meninggalkan ion logam positif yang berada di wilayah panas. Hal itu menyebabkan terakumulasinya banyak elektron di daerah dingin. Situasi tersebut akan terjadi sampai terciptanya medan listrik antara ion positif di kawasan panas dan kelebihan elektron di daerah dingin. Hal itu juga menyebabkan terciptanya beda potensial antara ujung panas dan dingin dengan ujung panas pada potensi positif. Besar beda potensial tersebut dapat dihitung sebagai berikut :

$$\alpha = \frac{\Delta V}{\Delta T}$$

Dengan ΔV adalah beda potensial, ΔT adalah beda temperature, dan α adalah Koefisien *Seebeck*.

2.4. Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor atau *heat transfer* merupakan ilmu untuk mengidentifikasi perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur diantara benda atau material. Dalam kehidupan sehari-hari kita sangat akrab dengan benda atau alat-alat baik yang dapat menghantarkan panas

(konduktor) maupun alat yang tidak dapat menghantarkan panas/kalor (isolator). Misalnya saat kita membuat minuman teh atau kopi. Setelah kita memasukkan gula dan kopi/teh ke dalam gelas, kemudian menuangkan air panas ke dalam gelas tersebut, dan mengaduknya menggunakan sendok logam, maka tangan kita terasa panas/hangat. Terdapat 3 jenis perpindahan kalor yaitu :

1. Konduksi

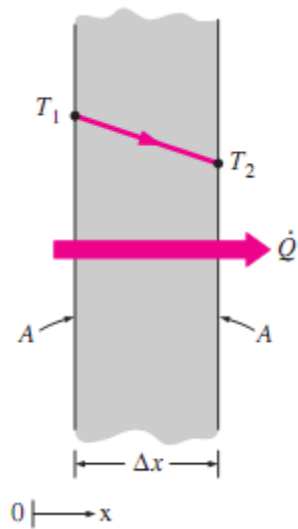
Perpindahan kalor/panas melalui perantara, di mana zat perantaranya tidak ikut berpindah. Perpindahan panas secara konduksi ini terjadi karena adanya gerakan energi dari partikel-partikel yang tinggi ke energi yang lebih rendah. Jadi, jika pada suatu benda terdapat gradien suhu atau temperature gradient, maka akan terjadi perpindahan energi dari bagian bersuhu tinggi ke bagian bersuhu rendah sehingga laju perpindahan kalor berbanding dengan gradien suhunya.

Berdasarkan hukum Fourier Perpindahan kalor secara konduksi dapat di rumuskan sebagai berikut :

$$q = k A_c \frac{T_1 - T_2}{l}$$

Dimana :

q	= Laju perpindahan panas	(Watt)
K	= Konduktivitas Termal Bahan	(W/m.°C)
A_c	= Luas Benda	(m ²)
$\frac{T_1-T_2}{l}$	= <i>Gradient</i> suhu ke arah perpindahan kalor	(°C/m)



Gambar 2. 3 Konduksi pada benda

Sumber : <http://www.pakmono.com/2015/08/pengertian-konduksi-konveksi-dan-radiasi.html>

2. Konveksi

Konveksi merupakan perpindahan kalor yang disebabkan adanya pergerakan fluida secara acak atau adanya pergerakan fluida secara makro. Ada 2 macam perpindahan kalor secara konveksi, yaitu :

a. Konveksi Paksa

Konveksi paksa terjadi dimana fluida dialirkan oleh media lain seperti kipas, pompa atau kompresor.

b. Konveksi Alami

Konveksi alami terjadi disebabkan oleh adanya gaya apung (buoyancy force) yang meningkat karena perbedaan densitas.

Perpindahan kalor secara konveksi dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut :

$$q = h A (T_p - T_f)$$

Dengan :

q = Laju perpindahan panas (W)

h = Koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m².°C)

A	= Luas permukaan	(m^2)
T_p	= Suhu permukaan	$(^{\circ}C)$
T_f	= Suhu Fluida	$(^{\circ}C)$



Gambar 2. 4 Perpindahan Kalor secara konveksi

Sumber : <http://www.pakmono.com/2015/08/pengertian-konduksi-konveksi-dan-radiasi.html>

3. Radiasi

Perpindahan kalor secara radiasi terjadi karena radiasi elektro magnetik atau daerah-daerah hampa. Mekanismenya berupa sinaran atau radiasi elektromagnetik. Besar perpindahan kalor melalui radiasi dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$q = \varepsilon \sigma A T^4$$

Dimana :

q	= Laju perpindahan kalor	(Watt)
ε	= Emisivitas	
σ	= Konstanta Stefan-Boltzman	$(5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)$
T	= Suhu	(K)
A	= Luas permukaan	(m^2)

Dari ketiga jenis perpindahan kalor tersebut, perpindahan kalor yang terjadi pada termoelektrik adalah perpindahan panas berjenis konduksi. Energi

panas yang dihasilkan oleh sumber terkonduksi ke sisi panas sehingga dapat menggerakkan elektron dari suhu yang tinggi ke rendah. Pergerakan *electron* pada elemen tersebut menyebabkan terjadinya gaya gerak listrik.

2.5. Hukum Ohm dan Rangkaian Listrik

Hukum Ohm ini pertama kali ditemukan oleh George Simon Ohm pada tahun 1825. Hukum Ohm memiliki lambang " Ω ", ada tiga hal yang berkaitan dengan hukum ohm yaitu hambatan listrik, tegangan listrik dan kuat arus listrik. Hambatan Listrik (R) adalah perbandingan antara tegangan listrik dari suatu komponen elektronik dengan arus listrik yang melewatinya, Tegangan Listrik (V) adalah perbedaan potensi listrik antara dua titik dalam rangkaian listrik dan terakhir Kuat Arus Listrik adalah banyaknya muatan listrik yang mengalir dalam suatu penghantar setiap satu satuan waktu.

Bunyi Hukum Ohm yaitu :

“ Besarnya Arus pada sebuah Penghantar berbanding lurus dengan Tegangan dan berbanding terbalik dengan Hambatannya”

$$V = I \cdot R$$

Dimana :

V = Tegangan listrik (volt)

I = Kuat arus listrik (ampere)

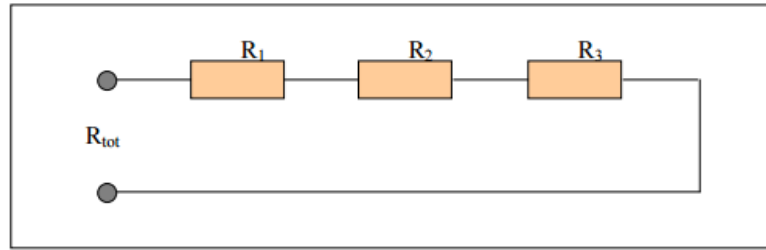
R = Hambatan Listrik (ohm)

Jenis-jenis rangkaian listrik yaitu :

1. Rangkaian Seri

Adalah susunan rangkaian listrik yang menggabungkan dua atau lebih komponen listrik (beban) secara berderet sehingga nilai hambatannya menjadi lebih besar. Besar nilai hambatan yang dihasilkan rangkaian seri ini didapatkan dengan cara menjumlahkan nilai hambatan masing-masing komponen yang dipakai.

$$R_{total} = R_1 + R_2 + \dots + R_N$$



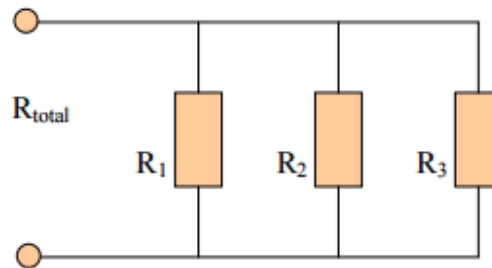
Gambar 2. 5 Skema dari rangkaian seri

Sumber : <http://www.bantubelajar.com/2015/10/pengertian-dan-rumus-hukum-ohm-serta.html>

2. Rangkaian Paralel

Adalah susunan rangkaian listrik yang menggabungkan dua atau lebih komponen listrik (beban) secara berjajar sehingga nilai Hambatan totalnya menjadi lebih kecil dari nilai Resistor terkecil yang membentuknya. Besar nilai hambatan yang dihasilkan dapat dicari dengan umus berikut :

$$\frac{1}{R_{total}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_N}$$

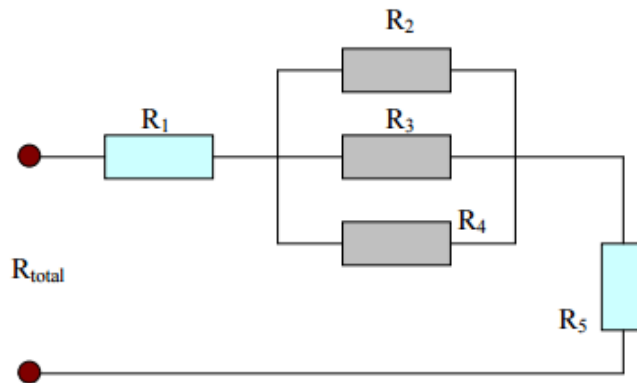


Gambar 2. 6 Skema rangkaian paralel

Sumber : <http://www.bantubelajar.com/2015/10/pengertian-dan-rumus-hukum-ohm-serta.html>

3. Rangkaian Kombinasi

Rangkaian listrik yang menggabungkan kombinasi antara rangkaian seri dengan rangkaian paralel. Cara menghitung rangkaian kombinasi yaitu dengan menjumlahkan nilai hambatan sesuai jenis rangkaian yang dilewati arus terlebih dahulu lalu menambahkan nilai jenis rangkaian yang akan dilewati arus.



Gambar 2. 7 Skema rangkaian kombinasi (seri-paralel-seri)

Sumber : <http://www.bantubelajar.com/2015/10/pengertian-dan-rumus-hukum-ohm-serta.html>

2.6. Termodinamika dalam *Thermoelectric Generator*

Keseimbangan energi pada hukum termodinamika I pada transisi semikonduktor dengan sisi panas dan sisi dingin termoelektrik generator dapat dihitung sebagai berikut :

Pada sisi transisi dengan sisi panas, jumlah energi panas (Q_{Hg}) yang dihasilkan oleh konduksi panas ($Q_{fourier}$), panas peltier ($Q_{peltier}$), dan panas oleh Joule effect (Q_{joule}).

$$Q_{Hg} = Q_{Peltier} + Q_{Fourier} + Q_{Joule}$$

Dimana ,

$$Q_{Peltier} = \alpha_g I T_{hg}$$

$$Q_{Fourier} = K_g(T_{hg} - T_{cg})$$

$$Q_{joule} = \frac{I^2 R_g}{2}$$

- α_g = Koefisien Seebeck
 I = Arus listrik (Ampere)
 T_{hg} = Temperatur sisi transisi dengan sisi panas termoelektrik generator(°C)
 T_{cg} = Temperatur sisi transisi dengan sisi dingin termoelektrik generator(°C)
 R_g = Hambatan listrik termoelektrik generator (Ohm)

Kesetimbangan energi panas pada sisi transisi panas dan dingin dapat di hitung rumus berikut :

$$Q_{Hg} = n_g(\alpha_g I T_{hg} + K_g(T_{hg} - T_{cg}) + \frac{I^2 R_g}{2})$$

$$Q_{Cg} = n_g(\alpha_g I T_{cg} + K_g(T_{hg} - T_{cg}) + \frac{I^2 R_g}{2})$$

Q_{Hg} = Energi pada sisi panas (Joule)

Q_{Cg} = Energi pada sisi dingin (Joule)

n_g = Jumlah modul termoelektrik

Pada kasus exoreversibel termoelektrik generator, temperatur sisi transisi dengan sisi panas dan dingin yaitu $T_{Hg} = T_{hg}$ dan $T_{Cg} = T_{cg}$. Temperatur pada sisi transisi dengan sisi panas disamakan dengan temperatur pada sisi panasnya. Sebaliknya sisi transisi dengan sisi dingin juga disamakan dengan temperatur sisi dinginnya.

Pada kasus irreversible termoelektrik generator, besar temperature sisi transisi dengan sisi panas dan sisi dingin adalah $T_{hg} < T_{Hg}$; $T_{cg} > T_{Cg}$. Dengan besar temperatur tersebut, maka kita dapat menghitung besar Q_{Hg} dan Q_{Cg} .

$$Q_{Hg} = U_{Hg} A_{Hg} (T_{Hg} - T_{hg})$$

$$Q_{Cg} = U_{Cg} A_{Cg} (T_{Cg} - T_{cg})$$

Dimana U_{Hg} dan U_{Cg} adalah koefisien perpindahan panas antara sisi transisi panas dengan sumber panas dan sisi transisi dingin dengan sirip pendingin. A_{Hg} dan A_{Cg} merupakan luas perpindahan panas sisi panad dan sisi dingin. Luasan perpindahan panas total termoelektrik generator dapat dihitung dengan rumus

$$A_{gt} = A_{Hg} + A_{Cg}$$

$$T_{hg} = \frac{[(U_{Hg} A_{Hg} T_{Hg} + 0.5 n_g I^2 R_g)(A_{Cg} U_{Cg} + n_g K_g - n_g \alpha_g I) + (0.5 n_g^2 K_g R_g I^2 + n_g K_g U_{Cg} A_{Cg} T_{Cg})]}{[(n_g \alpha_g I + n_g K_g + A_{Hg} U_{Hg})(A_{Cg} U_{Cg} + n_g K_g - n_g \alpha_g I) - (n_g^2 K_g^2)]}$$

$$T_{cg} = \frac{[(U_{Cg} A_{Cg} T_{Cg} + 0.5 n_g I^2 R_g)(A_{Hg} U_{Hg} + n_g K_g - n_g \alpha_g I) + (0.5 n_g^2 K_g R_g I^2 + n_g K_g U_{Hg} A_{Hg} T_{Hg})]}{[(n_g K_g + A_{Cg} U_{Cg} - n_g \alpha_g I)(A_{Hg} U_{Hg} + n_g K_g + n_g \alpha_g I) - (n_g^2 K_g^2)]}$$

Daya yang dihasilkan oleh termoelektrik dapat dihitung dengan rumus :

$$P_o = (Q_{Hg} - Q_{Cg}) = n_g [\alpha_g I (T_{hg} - T_{cg}) - I^2 R_g] = I^2 R_l$$

R_l merupakan hambatan beban. Pada keadaan exoreversibel, hambatan dalam (R_g) merupakan penjumlahan dari hambatan pada kaki semikonduktor dan hambatan konduksi dari logam juga merupakan faktor penjumlah dari hambatan total dari termoelektrik generator. Untuk menghitung hambatan dalam termoelektrik generator exoreversibel yaitu :

$$R_g = \left[\frac{\rho_n L_n}{A_n} + \frac{\rho_p L_p}{A_p} \right]$$

Untuk ireversibel termoelektrik generator, hambatan dalamnya dapat dihitung :

$$R_g = \left[\frac{\rho_n L_n}{A_n} + \frac{\rho_p L_p}{A_p} \right] + R_{contact} + R_{conducting metal}$$

Konduktansi termal (K_g) pada termoelektrik generator exoreversibel dapat dihitung:

$$K_g = \left[\frac{K_n A_n}{L_n} + \frac{K_p A_p}{L_p} \right]$$

Pada exoreversibel termoelektrik generator, koefisien perpindahan panas antara sumber panas dengan transisi panas dan transisi dingin dengan *heat sink* dari termoelektrik generator adalah tak terhingga (infinity). Hal itu membuat hambatan termal antara sumber panas dengan transisi panas dan transisi dingin dengan *heat sink* adalah nol.

$$U_{Hg} A_{Hg} = U_{Cg} A_{Cg} = \infty$$

Untuk ireversibel thermoelektrik generator, K_g dapat dicari :

$$K_g = \left[\frac{K_n A_n}{L_n} + \frac{K_p A_p}{L_p} \right] + K_{conducting\ metal}$$

Pada ireversibel termoelektrik generator, koefisien perpindahan panas antara sumber panas dengan transisi panas dan transisi dingin dengan *heat sink* dari termoelektrik generator mempunyai nilai. Sehingga konduksi termal dapat dicari :

$$U_{Hg} A_{Hg} = \frac{K_{ceh} A_{Hg}}{L_{ceh}}$$

K_{ceh} dimana konduktansi termal dari keramik. Arus yang dihasilkan dari termoelektrik generator dapat dihitung :

$$I = \frac{\alpha_g (T_{hg} - T_{cg})}{R_g (1 + M_g)}$$

Dimana M_g adalah faktor yang dapat diartikan sebagai maksimum daya *ouput* dan kondisi efisien maksimum. Untuk kondisi maksimum daya keluaran dapat dirumuskan:

$$M_g = \frac{R_l}{R_g} = 1$$

Untuk kondisi efisiensi maksimum,

$$M_g = \sqrt[2]{1 + ZT_m}$$

Efisiensi dari termoelektrik generator adalah rasio daya maksimal *output* terhadap energi panas masukan (Q_{Hg})

$$\eta_{teg} = \left(\frac{P_0}{Q_{Hg}} \right) = \left[\left(\frac{T_{hg} - T_{cg}}{T_{hg}} \right) \left(\frac{M_g - 1}{M_g + \frac{T_{cg}}{T_{hg}}} \right) \right]$$

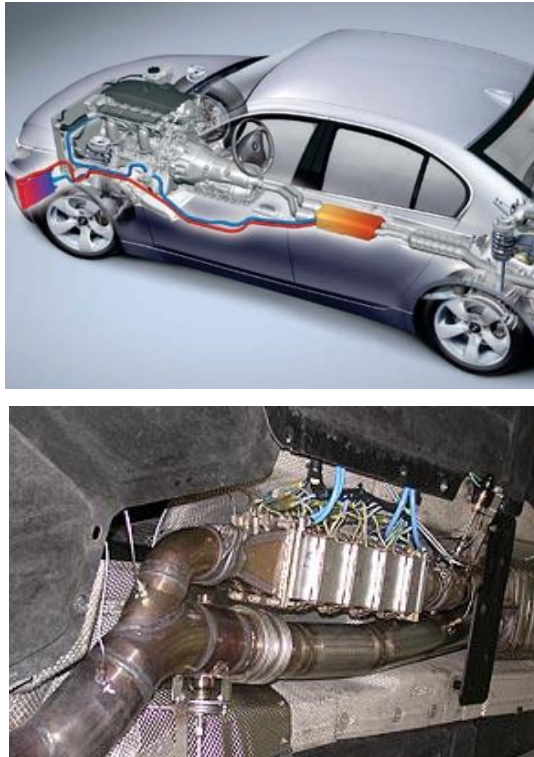
2.7. Penggunaan *Thermoelectric Generator*

Pemanfaatan termoelektrik generator untuk menciptakan energi listrik alternatif sudah banyak dilakukan. Bahkan pemanfaatan termoelektrik generator tersebut menggunakan panas dari kendaraan bermotor. Energi panas dari kendaraan bermotor tersebut terbuang sia-sia ke lingkungan. Alangkah lebih baik kita memanfaatkan energi panas yang terbuang sia-sia tersebut menjadi energi listrik lagi melalui termoelektrik generator.

Contoh penggunaan termoelektrik HZ-20 bermaterial Bi_2Te_3 sejumlah 16 dihubung seri. Pendingin mesin juga digunakan sebagai pendingin dari sisi dingin sedangkan sisi panasnya menggunakan *compact heat exchanger* bermaterial baja karbon AISI 1018. Dimensi total sistem ini 330 x 273 x 216 mm dengan berat 39,1 kg, dipasangkan pada pipa gas buang pick up General Motors 1999 GMC Sierra berbahan bakar bensin. Pengujian jalan dilakukan dengan

kecepatan 48,28 Km/jam, 80,47 Km/jam dan 112, 65 Km/jam diperoleh daya keluaran terbesar pada kecepatan 112, 65 Km/jam yaitu berkisar 255 W (Thacher et. al., 2007).

BMW group di tahun 2009 telah mengimplementasikan TEG bermaterial Bi_2Te_3 pada BMW 535i dengan hasil daya maksimal yang bisa dibangkitkan 300 W. Dalam *roadmap* BMW group sampai tahun 2018, target daya listrik dari aplikasi teknologi ini 500 W dengan material TEG berbasis PbTe. Selanjutnya mulai tahun 2022 material TEG bebas dari *lead* dengan daya listrik yang bisa dibangkitkan 1000 W (Eder et.al, 2011).



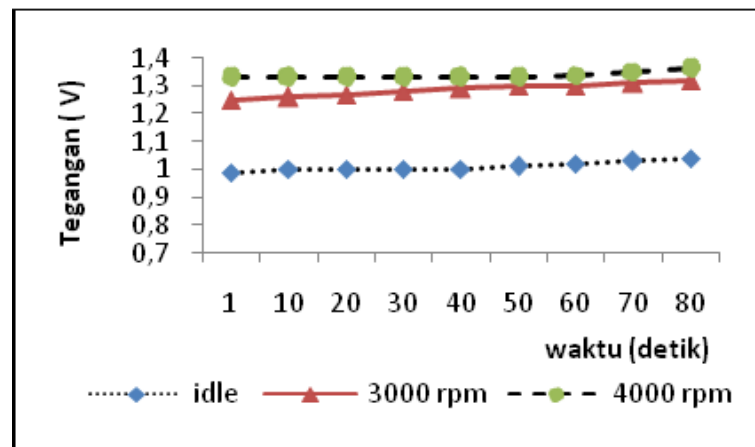
Gambar 2. 8 BMW *Thermoelectric Generator*

Sumber : http://www.heat2power.net/en__benchmark.php

Pengujian yang dilakukan oleh Sugiyanto melalui jurnal yang berjudul “Pemanfaatan Panas Knalpot Sepeda Motor Matic 110 CC Untuk Pembangkitan Listrik Mandiri Dengan Generator Termoelektrik” menuliskan bahwa pada putaran RPM 4000 di ujung *manifold* gas buang, tegangan dibangkitkan dari TEG sebesar 1,33 V – 1,36 V. Sedangkan pada putaran RPM 3000 sebesar 1,25 V –

1,32 V, dan pada kondisi idle sebesar 0,99 V-1,04 V. Semakin besar putaran mesin maka semakin besar tegangan yang dapat dibangkitkan, begitu pula semakin dekat titik uji dengan *exhaust manifold* maka tegangan yang dibangkitkan juga semakin besar. Keluaran tegangan dari TEG merupakan tegangan.[Sugiyanto,2013]

Listrik DC, sehingga optimalisasi tegangan yang dibangkitkan agar dapat diaplikasikan sebagai sumber listrik pengganti alternator merupakan penggabungan secara seri hasil keluaran tegangan tersebut. Melihat hasil pengujian masing-masing titik tersebut, maka saat keluaran dari ketiga modul dihubung seri, didapatkan bahwa pada putaran mesin 4000 RPM menghasilkan tegangan terbesar, yaitu berkisar 3,4 V. Berikutnya pada putaran 3000 RPM tegangan serinya sebesar 3,3 V dan pada putaran idle sebesar 2,4 V. Energi listrik yang dihasilkan dapat menyalakan lampu led dengan beban sebesar 1,4 Ohm.[Sugiyanto,2013]



Gambar 2. 9 Grafik hasil pengujian di titik ujung *manifold* gas buang

Sumber : Sugiyanto. (2013). Pemanfaatan Panas Knalpot Sepeda Motor Matic 110 CC.8.