

11-2-2009

## Potency of Thermoelectric Generator for Hybrid Vehicle

Nandy Putra

*Laboratorium Perpindahan Kalor, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia,*  
nandyputra@eng.ui.ac.id

Raldi Artono Koestoer

*Laboratorium Perpindahan Kalor, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia*

Mohammad Adhitya

*Laboratorium Perpindahan Kalor, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia*

Ardian Roekettino

*Laboratorium Perpindahan Kalor, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia*

Bayu Trianto

*Laboratorium Perpindahan Kalor, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia*

Follow this and additional works at: <https://scholarhub.ui.ac.id/mjt>



Part of the [Chemical Engineering Commons](#), [Civil Engineering Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Electrical and Electronics Commons](#), [Metallurgy Commons](#), [Ocean Engineering Commons](#), and the [Structural Engineering Commons](#)

---

### Recommended Citation

Putra, Nandy; Koestoer, Raldi Artono; Adhitya, Mohammad; Roekettino, Ardian; and Trianto, Bayu (2009) "Potency of Thermoelectric Generator for Hybrid Vehicle," *Makara Journal of Technology*. Vol. 13 : No. 2 , Article 1.

DOI: 10.7454/mst.v13i2.466

Available at: <https://scholarhub.ui.ac.id/mjt/vol13/iss2/1>

This Article is brought to you for free and open access by the Universitas Indonesia at UI Scholars Hub. It has been accepted for inclusion in Makara Journal of Technology by an authorized editor of UI Scholars Hub.

## POTENSI PEMBANGKIT DAYA TERMOELEKTRIK UNTUK KENDARAAN HIBRID

Nandy Putra<sup>\*)</sup>, Raldi Artono Koestoer, M. Adhitya, Ardian Roekettino, dan Bayu Trianto

Laboratorium Perpindahan Kalor, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

<sup>\*)</sup>E-mail: [nandyputra@eng.ui.ac.id](mailto:nandyputra@eng.ui.ac.id)

---

### Abstrak

Pembangkit daya termoelektrik TEG (*Thermoelectric Generator*) telah lama digunakan untuk menghasilkan energi listrik di mana ketika perbedaan temperatur terjadi antara dua material semi konduktor yang berbeda, elemen termoelektrik ini akan mengalirkan arus sehingga menghasilkan perbedaan tegangan. Prinsip ini dikenal dengan nama 'efek Seebeck' yang merupakan fenomena kebalikan dari efek *peltier* TEC (*Thermoelectric Cooling*). Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi energi listrik dari dua belas modul *peltier* yang akan menjadi sumber energi alternatif untuk kendaraan hibrid dengan menggunakan panas buang dari motor bakar. Pengujian dilakukan dengan variasi susunan *peltier* yang berbeda, yaitu seri dan paralel. Sumber panas buang disimulasikan dengan menggunakan pemanas/*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 output maksimum 8,11 Watt dengan perbedaan temperatur rata-rata 42,82°C. Hasil ini menunjukkan bahwa TEG memiliki prospek yang cerah sebagai sumber energi listrik.

### Abstract

**Potency of Thermoelectric Generator for Hybrid Vehicle.** Thermoelectric Generator (TEG) has been known as electricity generation for many years. If the temperature difference occurred between two difference semi conductor materials, the current will flow in the material and produced difference voltage. This principle is known as Seebeck effect that is the opposite of Peltier effect Thermoelectric Cooling (TEC). This research was conducted to test the potential of electric source from twelve peltier modules. Then, these thermoelectric generators were applied in hybrid car by using waste heat from the combustion engine. The experiment has been conducted with variations of peltier module arrangements (series and parallels) and heater as heat source for the thermoelectric generator, with variations of heater voltage input (110V and 220V) applied. The experimental result showed that twelve of peltier modules arranged in series and heater voltage of 220V generated power output of 8.11 Watts with average temperature difference of 42.82°C. This result shows that TEG has a bright prospect as alternative electric source.

*Keywords: peltier element, seebeck effect, thermoelectric generator*

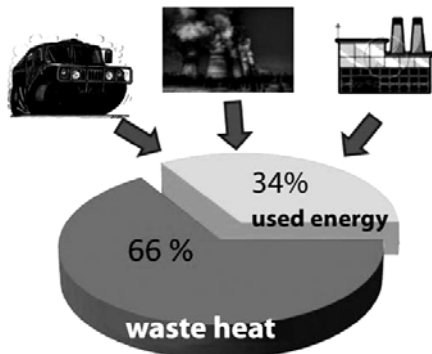
---

### 1. Pendahuluan

Program pengembangan energi alternatif seperti energi angin, sel matahari (*solar cell*), OTEC (*Ocean Thermal Energy Conversion*), panas bumi dan lainnya perlu mendapatkan perhatian yang serius baik dari pemerintah, industri, perguruan tinggi dan masyarakat. Selain pengembangan energi alternatif, perhatian mengenai penghematan energi atau konservasi energi perlu juga mendapat perhatian yang sama karena dengan menghemat energi atau meningkatkan efisiensi termal suatu sistem energi dapat memperpanjang habisnya persediaan bahan bakar yang berasal dari fosil.

Efisiensi pembangkit listrik tenaga gas dan uap atau sistem termal lainnya hanya sekitar 30-40% saja, walaupun sudah ada beberapa teknologi yang digunakan untuk memanfaatkan panas buang tersebut misalnya dengan *system combine cycle*. Namun demikian, panas yang dibuang ke lingkungan masih cukup besar.

Sektor transportasi merupakan sektor penghasil panas buang yang cukup besar dimana efisiensi kendaraan bermotor masih sekitar 35-40% saja, sementara sisanya dibuang ke lingkungan begitu saja. Seperti terlihat pada Gambar 1, rata-rata energi yang dimanfaatkan hanyalah 34%, sementara sisanya dibuang ke lingkungan.

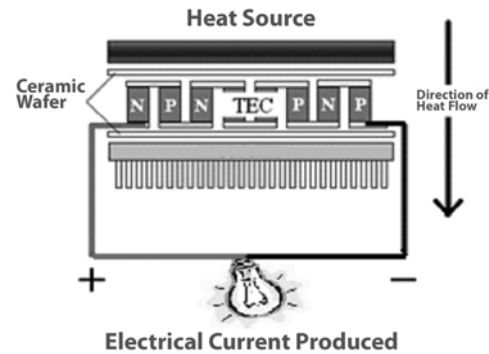


Gambar 1. Persentase Energi yang Termanfaatkan dan yang Terbuang

Terdapat beberapa cara atau teknologi untuk menghemat konsumsi energi pada kendaraan bermotor, antara lain *electronic fuel injection* (EFI), *Intelligent Variable valve Timing and lift Electronic Control* (i-VTEC) dan yang saat ini sedang populer, 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.

Konsep Seebeck menggambarkan bahwa jika dua buah material logam (biasanya semi konduktor) yang tersambung berada di lingkungan dengan dua temperatur berbeda, maka di material tersebut akan mengalir arus listrik atau gaya gerak listrik [1]. Konsep ini apabila diterapkan pada kendaraan bermotor dengan gas buang pada mesin motor bakar berkisar antara 200-300°C dan temperatur lingkungan berkisar antara 30-35°C, akan menghasilkan gaya gerak listrik yang kemudian dapat digunakan untuk menggerakkan motor listrik atau disimpan di dalam baterai. Apabila dapat diterapkan di kendaraan hibrid, konsumsi bahan bakar pada kendaraan bermotor akan semakin irit. Berdasarkan penjelasan ini, tujuan penelitian ini adalah untuk mengembangkan potensi pembangkit daya termoelektrik yang memanfaatkan panas gas buang kendaraan bermotor untuk diterapkan pada kendaraan hibrid.

Pembangkit termoelektrik (TEG) adalah suatu pembangkit listrik yang didasarkan pada efek Seebeck, yang pertama kali ditemukan tahun 1821 oleh Thomas Johann Seebeck [1]. 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. Hal ini terjadi oleh karena aliran listrik yang terjadi pada logam menimbulkan medan magnet. Medan



Gambar 2. Struktur Pembangkit Daya Termoelektrik

magnet inilah yang menggerakkan jarum kompas tersebut. Fenomena tersebut kemudian dikenal dengan efek *Seebeck* [2, 3].

Gambar 2 menunjukkan struktur TEG yang terdiri dari suatu susunan elemen tipe-n (material dengan kelebihan elektron) dan tipe-p (material dengan kekurangan elektron). Panas masuk pada satu sisi dan dibuang dari sisi yang lainnya, menghasilkan suatu tegangan yang melewati sambungan termoelektrik. Besarnya tegangan yang dihasilkan sebanding dengan gradien temperatur [1].

Modul termoelektrik adalah sirkuit terintegrasi dalam bentuk solid yang menggunakan tiga prinsip termodinamika yang dikenal sebagai efek Seebeck, Peltier dan Thompson. Konstruksinya terdiri dari pasangan material semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang membentuk termokopel yang memiliki bentuk seperti *sandwich* antar dua *wafer* keramik tipis. Modul ini dapat digunakan untuk menghasilkan panas dan dingin di masing-masing sisinya jika arus listrik digunakan biasanya diaplikasikan sebagai sistem pendingin [3,4] misalnya kotak pendingin vaksin [5-8] atau untuk menghasilkan listrik ketika panas dan dingin digunakan sebagai perbedaan temperaturnya [3].

*Heat sink* digunakan untuk membantu meningkatkan pelepasan kalor pada sisi dingin sehingga meningkatkan efisiensi dari modul tersebut. Potensi pembangkitan daya dari modul termoelektrik tunggal akan berbeda-beda bergantung pada ukuran, konstruksi 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 listrik. Tiap modul mampu menghasilkan tegangan rata-rata 1-2V DC dan bahkan sampai 5V DC bergantung pada variasi delta temperaturnya, tetapi umumnya satu modul termoelektrik menghasilkan 1,5-2V DC [2].

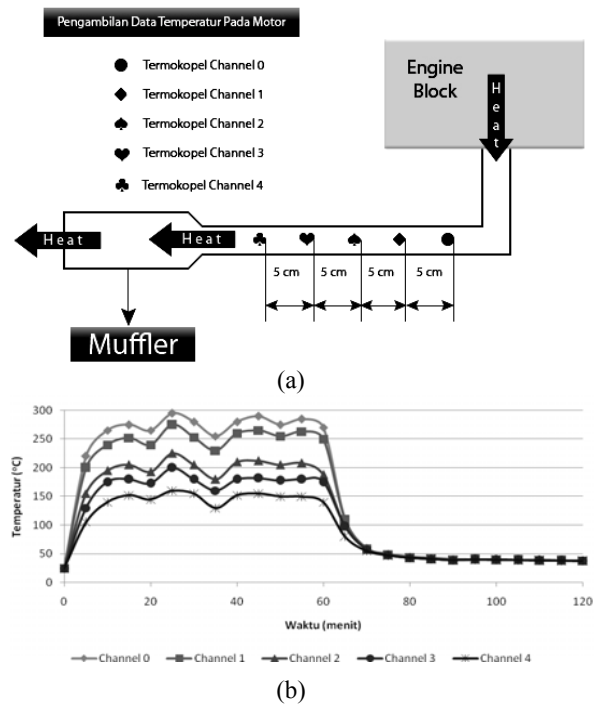
Saat ini, aplikasi TEG telah banyak diterapkan di berbagai bidang, sebuah perusahaan Amerika (Hi-Z Technology, Inc.) telah berhasil mengembangkan delapan modul *peltier* (model HZ-14) yang digunakan pada *glycol generator* dan dapat menghasilkan daya sebesar 60 Watt dengan temperatur ambien 15-30°C dan temperatur operasi berkisar 175-200°C [9]. Besarnya daya yang dihasilkan dikarenakan modul yang digunakan tersebut adalah khusus pada TEG, bukan TEC dan perbedaan temperaturnya mencapai 170°C. Perkembangan teknologi termoelektrik dari Hi-Z mengalami kemajuan yang pesat karena saat ini teknologi Hi-Z mampu mencapai nilai *ZT (figure of merit)* 3,2 walaupun diproduksi masih dalam skala kecil [9].

Eakburanawat *et al.* [10] mengembangkan *battery charger* berbasis termoelektrik. Sistem yang dikembangkan menghasilkan daya maksimum sebesar 7,99 Watt. Penelitian tersebut menggunakan sumber kalor panas buang dari tungku api dan juga dinding tungku. Pembangkit termoelektrik ini juga telah dikembangkan untuk diaplikasikan pada laptop. Pembangkit tersebut menggunakan panas yang dihasilkan dari gas butan [10]. Daya yang dihasilkan adalah sekitar 13,35 Watt. Nuwayhid *et al.* [11] mengembangkan dan menguji pembangkit termoelektrik pada tungku api tradisional di Libanon dengan menggunakan konveksi bebas pada sisi termoelektrik yang menghasilkan daya sebesar 4,2 Watt.

Daya yang dihasilkan oleh TEG sangat bergantung pada perbedaan temperatur yang didapatkan. Karena panas buang kendaraan bersifat fluktuatif, nilai daya yang dihasilkan dapat berubah-ubah. Namun, selama mesin dinyalakan nilai dayanya akan terus ada. Hal penting lainnya adalah bahwa daya keluaran adalah hasil perbedaan temperatur ke dua sisi modul termoelektrik [12]. Artinya bukan berarti bagaimana mendapatkan jumlah kalornya, akan tetapi seberapa besar perbedaan temperatur yang didapatkan. Semua ini berhubungan dengan efisiensi dari termoelektrik itu sendiri. Jika perbedaan temperaturnya semakin besar, maka daya keluarannya 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 memberikan temperatur lingkungan diatas sisi dingin modul untuk menjaga perbedaan temperatur dengan sisi panasnya.

Kendaraan bermotor menghasilkan energi panas yang terbuang dari hasil pembakaran pada motor bakar. Temperatur tertinggi dimulai dari bagian awal *exhaust*



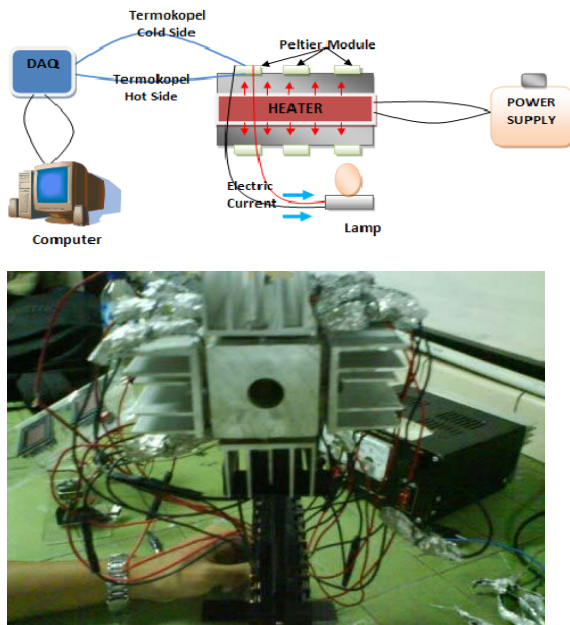
Gambar 3. (a) Skema Temperatur Manifold Sepeda Motor Vega-R 110 cc Tahun 2006, (b) Grafik Temperatur Manifold dari beberapa Titik

*manifold* dan turun hingga pada ujung *muffler*. Posisi termokopel yang dipasang pada *exhaust manifold* dan hasil pengukuran temperaturnya serta hasil pengukuran temperatur pada saluran buang sepeda motor disajikan pada Gambar 3.

Temperatur saluran buang berkisar antara 150–300°C. Apabila mesin dimatikan, temperatur dinding *exhaust manifold* dan *muffler* turun sampai temperatur menjadi sama pada setiap titik pengukuran. Meskipun demikian, temperatur *exhaust manifold* dan *muffler* masih lebih tinggi dari temperatur lingkungan. Hal ini menunjukkan adanya potensi beda temperatur yang cukup besar antara dinding saluran pembuangan panas dengan temperatur lingkungan untuk membangkitkan energi listrik dengan menggunakan termoelektrik.

## 2. Eksperimental

Untuk mengetahui kemampuan termoelektrik sebagai pembangkit daya listrik yang dapat diaplikasikan pada kendaraan bermotor, pada penelitian ini dibangun pengujian pembangkit daya termoelektrik. Gambar 4 menunjukkan skema pengujian yang dibangun. Balok aluminium berukuran 40x40x120 mm yang bagian tengahnya diberi lubang berdiameter 10 mm digunakan sebagai dudukan termoelektrik. Di dalam lubang tersebut diletakan pemanas dengan sumber arus AC, dimana kalor yang dibangkitkan oleh pemanas tersebut disimulasikan sebagai panas dari gas buang kendaraan



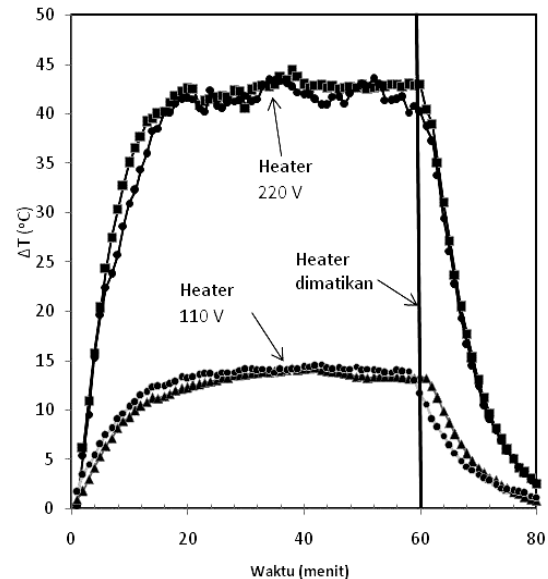
Gambar 4. Skema Uji Pembangkit Daya Termoelektrik

bermotor. Pemanas tersebut dihubungkan dengan pengatur tegangan sebagai *power supply* sehingga energi listrik yang diberikan ke pemanas dapat diatur kalor yang dapat dibangkitkan oleh pemanas tersebut. Pada sisi-sisi balok aluminium dipasang masing-masing tiga buah termoelektrik dan di atas termoelektrik dipasang sirip-sirip yang terbuat dari aluminium sebagai sisi dingin termoelektrik. Pada setiap permukaan termoelektrik dipasang termokopel untuk mengetahui beda temperaturnya. Termokopel-termokopel tersebut dihubungkan ke *data acquisition* (DAQ) yang sudah tersambung dengan komputer. Tegangan dan kuat arus yang dihasilkan oleh termoelektrik diukur dan juga disambungkan dengan lampu pijar untuk membuktikan bahwa energi listrik dapat dihasilkan dari beda temperatur yang terjadi.

Pengujian menggunakan 12 *peltier* yang susunannya memiliki dua variasi, yaitu seri dan paralel. Selama pengujian, kipas angin dinyalakan untuk memberikan hembusan angin dari arah depan *body* aluminium untuk mensimulasikan gerakan maju sepeda motor.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Pengujian ini menghasilkan data berupa arus *output*, tegangan *output*, daya *output*, temperatur sisi panas *peltier*, dan temperatur sisi dingin *peltier* sebagai fungsi waktu. Pengujian dilakukan dengan variasi tegangan *input heater* 110V dan 220V dengan *voltage regulator* AC yang memiliki alat ukur pengatur nilai tegangan sehingga nilai tegangannya dapat diubah sesuai



Gambar 5. Grafik Perbandingan ( $\Delta T$ ) dengan Variasi Tegangan *Input* Pemanas

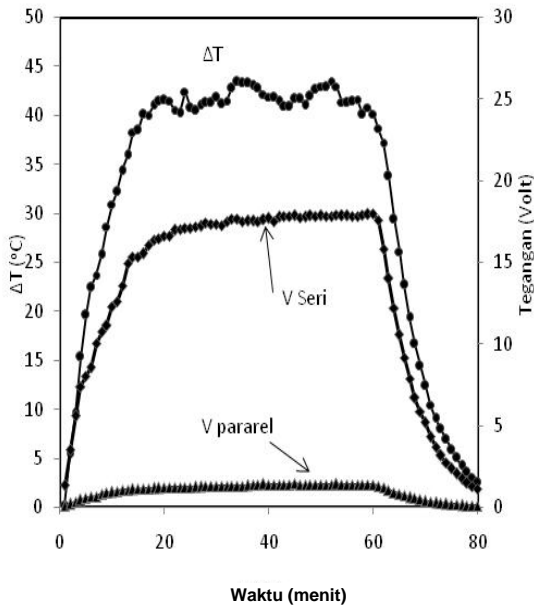
kebutuhan. Sedangkan nilai arusnya mengikuti perubahan nilai tegangan yang diberikan. Waktu pengambilan data selama 60 menit dengan *power supply* pemanas dinyalakan dan 60 menit dimatikan.

Jika tegangan *input* yang diberikan pada pemanas 110V dan kipas angin dinyalakan, maka temperatur pemanas memiliki kisaran antara 30-70°C sedangkan jika tegangan *input* yang diberikan pada pemanas 220V, kisaran temperatur pemanas adalah antara 30-150°C. Nilai temperatur ini juga dipengaruhi oleh temperatur lingkungan. Pada Gambar 5 terlihat beda temperatur yang dihasilkan antara sisi panas dan sisi dingin elemen *peltier*. Beda temperatur dengan *power supply* 110V memiliki kisaran antara 0-15°C, sedangkan dengan *supply* 220V memiliki *range* beda temperatur ( $\Delta T$ ) 0-45°C. Ketika tegangan pada pemanas dimatikan, perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin termoelektrik akan turun secara cepat.

Beda temperatur yang dihasilkan dari eksperimen ini tidak setinggi seperti yang diperkirakan sebelumnya. Hal ini disebabkan karena kipas yang digunakan sebagai simulasi gerakan udara ketika motor berjalan kurang mampu mendinginkan sirip-sirip aluminium yang diletakkan pada permukaan *peltier* sehingga dibutuhkan kipas yang memiliki *pressure and air flow* yang cukup besar agar sesuai dengan gerakan udara pada motor yang sebenarnya.

Gambar 6 memperlihatkan grafik perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin dengan tegangan yang diberikan pada pemanas 220V dari 12 keping termoelektrik yang disusun secara paralel dan seri.

Tegangan yang dihasilkan oleh TEG meningkat seiring dengan meningkatnya beda temperatur antara sisi panas dan sisi dingin TEG (Gambar 6). Perbedaan antara tegangan yang dihasilkan pada TEG yang disusun paralel dan seri terlihat cukup signifikan, di mana TEG yang disusun secara seri memiliki keluaran tegangan yang lebih besar dibanding dengan TEG disusun paralel. Tegangan maksimum yang dihasilkan termoelektrik yang disusun secara paralel dan seri.



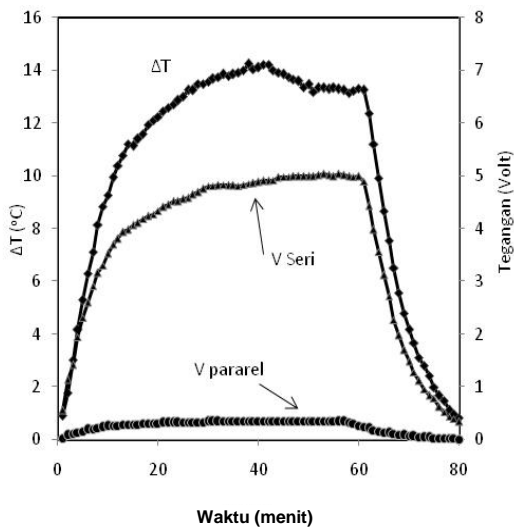
Gambar 6. Grafik Karakter Termoelektrik dengan Tegangan Input Pemanas 220V

Tegangan yang dihasilkan oleh TEG meningkat seiring dengan meningkatnya beda temperatur antara sisi panas dan sisi dingin TEG (Gambar 6). Perbedaan antara tegangan yang dihasilkan pada TEG yang disusun paralel dan seri terlihat cukup signifikan, di mana TEG yang disusun secara seri memiliki keluaran tegangan yang lebih besar dibanding dengan TEG disusun paralel. Tegangan maksimum yang dihasilkan pada susunan TEG seri adalah 17-18V sementara pada susunan paralel hanya 1,4V. Setelah tegangan pada heater dimatikan, tegangan pada TEG baik susunan seri maupun paralel juga menurun seiring dengan menurunnya beda tegangan antara sisi panas dan sisi dingin TEG.

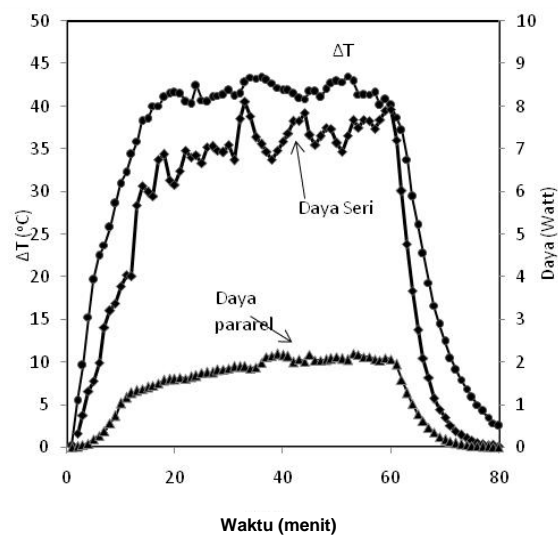
Gambar 7 memperlihatkan grafik perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin dengan tegangan yang diberikan pada pemanas 110V, dan 12 keping termoelektrik yang disusun secara paralel dan seri. Hasil pengujian dengan menggunakan tegangan 220V maupun 110V memberikan hasil yang sama yaitu penyusunan secara seri memberikan hasil keluaran tegangan termoelektrik yang lebih besar dibandingkan dengan penyusunan secara paralel.

Pengujian menunjukkan bahwa, daya keluaran terbesar diperoleh dari kombinasi tegangan pemanas sebesar 220V dan termoelektrik yang disusun seri (Gambar 8 dan 9). Apabila diurutkan masing-masing kombinasi adalah sebagai berikut:

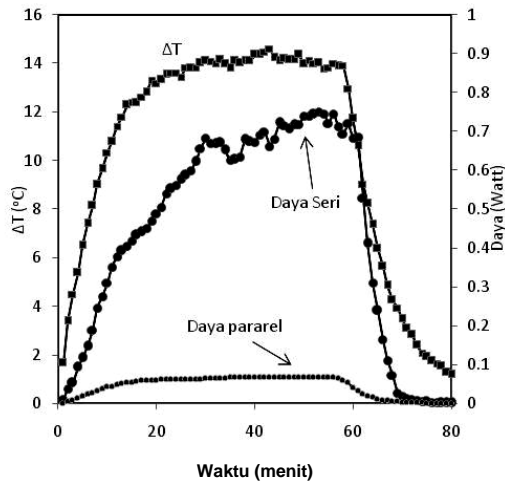
1. Seri 220V: 8,11 Watt (menit 33),  $\Delta T$  42,82°C
2. Paralel 220V: 2,20 Watt (menit 53),  $\Delta T$  42,96°C
3. Seri 110V: 0,74 Watt (menit 53),  $\Delta T$  13,32°C
4. Paralel 110V: 0,06 Watt (menit 45),  $\Delta T$  14,09°C



Gambar 7. Grafik Karakter Termoelektrik dengan Tegangan Input Pemanas 110V



Gambar 8. Perbandingan Daya Output dengan Variasi Susunan Termoelektrik, Input Pemanas pada 220V



**Gambar 9. Perbandingan Daya Output dengan Variasi Susunan Termoelektrik, Input Pemanas 110V**

Hasil tersebut sesuai dengan teori efek *Seebeck*, yaitu ketika terjadi perbedaan temperatur antara material semikonduktor yang berbeda, maka akan terjadi beda potensial listrik. Beda potensial listrik ini meningkat dengan semakin meningkatnya beda temperatur [7].

#### 4. Simpulan

Berdasarkan hasil pengujian karakterisasi termoelektrik yang dilakukan dapat diambil simpulan bahwa hasil penelitian karakterisasi termoelektrik generator dengan dua belas modul termoelektrik yang dipasang di sekitar sisi-sisinya menghasilkan keluaran daya dari pembangkit termoelektrik ini sekitar 8 Watt. Susunan termoelektrik mempunyai peran untuk menghasilkan tegangan atau kuat arus tertentu. Untuk menghasilkan tegangan yang tinggi *peltier* harus disusun secara seri, sedangkan untuk mendapatkan kuat arus yang tinggi, termoelektrik harus disusun secara paralel. Termoelektrik yang disusun seri menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan dengan termoelektrik yang disusun paralel. Secara garis

besar daya yang dihasilkan pembangkit daya termoelektrik masih cukup kecil. Akan tetapi, hal ini telah menunjukkan bahwa pembangkit termoelektrik memiliki prospek yang cerah di masa depan sebagai alternatif energi listrik. Jadi, dimanapun ada panas buang, pembangkit termoelektrik dapat mengubah panas buang tersebut menjadi daya listrik.

#### Ucapan Terima Kasih

Para penulis mengucapkan terima kasih kepada Universitas Indonesia yang telah membiayai penelitian ini melalui skema RUUI 2008.

#### Daftar Acuan

- [1] G. Min, D.M. Roe, Handbook of thermoelectrics, Peltier devices as generator, CRC Press LLC, Florida, 1994, p.479.
- [2] Thermoelectric Generator, thermo1, [www.thermo1.com](http://www.thermo1.com), 2008.
- [3] S.B. Riffat, X. Ma, Appl. Therm. Eng, 23/8 (2003) 913.
- [4] S.B. Riffat, S.A. Omer, X. Ma, Renewable Energy 23/2 (2001) 313.
- [5] S. Chatterjee, K.G. Pandey, Appl. Energy 76/4 (2003) 415.
- [6] N. Putra, J. Med. Eng. Technol. 33/3 (2009) 232.
- [7] N. Putra, H. Hardanu, P.A. Sugiarto, F.N. Iskandar, Proceedings of 10<sup>th</sup> Quality in Research, Depok, Indonesia, 2007, IMM-28.
- [8] N. Putra, A. Oktianto, I. Bariyanto, F. Yusivar, Jurnal Teknologi, 21/1 (2007) 24 – 31.
- [9] HZ-14 Thermoelectric Module, Hi-Z Technology inc, <http://www.hi-z.com/hz14.php>, 2008.
- [10] J. Eakburanawat, I. Boonyaroonate, Appl. Energy. 83/7 (2006) 687.
- [11] R.Y. Nuwayhid, A. Shihadeh, N. Ghaddar, Energy Convers Manage 46/9-10 (2005) 1631.
- [12] J.W. Stevens, Energy Convers. Manage. 42/6 (2001) 709.