

## Pemanfaatan Panas Limbah Gas Buang Ketel Skala Laboratorium Untuk Pencahayaan Dengan Teknologi Termoelektrik dan Dioda Pendar

Pandu Bawono Adi, Sigit Yoewono, Hendi Riyanto

Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara  
Institut Teknologi Bandung  
Jl. Ganesha 10, Bandung 40132

Corresponding author  
email: [pandubawonoadi@gmail.com](mailto:pandubawonoadi@gmail.com)

### Abstrak

Pemanfaatan panas limbah dapat meningkatkan daya guna sumber energi. Panas limbah gas buang ketel uap yang terbuang percuma ke lingkungan dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi termal untuk dikonversikan menjadi energi listrik melalui teknologi termoelektrik (TEG – *thermo electric generator*). Kemudian, listrik yang dihasilkan dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik untuk lampu jenis dioda pendar (LED – *light emitting diode*). Makalah ini memaparkan kegiatan penelitian tentang pemanfaatan panas limbah melalui penerapan teknologi termoelektrik.

Laboratorium Energi Termal Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara Institut Teknologi Bandung memiliki ketel uap skala laboratorium berbahan bakar minyak diesel. Salah satu kegiatan akademik yang memanfaatkan uap dari ketel tersebut adalah eksperimen dan pengukuran entalpi dan kualitas uap. Pembacaan alat ukur temperatur dan tekanan pada kalorimeter untuk menghitung entalpi dan kualitas uap memerlukan pencahayaan memadai yang saat itu tidak tersedia. Permukaan cerobong gas buang pada proses pembakaran ketel uap bertemperatur 170°C. Potensi energi termal yang terbuang ini dimanfaatkan dengan cara membangun perangkat konversi energi termal menjadi energi listrik menggunakan teknologi termoelektrik, yaitu perangkat semikonduktor yang mengkonversikan energi termal menjadi energi listrik melalui efek Seebeck. Pencahayaan dari lampu dioda pendar bersumber listrik dari termoelektrik dimanfaatkan untuk pembacaan alat ukur temperatur dan tekanan.

Perangkat pemanfaat panas limbah gas buang dibangun menggunakan satu pasang modul termoelektrik bismuth-telluride ( $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ), satu set pipa panas (*heat pipe*) sebagai pendingin dan satu lampu dioda pendar. Modul termoelektrik  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$  dipilih karena mudah diperoleh di pasar lokal dan murah. Temperatur sisi panas maksimum modul termoelektrik dibatasi sebesar 150°C sedangkan temperatur permukaan cerobong mencapai 170°C sehingga perlu dibuat komponen yang mampu untuk membatasi temperatur kontak sisi panas termoelektrik seperti dispesifikasikan. Perangkat konversi energi pemanfaat panas dibuat dan dirakit menggunakan perkakas dan ketrampilan lokal serta kemudian dilakukan uji kinerja.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa perangkat pemanfaat panas limbah yang dibangun berhasil membangkitkan tegangan sebesar 3 volt untuk memasok listrik satu lampu dioda pendar. Cahaya iluminasi sebesar 280 lux dihasilkan lampu dioda pendar pada alat ukur temperatur dan tekanan kalorimeter.

**Keywords:** Panas Limbah, Iluminasi, Termoelektrik, LED, TEG

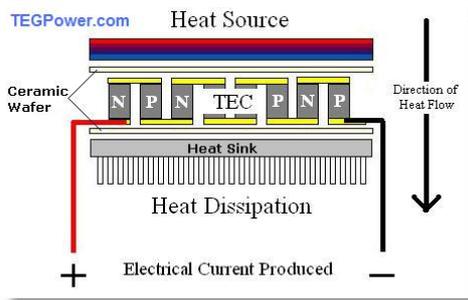
### Pendahuluan

Energi listrik merupakan energi yang sangat dibutuhkan oleh manusia sebagai pendukung keberlangsungan kegiatan. Salah satu sumber energi untuk membangkitkan energi listrik yaitu dengan memanfaatkan panas limbah (*waste heat*). Panas limbah adalah panas yang dihasilkan oleh proses pembakaran bahan bakar atau reaksi kimia, yang dibuang ke lingkungan tanpa digunakan kembali.

Salah satu cara konkret untuk memanfaatkan kalor yang terbuang dari *boiler* yaitu dengan menggunakan modul termoelektrik generator (TEG). TEG bekerja dengan menyerap kalor pada satu sisi dan membuang kalor pada sisi lainnya. Semakin besar perbedaan temperatur antara tiap sisi akan menyebabkan semakin besarnya daya listrik yang dapat dihasilkan. Teknologi TEG merupakan teknologi yang ramah lingkungan karena hanya memanfaatkan panas limbah dan tidak menghasilkan bahan-bahan yang berbahaya bagi lingkungan.

Pada awal tahun 1977 aplikasi termoelektrik sudah diterapkan oleh NASA pada RTG (*Radioisotop Thermoelectric Generator*) satelit Voyager 1. Voyager menggunakan teknologi termoelektrik dengan plutonium-238 sebagai sumber panasnya. Sistem ini mampu membangkitkan listrik sebesar 400 W serta secara kontinu dan tanpa perawatan apa pun Voyager tetap dapat mengirimkan data walau sudah terbang selama 30 tahun.<sup>[1]</sup>

TEG bekerja berdasarkan prinsip *Seebeck*. Prinsip kerja efek *Seebeck* yaitu jika dua buah material logam semi konduktor yang tersambung berada pada lingkungan dengan temperatur yang berbeda maka material tersebut akan mengalirkan gaya gerak listrik.<sup>[2]</sup> Gambar 1 menunjukkan prinsip kerja modul TEG.



Gambar 1. Prinsip kerja modul TEG<sup>[3]</sup>

Teknologi TEG diterapkan pada mesin boiler Laboratorium Energi Termal Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB. Termometer pada boiler tersebut membutuhkan sebuah sistem penerangan agar praktikan dapat membaca termometer dengan cermat. Panas limbah yang dihasilkan oleh boiler dimanfaatkan sebagai sumber panas dari TEG (gambar 2). Kemudian TEG mengkonversikannya menjadi energi listrik yang dipakai sebagai sumber listrik bagi *Light Emitting Diode* (LED). Teknologi LED tidak membutuhkan daya listrik yang besar tetapi menghasilkan cahaya yang cukup terang sehingga cocok dengan teknologi TEG yang hanya menghasilkan daya listrik kecil.



Gambar 2. Termometer pada mesin boiler di Laboratorium Energi Termal FTMD ITB

Tujuan dari penelitian ini adalah merancang, membuat, dan melakukan pengujian perangkat iluminasi berbasis TEG dan LED.

**Perancangan**

Komponen-komponen perangkat iluminasi yang diperlukan adalah dudukan modul TEG sebagai tempat melekatnya modul TEG pada pipa, penjepit dudukan, modul TEG, penukar panas sisi dingin, penyangga LED, dan LED. Perancangan perangkat iluminasi ini hanya dibatasi pada dudukan modul TEG pada pipa *exhaust boiler*, penjepit dudukan, dan banyaknya modul TEG yang diperlukan. Sedangkan untuk penukar panas sisi dingin dan LED menggunakan komponen yang sudah tersedia di pasar. Proses pembuatan hanya dilakukan untuk dudukan modul TEG dan penjepitnya.

Perhitungan perancangan dimulai dari perhitungan daya keluaran modul TEG. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut.<sup>[4]</sup>

$$S_{MTH} \text{ atau } S_{MTC} = s_1 T + \frac{s_2 T^2}{2} + \frac{s_3 T^3}{3} + \frac{s_4 T^4}{4}$$

$$S_{TEG} = \left( \frac{S_{MTH} - S_{MTC}}{T_H - T_C} \right) x \frac{127}{71} \quad (1)$$

Dengan  $s_1 = 1.33450 \times 10^{-2}$   
 $s_2 = -5.37574 \times 10^{-5}$   
 $s_3 = 7.42731 \times 10^{-7}$   
 $s_4 = -1.27141 \times 10^{-9}$

$$R_{MTH} \text{ atau } R_{MTC} = r_1 T + \frac{r_2 T^2}{2} + \frac{r_3 T^3}{3} + \frac{r_4 T^4}{4}$$

$$R_{TEG} = \left( \frac{R_{MTH} - R_{MTC}}{T_H - T_C} \right) x \frac{127}{71} \quad (2)$$

Dengan  $r_1 = 2.08317$   
 $r_2 = -1.98763 \times 10^{-2}$   
 $r_3 = 8.53832 \times 10^{-5}$   
 $r_4 = -9.03143 \times 10^{-8}$

$$K_{MTH} \text{ atau } K_{MTC} = k_1 T + \frac{k_2 T^2}{2} + \frac{k_3 T^3}{3} + \frac{k_4 T^4}{4}$$

$$K_{TEG} = \left( \frac{K_{MTH} - K_{MTC}}{T_H - T_C} \right) x \frac{127}{71} \quad (3)$$

Dengan  $k_1 = 4.76218 \times 10^{-1}$   
 $k_2 = -3.89821 \times 10^{-6}$   
 $k_3 = -8.64864 \times 10^{-6}$   
 $k_4 = 2.20869 \times 10^{-8}$

Persamaan (1) s.d (3) digunakan untuk menghitung sifat-sifat material pada modul TEG yang memiliki 127 pasang semikonduktor tipe P dan N.  $S_{Mref}$  adalah nilai koefisien *Seebeck*,  $R_{Mref}$  adalah hambatan elektrik, dan  $K_{Mref}$  merupakan konduktivitas termal modul TEG.<sup>[4]</sup>

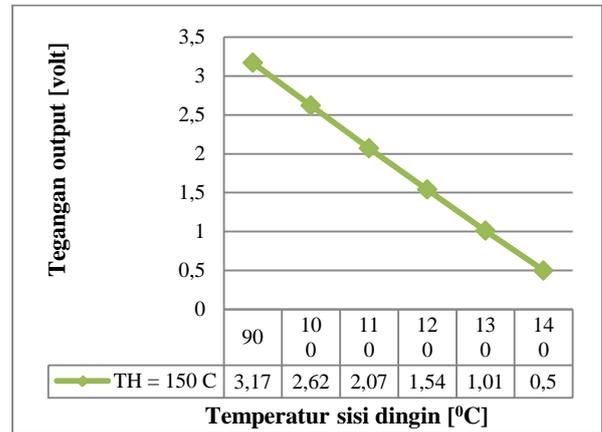
$$Q_H = K_{TEG}(T_H - T_C) + (S_{TEG} T_H I) - \left( \frac{1}{2} I^2 R_{TEG} \right) \quad (4)$$

$$Q_C = K_{TEG}(T_H - T_C) + (S_{TEG}T_C I) + \left(\frac{1}{2}I^2 R_{TEG}\right) \quad (5)$$

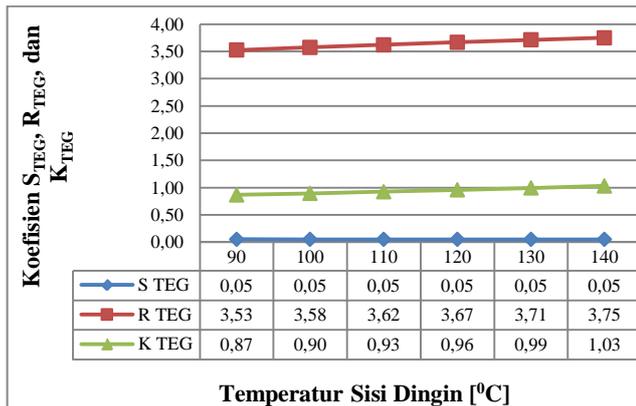
$$P_{TEG} = Q_H - Q_C \quad (6)$$

$$V = (S_B - S_A)(T_2 - T_1) \quad (7)$$

Sedangkan persamaan (4) digunakan untuk menghitung besar tegangan keluaran, persamaan (5) dan (6) secara berturut-turut untuk perhitungan panas yang diserap dan panas yang dibuang, serta persamaan (7) untuk perhitungan daya keluaran modul TEG.



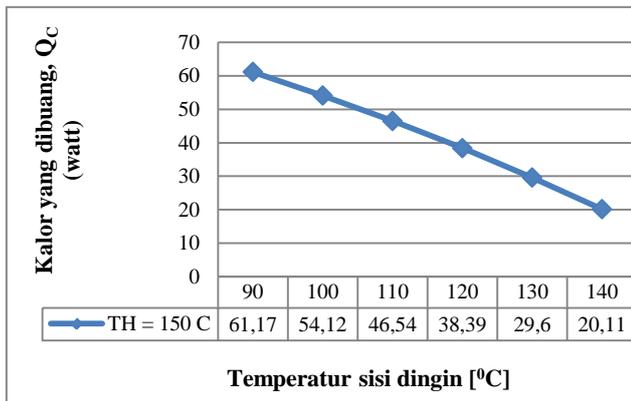
Gambar 6. Nilai tegangan keluaran modul TEG, V



Gambar 3. Nilai kalor yang diserap modul TEG,  $Q_H$

Gambar 3 s.d 6 menunjukkan hasil perhitungan dari koefisien-koefisien modul TEG, kalor yang perlu diserap dan dibuang, daya keluaran, tegangan keluaran dari modul TEG. Persamaan yang digunakan secara berturut-turut adalah persamaan (1) s.d (7).

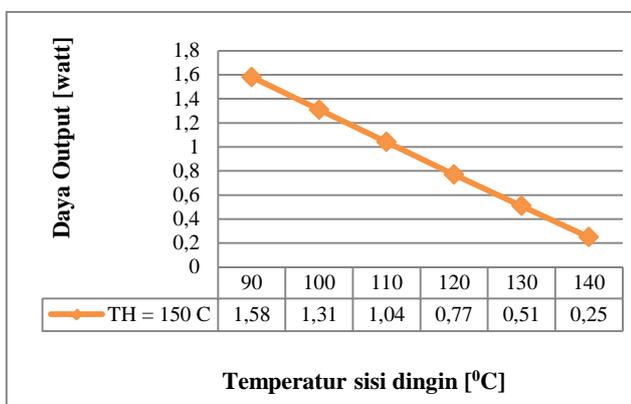
Tahap selanjutnya adalah melakukan *pre-test* terhadap penukar panas sisi dingin. Tidak dilakukan perhitungan perancangan terhadap penukar panas sisi dingin, jadi metode yang digunakan adalah *pre-test* dengan mencari sejumlah penukar panas sisi dingin yang ada di pasar. Gambar 7 menunjukkan saat *pre-test* dilakukan. Sumber panas pada saat melakukan *pre-test* menggunakan elemen panas dari setrika. *Pre-test* dilakukan hanya menggunakan satu buah modul TEG dan satu buah *heatpipe* yang dibeli dari pasar.



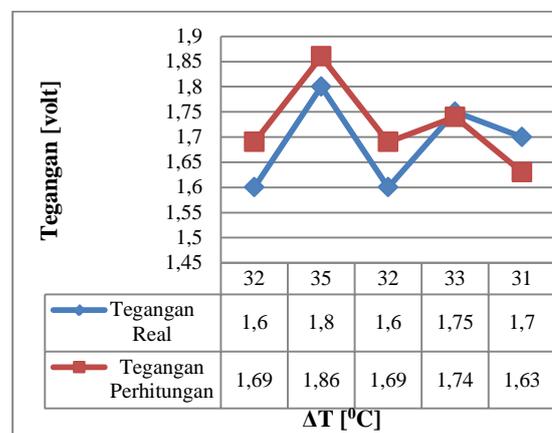
Gambar 4. Nilai kalor yang dibuan gmodul TEG,  $Q_C$



Gambar 7. *Pre-test* penukar panas sisi dingin



Gambar 5. Daya keluaran modul TEG,  $P_{TEG}$



Gambar 8. Hasil *pre-test* pada *heatpipe*

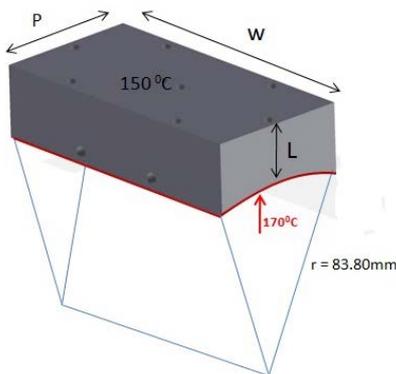
Gambar 8 menunjukkan hasil *pre-test* terhadap *heatpipe*. Dari grafik dapat terlihat bahwa perbedaan temperatur yang dapat dihasilkan oleh *heatpipe* ini hanya dapat mencapai  $\pm 32^{\circ}\text{C}$  dengan tegangan yang dihasilkan sebesar  $\pm 1.7$  volt. Dari hasil tersebut maka diperlukan 2 buah modul termoelektrik tipe TEC- 12706 untuk dapat menyalakan LED yang membutuhkan tegangan masukan sebesar 3 volt. LED ini berjenis super LED dengan daya keluaran sebesar 1 watt. Perlu diketahui bahwa kuat penerangan yang dibutuhkan untuk dapat membaca adalah sebesar 300 lux. Gambar 9 menunjukkan super LED Luxeon.



Gambar 9. Super LED Luxeon

Tahap selanjutnya dalam perhitungan perancangan perangkat iluminasi ini adalah menghitung tebal dudukan modul TEG. Berdasarkan pengujian terhadap modul TEG jenis TEC-12706, modul ini hanya mampu bertahan pada temperatur  $160^{\circ}\text{C}$ , sedangkan temperatur pada pipa *exhaust boiler* dapat mencapai  $170^{\circ}\text{C}$ . Material untuk dudukan modul TEG dipilih *stainless steel* yang memiliki konduktivitas termal rendah sehingga dapat menghambat panas dari pipa *exhaust boiler*. Gambar 10 menunjukkan perancangan perhitungan menggunakan persamaan *steady state conduction*.

$$Q_h = S. K. \Delta T \tag{8}$$



Gambar 10. Rancangan dudukan modul TEG

$$\text{Keliling juring} = \frac{1}{8,5} \times 2\pi \cdot r = 61.94 \text{ mm}$$

$$\text{Luas permukaan bawah dudukan keliling juring} \times w = 7.43 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Dengan dua buah modul termoelektrik  $Q_H = 47.58$  watt dan  $Q_{H\text{total}} = 95.16$  watt akan didapatkan tebal dudukan modul termoelektrik pada bagian tengahnya dengan menggunakan persamaan (8).

$$95.16 = \frac{16 \text{ W/m.K} \cdot 7.43 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2 \cdot 20 \text{ K}}{L}$$

$$L = 25 \text{ mm}$$

Maka didapatkan tebal dudukan modul TEG adalah sebesar 25 mm pada bagian tengahnya.

Tahap selanjutnya adalah perancangan penjepit modul TEG. Gambar 11 memperlihatkan rancangan penjepit dudukan modul TEG.



Gambar 11. Rancangan penjepit dudukan modul TEG

Penjepit dudukan ini berfungsi untuk menjepit dudukan pada pipa *exhaust boiler*.

Komponen terakhir pada perangkat iluminasi ini adalah penyangga LED. Gambar 12 menunjukkan penyangga LED yang diperoleh di pasar.



Gambar 12. Penyangga LED

**Pembuatan**

Komponen perangkat iluminasi yang dibuat hanya dudukan dan penjepit dudukan modul TEG. Sedangkan *heatpipe*, penyangga LED, dan LED dibeli di pasar. Pembuatan penjepit dudukan modul TEG dilakukan dengan cara sederhana yaitu menekan plat *stainless steel* pada pipa yang memiliki diameter sebesar pipa *exhaust boiler*. Gambar 13 memperlihatkan penjepit dudukan modul TEG yang telah dibuat.



Gambar 13. Penjepit dudukan modul TEG



Gambar 15. Perangkat iluminasi LED

Komponen selanjutnya yang dibuat adalah dudukan modul TEG. Dudukan modul TEG dibuat dengan proses freis. Agar permukaan datar yang akan menempel dengan modul TEG memiliki kerataan yang baik maka dilakukan proses *lapping* menggunakan kertas amplas. Sedangkan pembuatan lubang untuk baut *heatpipe* digunakan proses gurdi. Pembuatan ulir menggunakan proses *tapping* dengan ukuran baut M3. Gambar 14 memperlihatkan proses-proses pemesinan yang dilakukan pada dudukan modul TEG.

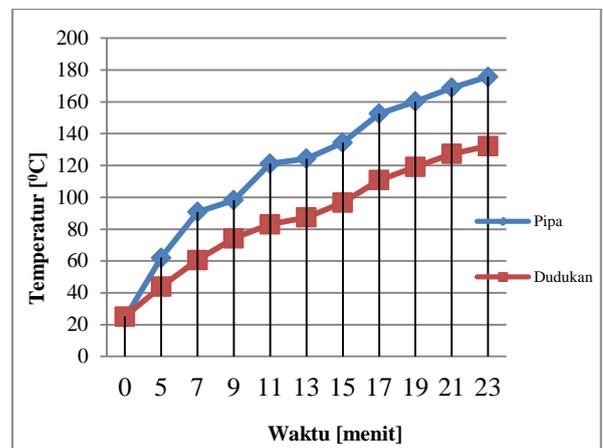


Gambar 14. Proses pemesinan pada pembuatan dudukan modul TEG

**Pengujian**

Gambar 15 merupakan perangkat iluminasi LED yang telah dipasang pada *exhaust boiler* Laboratorium Energi Termal ITB.

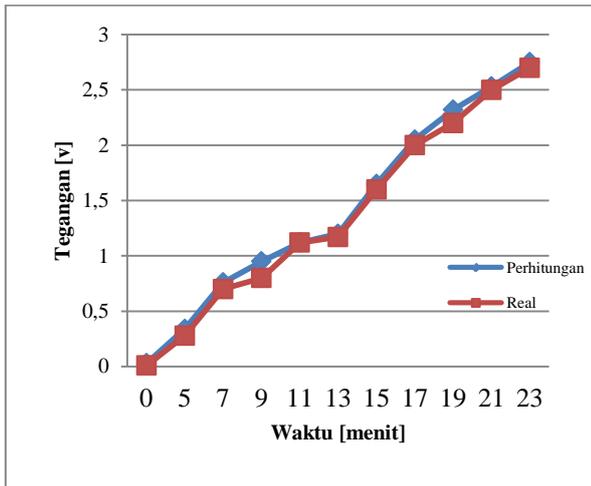
Pengujian yang dilakukan meliputi pengujian terhadap temperatur pada permukaan pipa dan dudukan modul termoelektrik, temperatur pada penukar panas sisi dingin, tegangan keluaran modul termoelektrik, dan kuat penerangan LED. Gambar 16 menunjukkan hasil pengujian terhadap temperatur pipa *exhaust boiler* dan temperatur dudukan modul TEG.



Gambar 16. Temperatur pipa *exhaust boiler* dan temperatur dudukan modul TEG

Perbedaan temperatur antara *exhaust boiler* dengan temperatur dudukan modul TEG adalah sebesar  $\pm 40^{\circ}\text{C}$ . Hal ini melebihi dari batas rancangan yang hanya sebesar  $20^{\circ}\text{C}$ . Penyimpangan ini disebabkan oleh penempelan dudukan dengan pipa *exhaust* yang kurang baik dikarenakan penjepit dudukan yang kurang mampu menekan dudukan modul TEG tersebut.

Gambar 17 menunjukkan hasil pengujian dari tegangan keluaran dua buah modul termoelektrik yang dirangkai seri.



**Gambar 17.** Kurva tegangan keluaran modul TEG vs waktu

Dari gambar 17 dapat dilihat bahwa perbedaan antara hasil perhitungan dengan hasil pengujian tidak terlalu besar. Tegangan tertinggi yang dihasilkan yaitu sebesar 2.7 volt pada menit ke-23. Pada saat mencapai tegangan tersebut LED sudah dapat menyala dengan kuat penerangan sebesar 287 lux. Setelah menit ke-23 boiler mati secara otomatis dikarenakan temperatur dalam boiler tersebut sudah mencapai titik maksimal. Selama boiler mati, LED masih dapat menyala sampai boiler menyala kembali yaitu selama pengujian berlangsung 40 menit. Tegangan keluaran tidak mencapai 3 volt dikarenakan temperatur lingkungan sekitar yang diatas normal, yaitu sekitar 35°C. Hal ini menyebabkan penukar panas sisi dingin tidak dapat berfungsi sempurna sehingga perbedaan panas antara sisi dingin dan sisi panas modul TEG mengecil.

## Kesimpulan

Berdasarkan pengujian terhadap potensi panas limbah dari mesin boiler Laboratorium Energi Termal ITB, temperatur paling panas dapat mencapai 170°C.

- Perancangan sistem sudah dilakukan dengan menggunakan lima jenis perangkat yaitu dua buah modul termoelektrik tipe 12706 yang disusun seri, dudukan modul termoelektrik yang mampu menghambat temperatur dari pipa *exhaust* dengan  $\Delta T \pm 20^\circ\text{C}$ , penukar panas sisi dingin berjenis *heatpipe* dengan tiga buah pipa yang berisi fluida pendingin dan 42 buah sirip, super LED Philips Luxeon dengan input tegangan sebesar 3 volt, serta penyangga LED.
- Perangkat iluminasi telah dibuat dengan tegangan keluaran yang dihasilkan oleh modul termoelektrik sebesar 2.7 volt (lebih rendah 10 persen dari perhitungan perancangan) dengan temperatur pada sisi panas ( $T_H$ ) 132°C dan temperatur pada sisi dingin ( $T_C$ ) 106°C.
- Dudukan modul termoelektrik dapat mengurangi panas dari pipa *exhaust* boiler sebesar 40°C.

- LED menghasilkan cahaya dengan kuat penerangan sebesar 287 lux (lebih rendah satu persen dari perhitungan perancangan) pada tegangan masukan sebesar 2.7 volt dan mampu menyala selama pengujian berlangsung yaitu selama 40 menit.

## Referensi

- [1] NASA Jet Propulsion Laboratory, *Voyager*, [Online], (<http://voyager.jpl.nasa.gov/gallery/assembly.html>, diakses 13 April 2012)
- [2] Kajikawa, Takenobu, *Overview of Thermoelectric Power Generation*, Kanagawa : Shonan Institute of Technology, 2000.
- [3] TEG Power, *TEG*, [Online], <http://TEGPower.com>, diakses 29 Mei 2012.
- [4] Ferrotec, *Thermoelectric Technical Reference*, [Online], <http://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef11>, diakses 4 Februari 2012.