

Fabrikasi Modul Termoelektrik Generator (TEG) menggunakan Semikonduktor Tipe-p: SbTe dan Tipe-n: BiTe

Melania Suweni Muntini*,¹ Meylusari Maghfirotul Afiyanti,¹ Faisal Fikri Oktavianoni,¹ Wanacaporn Namhongsab,² Surasak Ruamruek,² Kunchit Singsoogb,² Nattee Khottumtee,² dan Tosawat Seetawan²

¹Departemen Fisika, Fakultas Sains dan Analitika Data, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

²Thermoelectric Research Laboratory, Center of Excellence on Alternative Energy, Research and Development
Institution, Sakon Nakhon Rajabhat University, 680 Nittayo Rd, Sakon Nakhon 47000, Thailand

Intisari

Telah dilakukan penelitian untuk mendapatkan termoelemen termasuk mengetahui nilai dari parameter tegangan keluaran, daya keluaran dan efisiensi terbaik. Nilai parameter diperoleh dari pengujian dan pemodelan modul termoelektrik generator. Modul termoelektrik generator disusun dari satu pasang semikonduktor tipe-p SbTe dan tipe-n BiTe. Pengujian dilakukan dengan rangkaian terbuka (tanpa beban) dan rangkaian tertutup (dengan beban) sebesar 1Ω . Dari pengujian dihasilkan temperatur pada modul di sisi panas dan dingin, tegangan keluaran, dan daya keluaran modul TEG. Pengujian dilakukan dua kali pengulangan untuk rangkaian terbuka dan tiga kali pengulangan untuk rangkaian tertutup. Selanjutnya, dilakukan pemodelan modul TEG dengan menggunakan software *Ansys 19.2 Academic* dan *Solidworks 2013*. Pemodelan juga dilakukan dengan rangkaian terbuka dan rangkaian tertutup dengan menggunakan nilai parameter seperti pada pengujian. Hasil pengujian dan pemodelan tegangan keluaran pengukuran tertinggi untuk rangkaian terbuka dan tertutup masing-masing diperoleh pada temperatur $100,77^\circ\text{C}$ dan $100,35^\circ\text{C}$. Nilai efisiensi maksimum diperoleh 2,751% dengan tegangan 19,2 mV.

Abstract

This research has been conducted to obtain the value of the best output voltage, output power and efficiency parameters from thermoelectric. Parameter values are obtained from testing and modeling the thermoelectric generator module. The thermoelectric generator module is composed of one pair of p-type SbTe and n-type BiTe p-semiconductors. The tests were done by used an open circuit (no load) and closed circuit (with a load) of 1Ω . The test is done twice for the open circuit and three times for the closed circuit. Furthermore, TEG module was modeled using *Ansys 19.2 Academic* and *Solidworks 2013*. Modeling was conducted too in an open and closed circuit using parameter values as in the test. The results of testing and modeling of the highest measurement output voltage for open and closed circuits were obtained at temperatures of $100,77^\circ\text{C}$ and $100,35^\circ\text{C}$, respectively. The maximum efficiency value is obtained 2.751% with a voltage of 19.2 mV.

Keywords: efficiency; modeling; power; semiconductor; thermoelectric generator; voltage.

*Corresponding author: melania @physics.its.ac.id

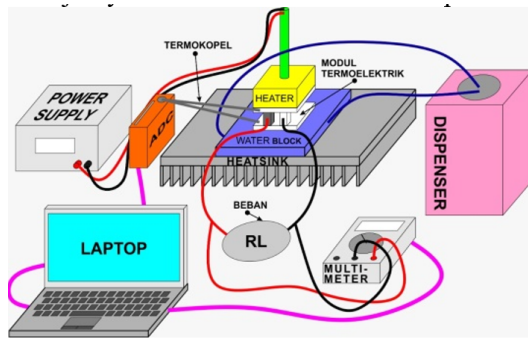
<http://dx.doi.org/10.12962/j24604682.v16i1.6216>
2460-4682 ©Departemen Fisika, FSAD-ITS

I. PENDAHULUAN

Tingkat konsumsi listrik di Indonesia 2017 mencapai 1.012 *Kilowatt per Hour* (KWH)/kapita, naik 5,9 persen dari tahun sebelumnya. Hingga akhir 2018, rasio elektrifikasi ditargetkan sebesar 95,15 persen dan akan mencapai 100 persen pada 2025 [1]. Untuk memenuhi kebutuhan tersebut perlu adanya pengembangan energi alternatif.

Beberapa penelitian sudah dilakukan untuk menciptakan energi alternatif, salah satunya adalah termoelektrik. Termoelektrik memiliki karakteristik relatif lebih ramah

lingkungan, dengan teknologi yang fleksibel, tahan lama, dan juga mampu menghasilkan energi dalam skala besar maupun kecil. Namun, penggunaan termoelektrik sebagai sumber energi masih terkendala oleh efisiensinya yang rendah. Teknologi termoelektrik bekerja dengan mengkonversi energi panas menjadi listrik secara langsung (*thermoelectric generator*), atau sebaliknya, dari listrik menghasilkan dingin (*thermoelectric cooler*) [2,3,4,5]. Termoelektrik yang bagus adalah termoelektrik yang memiliki nilai *figure of merit* (ZT) yang tinggi. Semakin tinggi ZT, maka semakin tinggi efisiensi konversi termal ke listrik. Nilai *figure of merit* yang tinggi didapatkan dari nilai koefisien *Seebeck* yang tinggi, konduk-



Gambar 1: Set up peralatan untuk akuisisi data model TEG.

tivitas listrik yang tinggi, resistivitas listrik yang rendah serta konduktivitas termal yang rendah [2].

Setiap bahan memiliki koefisien *Seebeck* yang berbeda-beda berdasarkan sifat listriknya. Salah satu sifat kelistrikan dari suatu bahan ditunjukkan dengan nilai resistivitas dari bahan tersebut. Resistivitas listrik suatu bahan merupakan besaran yang menyatakan seberapa kuat suatu material menahan laju aliran listrik yang melewati bahan tersebut.

Dalam penelitian sebelumnya telah dilakukan fabrikasi dengan menggunakan semikonduktor tipe-p dan tipe-n serta tembaga yang berfungsi untuk menghubungkan semikonduktor [3,4,5,6,7]. Nilai tegangan keluaran sebuah modul ditentukan oleh sifat fisis bahannya antara lain resistansi listrik, konduktansi termal, dan koefisien *Seebeck* modul. Selain itu, dimensi bahan dan konfigurasi penyusunan modul juga berpengaruh terhadap nilai tegangan modul. Berbagai kombinasi modul termoelektrik dapat dilakukan untuk mendapatkan performansi yang tinggi. Kombinasi untuk fabrikasi termoelektrik untuk tipe semikonduktor menggunakan alo bismuth-telluride menghasilkan efisiensi 2,72%) [4]. Dalam penelitian ini dilakukan penggantian Bi-Te pada tipe-p dengan bahan semikonduktor SbTe, untuk peningkatan efisiensi. Sehingga fabrikasi modul thermo elektrik adalah dengan menggunakan semikonduktor dengan bahan semikonduktor tipe-p SbTe dan tipe-n Bi Te. Pada penelitian ini, sebelum dilakukan fabrikasi telah dilakukan simulasi untuk memperoleh komposisi dan perlakuan dalam pembuatan bahan semikonduktor [4].

II. METODOLOGI

1. Pembuatan bahan SbTe

Langkah pertama untuk membuat bahan SbTe adalah menimbang massa serbuk Sb sebanyak 2,4415 gram dan serbuk Te sebanyak 2,5515 gram. Selanjutnya bahan SbTe dicampur dengan menggunakan *Planetary Ball Mill* berkecepatan putar sebesar 350 rpm selama 10 jam. Selanjutnya bahan SbTe dicetak dengan menggunakan metode *hot press*. *Hot press* dilakukan pada suhu 400°C bertekanan 24,5 MPa selama 3 jam.

2. Pembuatan bahan BiTe

Langkah pertama yang harus dilakukan adalah menim-

bang massa serbuk Bi sebanyak 3,1045 gram dan serbuk Te sebanyak 1,8955 gram. Untuk mencampur bahan BiTe dilakukan dengan menggunakan *Planetary Ball Mill*. Pada *Planetary Ball Mill* digunakan kecepatan putar sebesar 350 rpm selama 10 jam. Metode yang digunakan untuk mencetak bahan adalah *hot press*. *Hot press* dilakukan pada suhu 450°C bertekanan 24,5 MPa selama 1 jam.

3. Pengujian bahan

Setelah bahan SbTe dan bahan BiTe berbentuk *bulk*, kemudian bahan tersebut dilakukan pengujian. Uji pertama yang dilakukan yaitu uji XRD. Uji XRD dilakukan menggunakan penyinaran radiasi Cu. Setelah itu bahan dipotong dengan menggunakan mesin pemotong. Bahan hasil pemotongan selanjutnya digunakan untuk uji ZEM-3. Uji ZEM-3 dilakukan untuk mengetahui nilai koefisien *Seebeck*, resistivitas listrik dan faktor daya dari bahan. Kemudian dilakukan uji konduktivitas termal bahan. Setelah didapatkan nilai konduktivitas termal, maka dapat diketahui nilai *figure of merit* dari bahan.

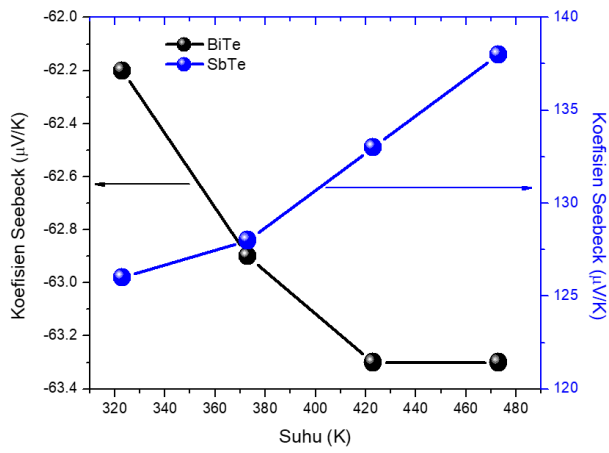
4. Pembuatan modul TEG

Sebelum dilakukan pembuatan modul termoelektrik, maka termoelektrik disketsa menggunakan software *Solidwork 2013*. Bahan yang disiapkan adalah 1 pasang semikonduktor tipe p-n dalam hal ini menggunakan Bi Te dan Sb-Te, dengan ukuran (2 mm × 2 mm × 2 mm). Alumina berdimensi (12 mm × 12 mm × 1,105 mm), tembaga yang digunakan sebagai penghantar setebal 0,3mm, dan silver pasta. Selanjutnya semua bahan disusun yaitu semikonduktor, alumina, tembaga, alumina dan semikonduktor. Khusus pada tembaga, pada bagian bawah atasnya dilapisi dengan pasta silver. Untuk keperluan pengujian modul TEG selanjutnya dipasang kabel positif dan negatif.

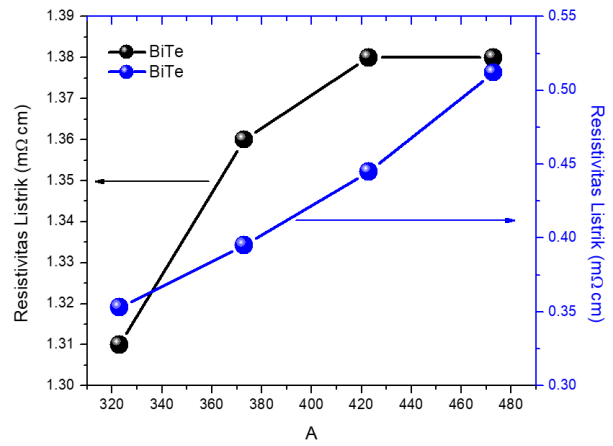
Setelah itu, disiapkan keramik untuk *cover* atas modul termoelektrik dan direkatkan dengan lempengan tembaga menggunakan lem. Kemudian peralatan dirangkai seperti Gambar 1. Modul TEG dihubungkan dengan *power supply*. Pada sisi panas modul ditempel *water block* sebagai *cooler* untuk membuang panas yang dihasilkan modul. Lalu pada kedua sisi modul ditempel termokopel tipe-k untuk merekam temperatur secara simultan. Kemudian ujung termokopel tipe-k yang lain dihubungkan dengan ADC Converter untuk mengubah sinyal analog menuju digital dan selanjutnya dilakukan akuisisi data temperatur.

5. Simulasi modul TEG

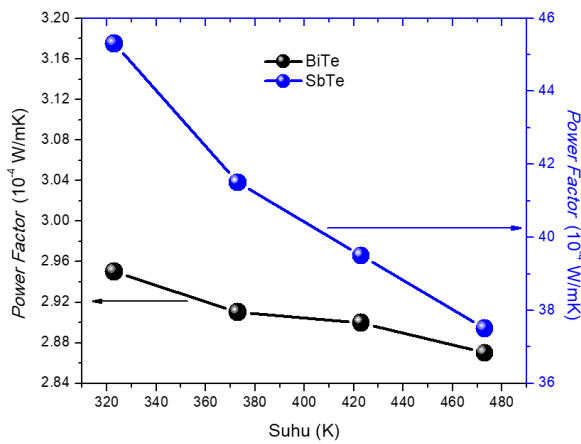
Simulasi dilakukan dengan menggunakan software *Ansys 12*. Simulasi bertujuan untuk mengetahui perbedaan temperatur diantara dua sisi modul dan komposisi bahan terbaik yang dipilih untuk fabrikasi. Dalam simulasi modul TEG, diperlukan datasheet sifat-sifat material yang digunakan yaitu konduktivitas termal, resistivitas listrik, dan koefisien *Seebeck*. *Set point* tegangan 0 V dilakukan pada material tipe-n. Dengan memberikan



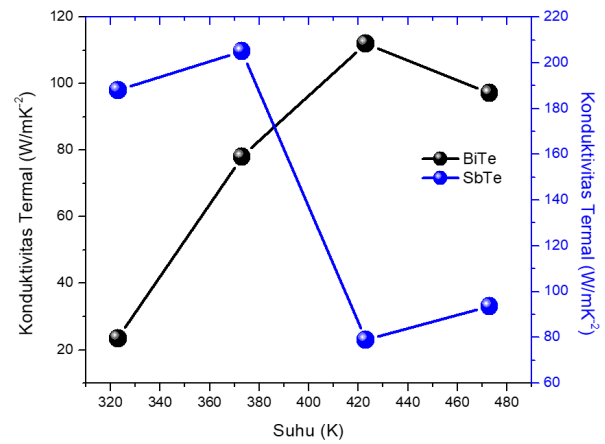
(a) Hasil pengukuran koefisien Seebeck



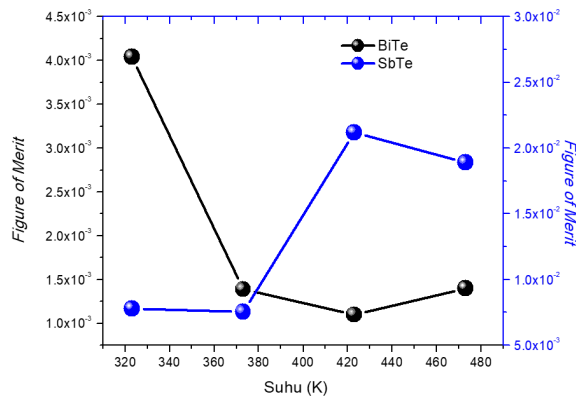
(b) Hasil pengukuran Resistivitas



(c) Grafik faktor daya terhadap temperatur



(d) Grafik konduktivitas panas terhadap temperatur



(e) Grafik figure of merit terhadap temperatur

Gambar 2: Hasil pengukuran sifat material modul termoelektrik.

masukannya yang diinginkan, maka akan diketahui beda temperatur yang diperlukan untuk memenuhi keinginan luaran tersebut. Hasil simulasi dapat digunakan acuan tentang kemampuan modul dalam menerima perubahan temperatur, selanjutnya dapat dilakukan estimasi tegangan yang akan dihasilkan.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil pengujian terhadap modul termoelektrik yang meliputi koefisien Seebeck, konduktivitas panas, resistivitas, faktor daya, dan figure of merit dari bahan Bi Te dan Sb Te diperlihatkan dalam Gambar 2.

Pengukuran pada koefisien *Seebeck*, diperoleh bahwa semakin tinggi suhu maka nilai koefisien *Seebeck* kedua sampel juga semakin besar seperti diperlihatkan pada Gambar 2(a). Tanda negatif pada sampel BiTe menunjukkan bahwa sampel tersebut merupakan material termoelektrik tipe-n. Sedangkan nilai koefisien *Seebeck* pada sampel SbTe memiliki tanda positif, menunjukkan bahwa sampel SbTe merupakan material termoelektrik tipe-P. Nilai koefisien *Seebeck* yang meningkat, dikarenakan meningkatnya konsentrasi muatan serta meningkatnya mobilitas pembawa muatan, atau arus listrik lebih mudah mengalir. Nilai koefisien *Seebeck* terbesar pada sampel BiTe adalah $63,3 \mu\text{V/K}$. Sedangkan, nilai koefisien *Seebeck* terbesar pada sampel SbTe sebesar $138 \mu\text{V/K}$.

Gambar 2(b) menunjukkan nilai resistivitas pada kedua sampel meningkat pada suhu dan resistansi listrik yang tinggi, dan akan mempengaruhi sifat-sifat dari modul termoelektrik termasuk akan mempengaruhi transportasi pembawa muatan. Nilai resistivitas listrik suatu material dipengaruhi oleh konsentrasi pembawa muatan (n), nilai muatan itu sendiri (e) dan, mobilitas pembawa muatan (μ) yang memenuhi persamaan:

$$\frac{1}{\rho} = n e \mu \quad (1)$$

Nilai resistivitas listrik terkecil dari sampel BiTe adalah sebesar $1,31 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$. Sedangkan nilai resistivitas listrik terkecil pada sampel SbTe yaitu sebesar $0,353 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}$.

Hasil pengukuran *power factor* material termoelektrik diperlihatkan pada Gambar 2(c). *Power factor* dipengaruhi oleh kuadrat nilai koefisien *Seebeck* dibagi dengan nilai resistivitas listrik. Nilai *power factor* pada material termoelektrik dapat dirumuskan dengan persamaan:

$$PF = \frac{s^2}{\rho} \quad (2)$$

Nilai *power factor* pada masing-masing sampel menurun karena suhu yang meningkat. Nilai *power factor* terbesar pada sampel BiTe yaitu sebesar $2,95 \text{ W/mK}$. Sedangkan nilai *power factor* terbesar pada sampel SbTe yaitu sebesar $45,3 \text{ W/mK}$.

Nilai konduktivitas panas seperti diperlihatkan dalam Gambar 2(d) dari semua sampel bervariasi dan fluktuatif dikarenakan pengaruh dari batas butir, pori-pori persebaran elektron dan fonon yang berbeda. Nilai konduktivitas pada suatu material dipengaruhi oleh konduktivitas termal kisi dan elektronnya. Material termoelektrik yang baik adalah jika material pembentuknya memiliki konduktivitas termal yang kecil. Sampel BiTe memiliki nilai konduktivitas termal yang rendah pada suhu ruang, sedangkan sampel SbTe memiliki nilai konduktivitas termal terendah pada suhu sekitar 423K .

Figure of merit (ZT) merupakan kemampuan suatu bahan untuk menghantarkan listrik, sehingga nilainya harus diperhatikan. *Figure of merit* dipengaruhi oleh koefisien *Seebeck* (S), resistivitas listrik (ρ) dan konduktivitas termal (κ). Untuk mendapatkan nilai *figure of merit*, maka dilakukan perhitungan menggunakan persamaan

$$ZT = \left| \frac{S^2}{\rho K} \right| \times T \quad (3)$$

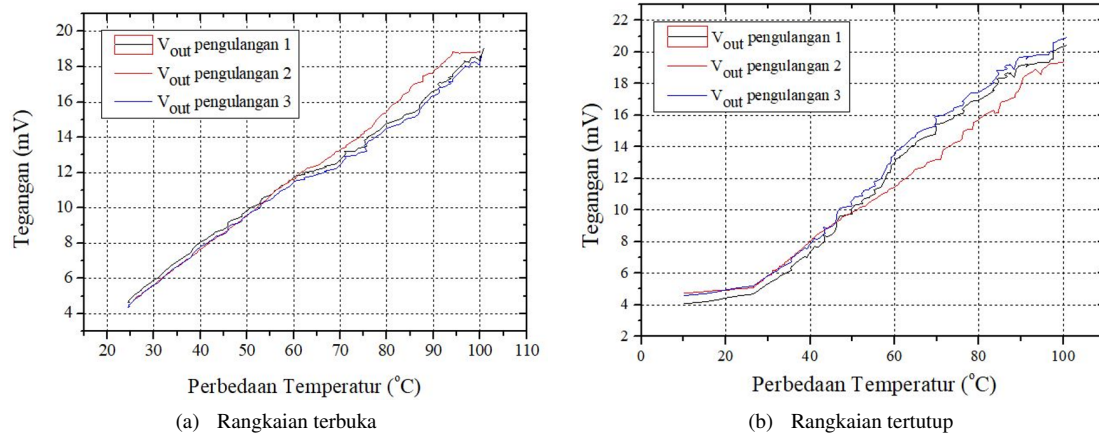
Sampel BiTe memiliki nilai *figure of merit* tertinggi sebesar $0,004$ pada suhu 323K dan sampel SbTe memiliki nilai *figure of merit* tertinggi sebesar $0,02$ pada suhu sekitar 423K .

Selanjutnya, untuk proses pengujian tegangan keluaran dilakukan setelah proses fabrikasi, dengan mengetahui tegangan yang dihasilkan maka daya dan efisiensi dari modul termoelektrik generator juga dapat diketahui. Pengujian dilakukan pada dua jenis modul termoelektrik yaitu rangkaian terbuka dan rangkaian tertutup. Pengujian dengan rangkaian terbuka dilakukan untuk memperoleh tegangan keluaran maksimum tanpa pengaruh hambatan beban dan untuk rangkaian tertutup dilakukan dengan pengaruh hambatan beban. Karena hambatan internal pada modul tipe-p SbTe dan tipe-n BiTe sebesar 1 ohm , maka pada penelitian ini digunakan hambatan satu ohm.

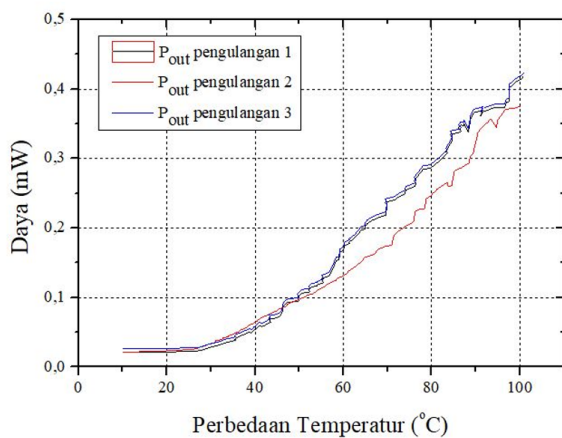
Untuk menghasilkan tegangan, termoelektrik dipanaskan pada salah satu sisi. Hal ini karena ketika panas mengalir menuju ke sisi dingin modul, maka getaran elektron akan meningkat. Elektron yang bergetar memiliki kelebihan energi, sehingga energi tersebut diubah menjadi energi kinetik dan mengakibatkan elektron pada termoelemen memiliki kelebihan energi. Ketika elektron termoelemen memiliki energi yang lebih besar dari energi gapnya, maka elektron berpindah dari pita valensi ke pita konduksi. Perpindahan elektron ke pita konduksi mengakibatkan eksitasi elektron dan menghasilkan tegangan keluaran modul. Semakin besar temperatur sisi panas modul maka energi tambahan yang didapatkan elektron termoelemen semakin besar pula. Oleh karena itu, tegangan keluaran modul terus meningkat seiring dengan perbedaan temperatur yang semakin besar.

Pada penelitian ini, pengujian modul TEG *open circuit* dilakukan hingga perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin modul sebesar $100,77^\circ\text{C}$. Selanjutnya, hasil pengujian tegangan keluaran modul dibandingkan dengan pemodelan modul menggunakan software *Ansys*. Pada Gambar 3(a), grafik menunjukkan kenaikan tegangan secara linear baik dari hasil pengujian maupun pemodelan dengan software *Ansys*. Hasil pengujian dan pemodelan tegangan keluaran pengukuran *open circuit* tertinggi adalah 19 mV dan $19,2 \text{ mV}$ dengan $\Delta T 100,77^\circ\text{C}$. Pada modul TEG *close circuit* pengujian dilakukan dengan penambahan hambatan beban sebesar 1 ohm , dan perbedaan temperatur hingga $100,35^\circ\text{C}$. Pada Gambar 3(b) didapatkan nilai tegangan yang meningkat seiring dengan peningkatan beda temperatur. Hasil yang diperoleh, tegangan keluaran pengujian $18,7 \text{ mV}$ pada $\Delta T = 100,35^\circ\text{C}$, sedangkan dalam pemodelan, tegangannya $19,1 \text{ mV}$ pada $\Delta T = 100,35^\circ\text{C}$. Pada penelitian ini, hasil tersebut merupakan pengukuran lebih besar dari hasil pemodelan.

Pada Gambar 4 ditampilkan grafik daya keluaran hasil pengujian dan pemodelan modul TEG. Pada pengukuran modul *close circuit*, yang memiliki hubungan linier antara daya dan beban yang diberikan serta kenaikan tegangan terhadap beda temperatur. Selanjutnya diperoleh dari hubungan antara $V \sim \Delta T$, dan $P \sim V^2$, bahwa daya sebanding dengan kuadrat beda temperatur ($P \sim \Delta T^2$). Karena daya sebanding dengan kuadrat beda temperatur maka didapatkan grafik eksponensial seperti pada Gambar 4. Hasil pengukuran daya tertinggi yaitu $0,35 \text{ mW}$ pada beda temperatur $100,35^\circ\text{C}$.



Gambar 3: Tegangan keluaran pada pengukuran dan pemodelan terhadap perbedaan temperatur untuk (a). rangkaian terbuka, dan (b). rangkaian tertutup.



Gambar 4: Daya keluaran modul TEG pada pengukuran dan pemodelan terhadap perbedaan temperatur .

Dengan demikian, efisiensi modul termoelektrik generator merupakan perbandingan antara daya keluaran modul dengan kapasitas temperatur panas modul dapat dihitung. Hasil

efisiensi akan meningkat jika kapasitas sisi panas modul termoelektrik (Q_h) meningkat. Pada penelitian ini didapatkan nilai efisiensi maksimum modul termoelektrik generator pengukuran pertama sebesar 2,750% , pengukuran kedua sebesar 2,751%, dan pengukuran ketiga sebesar 2,752%. Modul tersebut memiliki nilai efisiensi tinggi karena parameter daya keluaran dan koefisien Seebeck yang tinggi.

IV. SIMPULAN

Berdasarkan analisis data dan pembahasan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa Termoelemen tipe-p $\text{Ca}_3\text{Co}_3\text{MnO}_9$ dan tipe-n $\text{Zn}_{0.96}\text{Al}_{0.04}\text{O}$, dalam uji koefisien Seebeck diperoleh hasil yang semakin besar jika temperatur semakin tinggi, namun resistivitas listrik semakin turun. Modul TEG didapatkan dengan susunan dua pasang tipe-p dan tipe-n secara seri. Tegangan keluaran yang dihasilkan modul adalah linear terhadap perbedaan temperatur. Nilai efisiensi maksimum modul termoelektrik generator untuk pengukuran pertama, kedua, dan ketiga berkisar $(2,751 \pm 0,001)\%$.

[1] Kementerian ESDM, "Inilah Konsumsi Listrik Nasional", 2017, Diakses dari <https://databoks.katadata.co.id/datapublish/2018/01/11/inilah-konsumsi-listrik-nasional-pada-7-Februari-2019-pukul-11.17>

[2] S. Chanprateep, and C. Ruttanapun, "Synthesis of $\text{Zn}_{0.96}\text{Al}_{0.04}\text{O}$ Thermoelectric Material for Fabrication of Thermoelectric Module and Thermoelectric Generator", *Materials Today: Proceedings* 5, pp. 1397113978, 2018.

[3] D.M. Rowe, "Handbook of Thermoelectrics", CRC Press LLC, United States of America, 1995.

[4] K.K. Jung, "Thermoelectric generator based on a bismuth-telluride alloy fabricated by addition of ethylene glycol", *Busan*

vol. 1-2, pp. 609-735, 2014.

[5] Muntini, Fauzia, *et al.*, "The Thermoelectric Cooler Performance Coefficient Based on Configuration of p-type and n-type Semiconductors of Bi_2Te_3 Materials", *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series* 1120 (2018), IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/1120/1/012101

[6] H. Lee, "Thermal Design: Heat Sinks, Thermoelectrics, Heat Pipes, Compact Heat Exchangers, and Solar Cells", John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2010.

[7] A.R.K. Montecucco, "Accurate simulation of thermoelectric power generating systems", *Appl Energy*, pp. 166-172, 2014.