

Pemodelan Dan Fabrikasi Modul *Thermoelectric Generator* (TEG) Berbasis Semikonduktor Bi_2Te_3 dengan Metode Penyusunan *Thermoelement* untuk Menghasilkan Daya Listrik

Nanda Rico Famas Putra, Melania Suweni Muntini, Diky Anggoro
Departemen Fisika, Fakultas Ilmu Alam, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: nanda14@mhs.physics.its.ac.id

Abstrak—Penelitian yang berjudul “pemodelan dan fabrikasi modul termoelektrik generator (TEG) berbasis semikonduktor Bi_2Te_3 dengan metode penyusunan thermoelement untuk menghasilkan daya listrik” bertujuan untuk mengetahui nilai tegangan, daya dan efisiensi terbaik dari simulasi dan pengujian modul termoelektrik generator. Variasi penyusunan thermoelement yang digunakan yaitu modul TEG dengan desain modul kesatu P-N, modul kedua P-P N-N, dan modul ketiga P-P-P N-N-N. Proses simulasi digunakan software Ansys 12.0 dan Solid Work 2013. Dilakukan simulasi dengan Open Circuit tanpa beban dan Close Circuit dengan beban satu Ohm. Dari simulasi dihasilkan nilai tegangan output, arus, dan daya. Pada proses pengujian dilakukan variasi yang sama dengan simulasi yaitu dengan Open Circuit dan Close Circuit. Dilakukan tiga kali pengulangan untuk setiap modul. Telah didapatkan besar tegangan keluaran maksimum pada perbedaan temperatur 100° Kelvin yaitu pada modul kesatu sebesar $0,511 \pm 0,005$ mVolt dalam kondisi sirkuit terbuka dengan keakuratan 93,7%. Hasil tegangan output tertinggi dari pemodelan sirkuit tertutup yaitu pada modul kesatu menghasilkan $0,452 \pm 0,001$ mVolt. Didapatkan nilai daya keluaran tertinggi sebesar $0,204 \pm 0,005$ mWatt pada modul kesatu dengan efisiensi 2,06%.

Kata Kunci—Daya, Efisiensi, Tegangan, Termoelektrik.

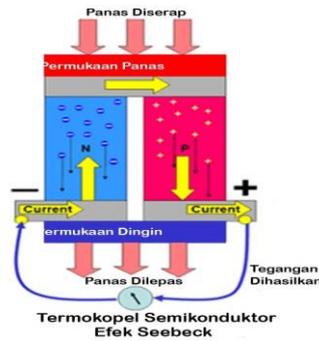
I. PENDAHULUAN

ENERGI listrik adalah sumber utama kebutuhan manusia dalam memenuhi kebutuhan hidup sehari-hari. Kebutuhan energi listrik bukan hanya dibutuhkan di daerah perkotaan, namun daerah pedesaan juga memerlukannya, oleh sebab itu berbagai cara dilakukan untuk mendapatkan energi listrik dengan membangun pembangkit pembangkit energi listrik baik menggunakan energi air (hydro), energi fosil, maupun energi angin. Sumber energi dalam skala mikro yang menghasilkan daya orde milliwatts berasal dari solar, vibrasi, thermal dan sumber biologis. Namun saat ini teknologi berdaya rendah telah menyediakan pembangkit daya tenaga mikro dan menjadi bagian dari perancangan elektronik [1]. Beberapa penelitian yang sudah pernah dilakukan untuk menciptakan energi alternatif. Zuhail (1989), melakukan penelitian karakteristik alat pendingin sistem termoelektrik dengan satu daya sel surya. Bahan modul yang digunakan adalah *Bismuth-Tellurium* (Bi_2Te_3) dengan jumlah 4 buah untuk satu kotak pendingin dengan ukuran 20 cm x 15 cm x 15 cm, dengan ketebalan aluminium 0.8 mm. Dari jenis bahan modul, dapat diketahui nilai koefisien *Seebeck Bismuth-Tellurium* sebesar 0.410×10^{-3} V/K. Hasil

yang didapatkan adalah suhu modul terminal dingin (T_d) sebesar 17.0°C , suhu modul terminal panas (T_p) sebesar 27.6°C , arus yang mengalir (I) sebesar 0.84 A, dan suhu lingkungan (T_i) sebesar 25.5°C , sehingga diperoleh nilai *figure of merit* (Z) sebesar 0.0028. Kemudian Al Hababeh (2016) melakukan penelitian pendesaianan optimasi dari termoelektrik generator dengan ukuran yang berbeda. Dari penelitian itu menghasilkan daya keluaran sebesar 0,2 Watt dan efisiensi 5% pada perbedaan temperatur sebesar 100°C . [2] meneliti modul termoelektrik generator oksida berdasarkan simulasi dan fabrikasi pada satu desain. Prinsip yang digunakan yaitu *Efek Seebeck*, dengan memberi beda temperatur maksimum 200°C dan menghasilkan 56,2 mW dengan hasil yang linier antara simulasi dan pengukuran. Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan dengan hasil yang sudah disebutkan diatas, maka dilakukan penelitian termoelektrik generator (TEG) dengan membanding hasil simulasi dengan pengukuran. Digunakan tiga jenis struktur modul yang berbeda kemudian di uji kemudian dibandingkan untuk mengetahui stuktur modul termoelektrik terbaik [3].

Pada tahun 1821, Thomas Johann *Seebeck* menemukan bahwa perbedaan atau gradient termal yang terbentuk diantara dua konduktor berbeda menghasilkan tegangan. Perbedaan temperatur pada sebuah material konduktor dapat menyebabkan terjadinya aliran panas. Hal ini menyebabkan terjadinya perpindahan elektron juga. Jika suatu metal dalam sebuah rangkaian dipanaskan pada salah satu sisinya, maka sisi tersebut menjadi aktif dan memiliki kecepatan transfer elektron yang lebih tinggi dibandingkan dengan sisi yang satunya. Hal ini menyebabkan timbulnya perbedaan potensial yang kemudian dapat menghasilkan arus listrik. Fenomena inilah yang kemudian dikenal dengan efek *Seebeck* atau dikenal juga dengan efek termoelektrik [4].

Efek *Seebeck* termoelektrik adalah peristiwa pengkonversian secara langsung dari energi panas menjadi energi listrik atau sebaliknya karena perbedaan temperatur suatu material. Material generator termoelektrik terbuat dari bahan semikonduktor yang terdiri dari tipe-p yang kekurangan elektron (*hole*) dan tipe-n kelebihan elektron. Apabila suatu material diberikan beda suhu, maka elektron bergerak dari sisi bersuhu panas ke sisi yang bersuhu lebih dingin [5].



Gambar 1. Prinsip kerja termoelektrik.

Efek *Seebeck* menjelaskan bahwa GGL akan timbul dalam rangkaian dari dua buah material yang berbeda (A dan B) dirangkai dan pada masing-masing ujung diletakkan dengan suhu yang berbeda, maka dapat terjadi arus listrik pada rangkaian tersebut. Arus listrik tersebut tetap mengalir selama dua ujung tersebut berada pada suhu yang berbeda. Jika logam A bersifat lebih positif (+) terhadap logam B, maka arus akan mengalir dari A ke B melalui T_1 . Fenomena ini banyak diterapkan pada mekanisme pengukuran suhu dengan termokopel. Gaya Gerak Listrik (GGL) yang menghasilkan arus tersebut dikenal dengan “GGL termal *Seebeck*”. Hubungan antara besar suhu dengan GGL tersebut adalah [2]:

$$E = \alpha (T_p - T_d) \tag{1}$$

dengan:

- E = tegangan termoelektrik terinduksi (Volt)
- α = koefisien *Seebeck* atau daya termoelektrik (V/K)
- T_p = suhu terminal panas (K)
- T_d = suhu terminal dingin (K)

Modul termoelektrik merupakan suatu alat yang mengaplikasikan fenomena termoelektrik. Gambar 1 menunjukkan aliran elektron dari semikonduktor tipe-p menuju semikonduktor tipe-n. Agar elektron pada tipe-n dapat mengalir, maka elektron menyerap kalor yang mengakibatkan sisi tersebut menjadi dingin, sedangkan pelepasan kalor ke lingkungan terjadi pada sisi panas sehingga elektron pada tipe-n dapat mengalir menuju semikonduktor tipe-p. Pada kondisi ideal, jumlah kalor yang diserap pada sisi dingin dan dilepas pada sisi panas bergantung pada koefisien *Peltier* dan arus listrik yang digunakan. Modul termoelektrik adalah sebuah alat yang mengaplikasikan fenomena termoelektrik sebagai dasar kerjanya yang berfungsi sebagai alat pengkonversi energi panas menjadi energi listrik, demikian juga sebaliknya mengkonversi energi listrik menjadi energi panas. Modul termoelektrik tersusun dari sekumpulan matrik yang tersusun atas beberapa sambungan konduktor, yang mana konduktor-konduktor tersebut tersusun secara seri dan paralel. Setiap susunan dari pada konduktor tersebut memiliki fungsinya masing-masing, susunan seri untuk meningkatkan tegangan keluaran yang dihasilkan oleh modul dan susunan paralel untuk meningkatkan arus keluaran dari modul termoelektrik. Dalam pembuatan sebuah modul termoelektrik yang harus diperhatikan adalah *Figure of merit* dari bahan pembentuk [6].



Gambar 2. Modul Termoelektrik.

Figure of merit merupakan faktor utama yang harus diperhatikan dari suatu bahan konduktor dalam pembuatan sebuah modul termoelektrik. Kesanggupan bahan untuk menghantarkan listrik dengan baik, dapat terjadinya perpindahan elektron pada bahan dengan beda suhu yang relatif rendah, dan kesanggupan bahan untuk menerima panas yang tinggi secara terus menerus dalam waktu yang lama, itu semua diperlukan untuk membentuk modul yang baik. Termoelektrik merupakan perangkat solid-state yang sangat andal, tidak memiliki bagian yang bergerak, tidak memerlukan perawatan khusus, dan memiliki rentang umur yang panjang. *Figure of Merit* dilambangkan dengan, zT

$$zT = \left[\frac{S^2}{\rho\kappa} \right] T \tag{2}$$

Di mana T adalah suhu absolut, S adalah koefisien *Seebeck*, ρ adalah tahanan listrik, dan κ adalah konduktivitas termal. Semakin tinggi zT material, semakin tinggi efisiensi konversi termal ke listrik dari sistem termoelektrik. Dari persamaan 2.2 tersebut maka dapat diketahui karakteristik termoelektrik yang baik yaitu :

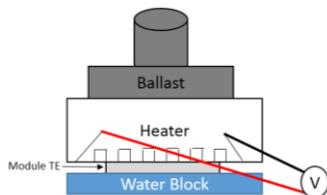
1. Konduktivitas listrik yang tinggi untuk meminimalkan *Joule heating* (kenaikan temperatur dari hambatan ke arus listrik yang mengalir melaluinya).
2. Koefisien *Seebeck* yang besar untuk perubahan maksimal dari panas ke daya listrik atau daya listrik ke kinerja pendinginan.
3. Konduktivitas panas yang rendah untuk mencegah konduksi panas melalui bahan [7].

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Desain Modul TEG dengan SOLIDWORKS 2013

Proses desain pada penelitian ini digunakan untuk membuat desain modul termoelektrik generator. Kemudian dari hasil desain ini digunakan pada proses selanjutnya yaitu pemodelan atau simulasi. Program yang digunakan untuk pendesaian adalah *Solidworks 2013*. Dalam proses pendesaian modul termoelektrik generator terdapat tiga desain dengan struktur termoelemen yang berbeda satu sama lain. Penyusunan termoelemen disusun secara seri, paralel, dan seri paralel. Adapun rincian masing-masing penyusunan pada Tabel 1 yaitu variasi penyusunan termoelement, Tabel 2 merupakan dimensi dari setiap bahan. Spesifikasi dari material Bi_2Te_3 tembaga dan alumina yang digunakan dalam penelitian ditunjukkan oleh Tabel 3 dan Tabel 4.

Kemudian modul TEG yang telah terfabrikasi pada sisi dingin diletakkan diatas *Water Block*. Sebelumnya *Water Block* telah terpasang dengan dispenser dan *Heatsink* ditaruh bawah *Water Block* agar pendinginan semakin bagus. Pada sisi atas modul TEG diletakkan *Heater* yang telah terpasang dengan *Power Supply*. Kemudian diletakkan ujung termokopel tipe-K pada bagian sisi panas TEG dan pada sisi dingin TEG. Sedangkan ujung termokopel dihubungkan dengan ADC agar hasil konversi temperatur berupa data analog ke digital yang dapat terbaca komputer. Proses pengujian dilakukan dua hal, yaitu *Open Circuit* dan *Close Circuit*. Pada pengujian *Open Circuit* kabel positif negatif TEG dihubungkan paralel secara langsung dengan Multimeter. Multimeter yang digunakan bertipe Picotest M3500A 6 3/2 digit Multimeter. Selanjutnya multimeter terhubung dengan komputer. Pada pengujian *Close Circuit* kabel negatif TEG dihubungkan seri dengan beban satu ohm dan kabel positif dihubungkan paralel dengan multimeter. Selanjutnya multimeter terhubung dengan komputer. Software yang digunakan pada komputer yaitu TRC-PEM 3 Multi Device Link yang dapat menyajikan hasil temperatur sisi panas dan dingin, perbedaan temperatur dan tegangan output dari modul TEG secara *realtime* dan dapat tersimpan otomatis. Terakhir, dinyalakan power supply dengan 1A, 1.5A, 2A, dan 2.5A secara berurutan sampai perbedaan temperature maksimum 100°K dengan pengulangan sebesar tiga kali. Rangkaian uji modul TEG seperti pada Gambar 4 berikut :



Gambar 4. Skema uji modul TEG

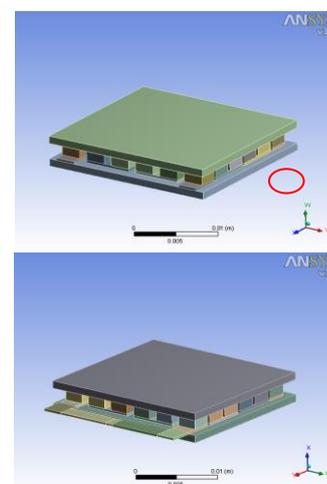
III. HASIL DAN DISKUSI

A. Analisis Pemodelan Bentuk Geometri

Modul termoelektrik memiliki komponen dasar yaitu alumina sisi bawah, *thermoelement* dan konektor sisi tengah, dan alumina sisi atas. Pada penelitian ini *thermoelement* yang digunakan yaitu material semikonduktor *bismuth tellurid* (Bi_2Te_3). Sedangkan konektor yang digunakan yaitu tembaga yang berfungsi sebagai penghubung antar *thermoelement* dengan penyusunan P-N, P-P N-N dan P-P-P N-N-N. Pemodelan ini dimulai dengan membuat alumina sisi bawah, yang berfungsi sebagai pondasi awal dalam penataan struktur semikonduktor. Alumina dimodelkan berbentuk persegi dengan ukuran panjang 22 mm, lebar 20 mm, dan tebal 1 mm. Pada pemodelan *open circuit*, alumina bagian bawah dibuat sketsa struktur untuk proses peletakan tembaga sebagai penghubung. Tembaga yang digunakan dengan ketebalan 0,3 mm. Kemudian, setelah tembaga tersusun pada alumina bawah diletakkan material Bi_2Te_3 diatas tembaga tersebut. Material Bi_2Te_3 memiliki dimensi 2,5mm x 2,5mm x 1,5mm. Banyaknya material semikonduktor yang digunakan untuk setiap modul sebanyak 36 buah, dengan 18 buah tipe-n dan 18 buah

tipe-p. Setelah itu dilakukan pemasangan tembaga pada sisi atas untuk menghubungkan antar material semikonduktor. Terakhir, yaitu pemasangan alumina sisi atas dengan dimensi yang sama dengan alumina sisi bawah.

Pada pemodelan *close circuit* dilakukan melalui penambahan beban sebesar satu ohm yang terhubung dengan kutub positif dan negatif modul. Dimensi dari beban tersebut berbentuk balok dengan panjang 1 mm, lebar 2 mm, dan tebal 0,3 mm. Dari dimensi tersebut dan dengan menggunakan rumus pada (1), yaitu: $\rho = \frac{RA}{L}$ diperoleh nilai resistivitas beban sebesar 0,0006 ohm meter. Nilai dari resistivitas beban yang diperoleh digunakan untuk proses selanjutnya yaitu simulasi. Bentuk dari pemodelan dari kondisi *open circuit* dan *close circuit* dapat diperlihatkan seperti Gambar 5.

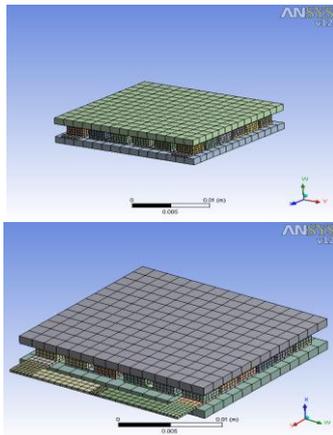


Gambar 5. Hasil pemodelan modul termoelektrik generator berstruktur P-N tanpa beban(a) dan menggunakan beban(b).

B. Analisis Proses Diskritisasi (Meshing) dan Solution

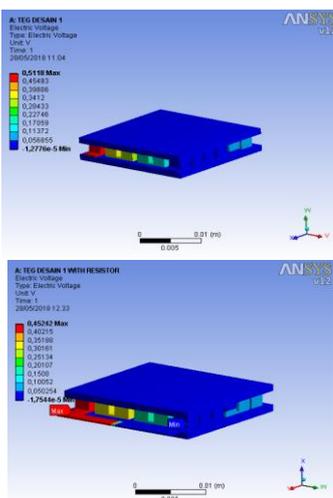
Pada proses simulasi *open circuit* dilakukan pemberian *material properties*. *Material properties* adalah proses untuk memberikan spesifikasi material yang dianalisis pada penyusunan modul termoelektrik generator. Adapun spesifikasi material yang digunakan sesuai dengan daftar lampiran yang ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4. Sedangkan untuk kondisi *close circuit* ditambahkan spesifikasi material beban sesuai perhitungan sebesar 0,0006 ohm meter. Setelah pemberian spesifikasi material dilakukan proses *meshing*. Tujuan dilakukan *meshing* yaitu untuk mendiskritisasi setiap bagian menjadi luasan luasan atau area kecil agar modul TEG dapat dilakukan *solving* pada tahap berikutnya. Pertimbangan penting selama membuat model adalah untuk memastikan bahwa seluruh bagian model dapat di *meshing*. Analisis yang dilakukan pada model *mesh* adalah analisis tegangan keluaran dari modul termoelektrik.

Setelah proses *meshing* dilakukan selanjutnya yaitu proses *Steady State Thermal Electric Condition*. Pada proses ini dilakukan untuk diberikan parameter temperatur panas, temperatur dingin, dan tegangan keluaran untuk modul termoelektrik. Temperatur panas diberikan pada alumina bagian atas dengan *set* nilai 40° Celcius sampai 130° Celcius dengan kenaikan sepuluh derajat setiap simulasi.

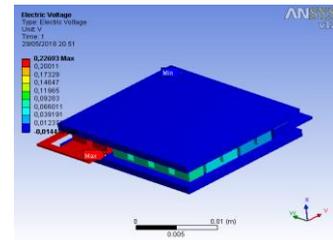
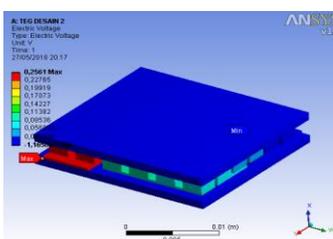


Gambar 6. Hasil pemodelan modul termoelektrik generator berstruktur P-N tanpa beban(a) dan menggunakan beban(b).

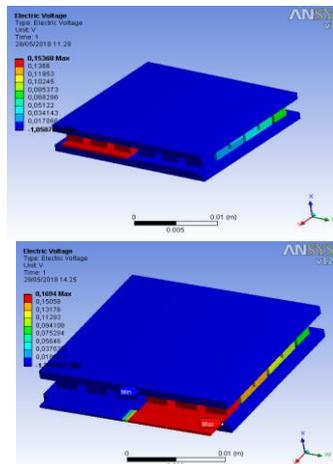
Temperatur dingin diberikan pada alumina sisi dingin modul TEG dengan *set* nilai sebesar 30° Celcius secara konstan. Dari pemberian nilai temperatur sisi panas dan sisi dingin tersebut diperoleh perbedaan temperatur 10° sampai 100° C. Hasil dari proses *Steady State Thermal Electric Condition* kemudian dilakukan *Solving*. Pada tahapan *solving* merupakan tahap simulasi yang mendekati proses akhir, yaitu proses analisis dan perhitungan tegangan keluar modul TEG. Setelah proses desain dan analisis selesai, langkah berikutnya adalah proses *General Postprocessing*. Proses ini digunakan untuk melihat hasil analisis, animasi gerakan benda yang dianalisis dan melihat hasil perhitungan serta grafik tegangan keluaran yang dihasilkan. Tegangan keluaran yang digunakan adalah tegangan tertinggi atau tegangan maksimum yang dihasilkan pada simulasi. Hasil tegangan keluaran maksimum adalah nilai tegangan terbaik pada setiap modul. Pada Gambar 7 diperlihatkan hasil tegangan keluaran dari simulasi.



Gambar 7. Hasil *solution* tegangan keluaran modul termoelektrik generator modul kesatu tanpa beban(a) dan menggunakan beban(b).



Gambar 8. Hasil *solution* tegangan keluaran modul termoelektrik generator modul kedua tanpa beban(a) dan menggunakan beban(b).



Gambar 9. Hasil *solution* tegangan keluaran modul termoelektrik generator modul ketiga tanpa beban(a) dan menggunakan beban(b).

C. Hasil Fabrikasi Modul TEG

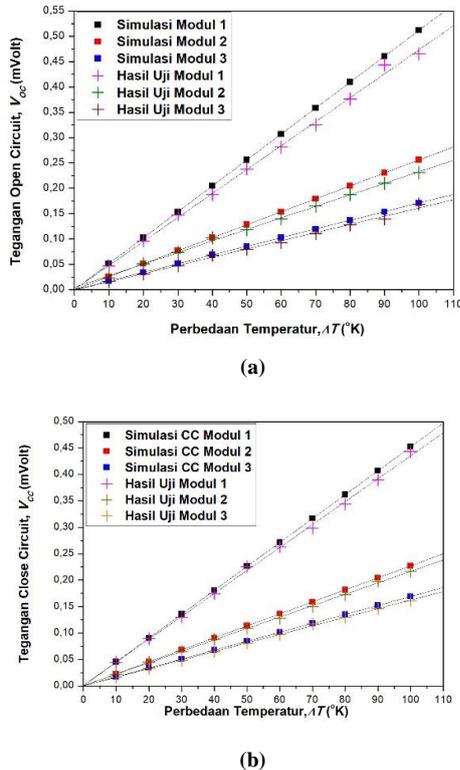
Tujuan dilakukan fabrikasi adalah untuk menghasilkan *thermoelectric module* (TEM) sesuai dengan variasi struktur material yang digunakan pada penelitian ini. Terdapat bagian bagian penting yang harus ada dalam penyusunan TEM. Adapun bagian tersebut adalah alumina, bismuth tellurid (Bi_2Te_3), tembaga dan timah. Alumina memiliki sifat sebagai insulator digunakan untuk mempertahankan temperatur panas maupun dingin pada sisinya dan supaya aliran listrik bisa terfokus melewati diantara alumina sisi atas dan sisi bawah. Tembaga yang bersifat konduktor dibutuhkan untuk menghubungkan material tipe-p dan tipe-n. Konduktor memiliki awan elektron yang banyak pada permukaannya sehingga dapat menghantarkan arus listrik. Kemudian material *bismuth telluride* yang bersifat semikonduktor. Bahan semikonduktor pada saat temperatur 0 K bersifat insulator dan ketika temperatur dinaikan menjadi konduktor yang kemudian dapat menghasilkan arus listrik. Timah memiliki sifat konduktor dimanfaatkan dalam pembuatan TEM sebagai perekat antara material dan tembaga agar dapat terhubung satu sama lain.

Termoelektrik disusun oleh dua buah semikonduktor yang berbeda, satu tipe-n dan tipe-p. Dari kedua tipe ini memiliki kerapatan elektron berbeda yang dibutuhkan untuk menghasilkan arus atau tegangan listrik. Tipe-p memiliki kelebihan pembawa muatan positif dan tipe-n memiliki kelebihan pembawa muatan negatif. Kedua semikonduktor diletakkan paralel secara termal dan bagian ujung digabungkan dengan lempeng tembaga sebagai kutub positif dan negatif. *Bismuth Telluride* adalah bahan terbaik dalam pembuatan TEM. *Bismuth Telluride* memiliki dua karakteristik yaitu pertama memiliki struktur kristal, *Bismuth Telluride* sangat *anisotropic*. Sebuah medium dikatakan

anisotropic jika dari makroskopik optiknya tergantung pada arah. Perilaku *anisotropic* perlawanan lebih besar daripada konduktivitas termalnya. Sehingga *anisotropic* ini dimanfaatkan untuk pendinginan yang optimal. Kedua yaitu kristal *Bismuth Telluride* (Bi_2Te_3) terdiri dari lapisan heksagonal atom yang sama.

D. Analisis Hasil Tegangan

Dilakukan analisis hasil tegangan keluar dari pemodelan dan proses uji seperti pada Gambar 10 berikut.



Gambar 10. Grafik hasil tegangan dari uji dan simulasi terhadap perbedaan temperatur pada modul 1,2,3 dengan kondisi *Open Circuit*(a) dan *Close Circuit*(b).

Setelah dilakukan pembuatan termoelektrik modul yaitu proses pengujian. Hasil dari pengujian modul yang telah dibuat adalah nilai tegangan dan arus keluaran yang dihasilkan. Dari parameter ini kemudian dapat diketahui juga nilai daya dan efisiensi dari masing-masing modul. Pada proses uji modul dilakukan dua jenis pengujian yaitu *open circuit* dan *close circuit*. *Open circuit* dilakukan untuk mengetahui nilai tegangan maksimum yang dihasilkan modul tanpa pengaruh beban. Sedangkan uji *close circuit* bertujuan untuk mendapatkan daya keluaran yang dihasilkan dengan pemberian hambatan luaran satu ohm untuk semua variasi modul. Pada penelitian ini digunakan beban satu ohm karena disesuaikan dengan hasil hambatan internal yang terukur pada tahap fabrikasi. Hambatan internal pada modul dengan struktur P-N sebesar satu ohm, struktur P-P N-N sebesar 0,7 ohm dan struktur P-P-P N-N-N sebesar 0,4 ohm. Dari masing-masing pengujian dilakukan pengulangan sebanyak tiga kali.

Konsep dari termoelektrik menyatakan apabila dua logam yang berbeda pembawa muatannya diberi beda temperatur pada kedua sisinya menghasilkan tegangan dan arus listrik. Pada penelitian ini sisi panas dihasilkan dari pemanas atau

heater. *Heater* dibangkitkan dengan pemberian arus dari DC power supply sebesar satu ampere sampai temperatur naik perlahan-lahan. Apabila temperatur tidak menunjukkan kenaikan lagi maka nilai arus dari DC power supply dinaikkan lagi menjadi 1,5 A, 2 A dan 2,5 A sampai menghasilkan perbedaan temperatur antara panas dan dingin sebesar 100°K. Hasil nilai tegangan terhadap temperatur dari pemodelan *Ansys* dan pengujian kemudian dibandingkan. Dari Gambar 4.7 dapat diketahui bahwa hasil tegangan dari pemodelan maupun pengujian memiliki garis yang linier sebanding dengan meningkatnya perbedaan temperatur. Adapun hasil tegangan dari pemodelan *Open Circuit* didapatkan nilai tegangan maksimum pada modul kesatu sebesar $0,511 \pm 0,005$ mVolt, modul kedua sebesar $0,256 \pm 0,005$ mVolt dan modul ketiga sebesar $0,170 \pm 0,005$ mVolt pada delta temperatur 100 °K. Sedangkan untuk hasil pengujian juga didapatkan modul kesatu dengan tegangan keluaran tertinggi. Adapun hasil pengujian tegangan keluaran pada modul kesatu, kedua dan ketiga pada perbedaan temperatur 100°K adalah $0,465 \pm 0,001$ mVolt, $0,231 \pm 0,011$ mVolt dan $0,150 \pm 0,002$ mVolt dalam kondisi *Open Circuit*.

Hasil dari pemodelan *Close Circuit* yaitu pada modul kesatu menghasilkan $0,452 \pm 0,005$ mVolt, modul kedua sebesar $0,226 \pm 0,005$ mVolt dan modul ketiga sebesar $0,169 \pm 0,005$ mVolt pada beda temperatur 100°K. Sedangkan pengujian tegangan keluaran maksimum dari *Close Circuit* menghasilkan $0,443 \pm 0,003$ mVolt untuk modul kesatu, $0,216 \pm 0,003$ mVolt untuk modul kedua dan 0,161 Volt pada modul ketiga dengan beda temperatur 100°K. Ketika dua material pembawa muatan yang berbeda diberikan beda temperatur panas dan dingin, menyebabkan elektron mengalir dari satu konduktor yang mempunyai elektron kurang terikat ke konduktor yang mempunyai elektron yang lebih terikat. Hal ini terjadi akibat tingkat perbedaan Fermi antara dua konduktor. Perbedaan Fermi adalah istilah yang digunakan untuk menggambarkan bagian atas kumpulan tingkat energi elektron pada suhu nol absolut. Konsep ini berasal dari statistik Fermi-Dirac. Konsep energi Fermi adalah konsep yang sangat penting untuk memahami sifat listrik dan termal pada benda padat. Kedua proses listrik dan termal biasanya melibatkan energi elektron. Ketika dua konduktor dengan tingkat Fermi yang berbeda digabungkan, elektron akan mengalir dari konduktor dengan tingkat yang lebih tinggi ke tingkat yang lebih rendah, hingga perubahan potensial elektrostatik membawa dua tingkat Fermi menjadi nilai yang sama. Akibat temperatur dinaikkan menyebabkan elektron yang berada pada pita valensi tereksitasi menuju pita valensi dengan melewati energi *gap* yang terdapat diantara energi konduksi dan energi valensi. Energi *gap* adalah energi minimum yang dibutuhkan elektron agar dapat tereksitasi. Pita konduksi memiliki *hole* yang sangat banyak sehingga memungkinkan elektron pada pita valensi untuk meloncat ke pita konduksi. Semakin tinggi temperatur yang diberikan maka semakin banyak juga elektron yang dapat tereksitasi ke pita konduksi yang kemudian mengalir terus menerus. Peristiwa ini disebut difusi yang kemudian dapat menghasilkan beda potensial yang terukur pada multimeter.

Pada penelitian ini penyusunan struktur modul termoelektrik juga dapat mempengaruhi hasil tegangan keluaran. Untuk modul kesatu dengan struktur P-N secara seri menghasilkan nilai paling tinggi untuk sirkuit terbuka maupun tertutup. Sedangkan tegangan keluaran terendah pada modul ketiga dengan struktur material paralel P-P-P N-N-N yang kemudian diserikan. Hal ini sesuai apabila perhitungan tegangan secara seri yaitu dijumlahkan, sedangkan pada paralel dibagi terlebih dahulu. Sehingga modul dengan struktur P-N seri memiliki tegangan yang tertinggi. Resistivitas atau tahanan jenis listrik dipengaruhi oleh nilai resistivitas bahan kaki modul yaitu panjang kaki dan luas penampang kaki modul juga dapat mempengaruhi besarnya tegangan keluaran. Semakin panjang kaki modul semakin besar nilai resistansinya, namun sebaliknya semakin besar luas penampang kaki modul maka semakin kecil nilai resistansinya. Kaki-kaki atau elemen-elemen dari modul termoelektrik dihubungkan seri untuk aliran listrik dan dihubungkan paralel untuk aliran panas. Penelitian ini juga membuktikan hukum Ohm yang menyatakan bahwa tegangan keluaran sebanding dengan hambatannya. Sedangkan resistivitas sendiri berdasarkan rumus hambatan dalam kawat juga sebanding dengan hambatan yang dihasilkan. Sehingga dari analisis dua persamaan ini apabila hambatan dalam besar menghasilkan tegangan keluaran yang besar pula. Untuk modul kesatu dengan struktur P-N memiliki kaki terpanjang dan luas penampang terkecil dari modul lainnya sehingga memiliki tegangan keluaran paling besar. Sedangkan modul ketiga memiliki panjang kaki yang pendek dan luas penampang yang lebar sehingga resistivitasnya kecil sehingga menghasilkan tegangan keluaran yang terkecil.

E. Analisis Hasil Daya Keluaran

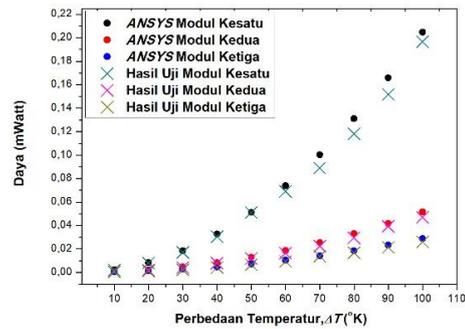
Berdasarkan dari grafik hasil uji perbandingan daya modul TEG masing masing modul pada Gambar 7 didapatkan daya maksimum modul kesatu dengan struktur P-N adalah $0,204 \pm 0,005$ mWatt modul kedua dengan struktur P-P N-N adalah $0,0514 \pm 0,005$ mWatt dan modul ketiga dengan struktur P-P-P N-N-N adalah $0,028 \pm 0,005$ mWatt. Modul dengan struktur P-N memiliki daya keluaran yang paling baik karena efek dari tegangan keluaran yang dihasilkan pula, sehingga daya keluaran yang dihasilkan juga baik. Grafik daya pada gambar 4.8 menunjukkan garis yang eksponensial. Hal ini dapat dijelaskan karena perubahan temperatur yang semakin besar menghasilkan nilai tegangan yang semakin besar pula. Sehingga dapat dikatakan bahwa perubahan temperatur sebanding dengan perubahan tegangan yang dihasilkan. Berdasarkan persamaan:

$$P=V.I \tag{3}$$

Nilai arus(I) dapat diubah dalam bentuk V/R, sehingga apabila dimasukan persamaan kembali menjadi:

$$P=V^2/R \tag{4}$$

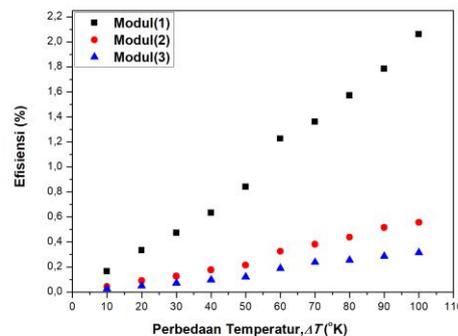
Dari persamaan diatas dapat dikatan pula daya(P) sebanding dengan kuadrat(V^2) atau dapat dituliskan P sebanding V. Sehingga, hubungan antara daya dan perubahan temperatur berupa fungsi kuadrat $P \approx (\Delta T)^2$ yang menghasilkan grafik yang eksponensial.



Gambar 11. Grafik hasil uji perbandingan daya modul termoelektrik terhadap perbedaan temperatur pada modul 1,2,3

F. Analisis Hasil Efisiensi

Daya keluaran yang dihasilkan modul termoelektrik diperlukan untuk menghitung besarnya efisiensi TEG. Efisiensi TEG merupakan perbandingan antara daya keluaran modul dibanding dengan kapasitas temperatur pada sisi panas modul. Untuk meningkatkan efisiensi tersebut adalah dengan meningkatkan kapasitas sisi panas modul termoelektrik(Qh). Peningkatan Qh terjadi bila nilai-nilai parameter bahan modul termoelektrik dapat meningkatkan pula nilai *figure of merit* (Z). Pada penelitian ini didapatkan nilai efisiensi maksimum pada modul struktur P-N adalah 2,060 % , modul dengan struktur P-P N-N adalah 0,556 % dan modul dengan struktur P-P-P N-N-N adalah 0,313 % . Modul dengan struktur P-N memiliki nilai efisiensi tertinggi hal ini terjadi karena parameter daya keluran yang dihasilkan juga tinggi dan juga koefisien seebeck yang tinggi pula. Sehingga memiliki hasil nilai yang linier dengan efisiensi yang didapatkan seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik hasil uji perbandingan efisiensi modul termoelektrik terhadap perbedaan temperatur pada modul 1,2,3.

IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Besar tegangan keluaran maksimum pada perbedaan temperatur 100° K yaitu pada modul kesatu sebesar $0,511 \pm 0,005$ mVolt , modul kedua sebesar $0,256 \pm 0,005$ mVolt dan modul ketiga sebesar $0,170 \pm 0,005$ mVolt dalam kondisi *Open Circuit* memiliki keakuratan 93,7% . Pada tegangan *Close Circuit* modul kesatu menghasilkan $0,452 \pm 0,005$ mVolt, modul kedua sebesar $0,226 \pm 0,005$ mVolt dan modul ketiga sebesar $0,1694 \pm 0,005$ mVolt pada

- perbedaan temperatur 100°K memiliki keakuratan 95,9% .
2. Daya maksimum pada perbedaan temperatur 100° K untuk modul kesatu adalah 0,204±0,005 mWatt, modul kedua adalah 0,051±0,005 mWatt dan modul ketiga adalah 0,028±0,005 mWatt.
 3. Efisiensi maksimum pada modul kesatu adalah 2,060 % , modul kedua 0,556% dan modul ketiga sebesar 0,313%.
 4. Modul kesatu dengan struktur P-N memiliki nilai efisiensi terbaik.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. J. Goldsmid, *Materials, Preparation, and Characterization in Thermoelectrics*. Taylor and Francis Group, 2012.
- [2] et al Muntini, Melania S, Risse E, "Comparison of Electrical Power for Thermoelectric Oxide Module," *J. Mater. Sci. Appl. Energy*, vol. 6, no. 3, pp. 238–242, 2017.
- [3] N. Aimable, "Design, Modeling, and Fabrication of Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery in Local Process Industry," University of Agder, 2017.
- [4] D. Hwang, Junphil, "More than Half Reduction in Price per Watt of Thermoelectric Device Without Increasing the Thermoelectric Figure of Merit of Materials," Yonsei University, 2017.
- [5] W. D. J. Callister, *Fundamental of Materials Science and Engineering*. New York: John Wiley & Son, 2001.
- [6] J. Kim, Tae Young., Lee, Seokhwan, and Lee, "Fabrication of Thermoelectric Module and Heat Transfer Analysis on Internal Plate Fin Structures of Thermoelectric Generator," *Sci. Direct*, vol. 124, pp. 470–479, 2016.
- [7] S. Puspita, "Generator Termoelektrik untuk Pengisian Aki," *J. Fis. dan Apl.*, vol. 13, no. 2, 2017.