

ANALISIS KINERJA MODUL TERMOELEKTRIK SP 1848 *HOT SIDE* DAN *COLD SIDE* TERHADAP TEMPERATUR ASPAL DAN OUTPUT DENGAN PELAT PENYERAP DARI ALUMINIUM DAN TEMBAGA

Yayan Riyanto¹

Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Riau, Pekanbaru, 28293
Laboratorium Rekayasa Termal, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Riau

Email: yayanriyan07@gmail.com

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui daya listrik yang dihasilkan *Thermoelectric Generator*. Memanfaatkan radiasi matahari untuk menghasilkan energi listrik menggunakan *thermoelectric generator*. *Thermoelectric generator* merupakan perangkat generator listrik yang mengkonversikan panas (perbedaan temperatur) menjadi energi listrik melalui efek *seeback*. Penelitian ini menggunakan modul *thermoelectric* tipe SP 1848. Aspal yang digunakan yaitu tipe AC-WC dengan ukuran 300 mm x 300 mm x 100 mm. Untuk memindahkan panas yang diserap aspal menuju modul *thermoelectric* digunakan pelat. Di penelitian ini menggunakan dua jenis pelat aluminium yang mana pelat tersebut divariasikan kedalamannya yaitu 2 cm, 4 cm dan 6 cm. Pada pelat kedalaman 2 cm, daya maksimal untuk aluminium yang dapat dihasilkan sebesar 31 mW pada saat radiasi matahari sebesar 887 W/m².

Kata kunci : termoelektrik generator, radiasi matahari, alternatif.

ABSTRACT

This research studies to determine the electric power generated by Thermoelectric Generators. Utilize solar radiation to produce electrical energy using thermoelectric generators. Thermoelectric generator is a power generation device that converts heat (temperature difference) into electrical energy through the seeback effect. This study uses a SP 1848 thermoelectric module. Asphalt used is the type of AC-WC with a size of 300 mm x 300 mm x 100 mm. To transfer heat absorbed to the thermoelectric module, plates are used. In this research, two types of aluminum plates are used in which the height is varied, 2 cm, 4 cm and 6 cm. At a plate height of 2 cm, the maximum power for aluminum that can be produced is 0.031 W when solar radiation is 887 W / m²

Keywords: *Thermoelectric Generator, Solar Radiation, alternative.*

PENDAHULUAN

Termoelektrik generator merupakan sebuah alat yang memanfaatkan perbedaan temperatur di kedua sisinya sehingga energi listrik dihasilkan akibat adanya efek *seeback* yang terjadi didalam termoelektrik (Motamed, 2012 dan Xiong, 2016).. Sehingga untuk mendapatkan panas pada aspal yang kemudian di transfer pada sisi hot side dari termoelektrik yaitu dengan menggunakan kolektor panas (Duarte, 2017 dan TNO, 2017). Kolektor

panas yang digunakan yaitu pelat tembaga dengan ketebalan 2 mm yang di benamkan didalam aspal. Namun hal yang harus diperhatikan yaitu di kedalaman berapa kolektor tembaga harus ditempatkan agar panas yang diterima oleh termoelektrik dapat maksimal. Sehingga daya listrik yang dapat dihasilkan menjadi lebih besar (Chen, 2017, Dessouky, 2017 dan Kang, 2010).

Terkait dengan penelitian pada aspal, Wei Jiang 2016 melakukan sebuah penelitian dengan

karakteristik aspal. Penelitian dilakukan pada musim panas dan dingin yaitu pada bulan Agustus dan bulan Desember. Aspal yang dipakai memiliki ukuran 300 mm x 300 mm x 100 mm (pxlxt), maka dia membagi 10 sampel kedalaman. Untuk mendapatkan data terkait temperatur aspal, Wei Jiang dkk meneliti selama 15 jam. Dan didapatkan data bahwa temperatur pada aspal terbagi 2 bagian waktu yaitu masing-masing jam 06.00 – 16.00 dan 16.00 – 21.00. yang mana pada saat jam 16.00 temperatur di permukaan aspal menurun sedangkan temperatur di kedalaman atau dasar aspal mengalami kenaikan, ini terjadi karena temperatur pada permukaan aspal lebih cepat hilang karena konveksi dengan udara disekitar, sedangkan temperatur pada dasar aspal sedikit lebih lama melepaskan panas.

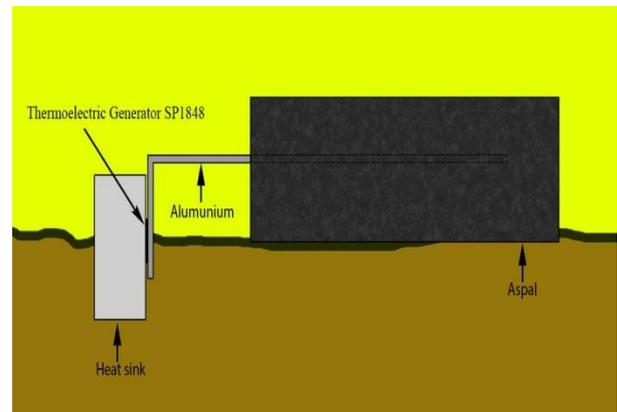
Struktur TEG yang terdiri dari suatu susunan elemen tipe-n (material dengan kelebihan elektron) dan tipe-p (material dengan kekurangan elektron). Panas masuk pada satu sisi dan dibuang dari sisi yang lainnya, menghasilkan suatu tegangan yang melewati sambungan termoelektrik. Besarnya tegangan yang dihasilkan sebanding dengan gradien temperature (D.M. Roe, 1994).

Pada tahun 2017, Sammer dkk melakukan penelitian yaitu memanen energi dari aspal jalan menggunakan termoelektrik generator. penelitian dilakukan pada bulan April hingga Juli di salah satu Kampus di Texas, Amerika Serikat. Dalam penelitiannya Sammer tidak menggunakan bahan sepenuhnya aspal, namun dia menempatkan pelat tembaga diatas jalan beton kemudian ditutupi dengan campuran aspal setebal 20 mm. dengan menggunakan termoelektrik ukuran 64 mm x64 mm, menghasilkan data maksimal pada bulan Mei. Dengan perbedaan temperatur hingga 7.6C dan didapatkan tegangan sebesar 650 mV dan kuat arus sebesar 22 mA.

Penelitian yang dilakukan ini menggunakan aspal tipe AC-WC dengan ukuran yang dibuat 300 mm x 300 mm x 100 mm. 3 bagian aspal dengan ukuran tersebut akan ditempatkan dibawah sinar matahari langsung selama percobaan yaitu selama 6 jam dimulai pada jam 9.00. panas yang diterima aspal akibat radiasi matahari akan diteruskan menuju termoelektrik generator menggunakan pelat tembaga dengan tebal 2 mm. 250 mm pelat akan ditanamkan didalam aspal dan 180 mm sisanya akan diteruskan kedalam tanah yang sudah ditempatkan termoelektrik generator di

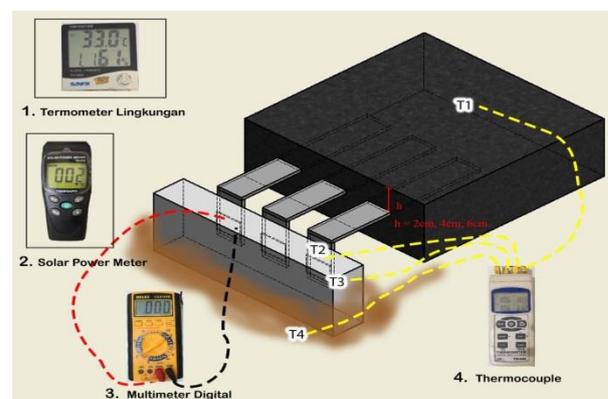
ujung pelat. Untuk sisi dingin dari termoelektrik generator menggunakan heat sink.

METODOLOGI



Gambar 1. Tampak Samping

Dalam proses pengujian menggunakan 2 Kolektor panas menggunakan pelat aluminium dan pelat tembaga dengan ketebalan 2 mm. Sepanjang 250 mm, pelat tembaga dan aluminium akan ditanam didalam aspal dengan kedalaman yang telah divariasikan, yaitu pada kedalaman 2 cm, 4 cm dan 6 cm dihitung dari permukaan aspal. Sisa dari panjang pelat akan di bentuk L dan ditanam didalam tanah sepanjang 180 mm. yang mana ujung dari pelat itu akan ditempelkan termoelektrik generator sebagai alat menghasilkan daya yang berasal dari panas kolektor . dapat dilihat pada gambar. 1 heat sink di tanam pada tanah.



Gambar 2. Desain 3D prototipe pengujian

Temperatur yang diamati adalah temperatur pada kedua sisi dari termoelektrik generator. yaitu sisi hot side dan cold side. Panas yang diterima permukaan aspal akan ditransfer oleh pelat tembaga menuju sisi termoelektrik. Pelat tembaga yang menyentuh sisi termoelektrik merupakan temperatur hot side. Sedangkan untuk temperatur cold side yaitu heat sink yang bersentuhan dengan sisi dingin dari termoelektrik tersebut.



Gambar 3. Perangkat uji lapangan

Dilihat pada Gambar 3 Penelitian dilakukan di lingkungan Universitas Riau. Penelitian ini sangat bergantung pada intensitas matahari. Oleh karena itu, penelitian dilakukan saat cuaca cerah agar data yang didapat lebih maksimal.

Temperatur pada aspal sangat di tentukan oleh seberapa banyaknya radiasi matahari yang dipancarkan selama percobaan. Pengujian dilakukan selama 6 jam yaitu dari jam 9.00 pagi hingga jam 15.00 sore. Data diambil setiap 30 menit sekali, jadi ada 12 data yang nanti akan dihitung untuk dianalisa.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil yang terdapat pada temperatur hot side

Dari hasil percobaan penelitian Radiasi yang dipancarkan matahari kemudian diterima oleh permukaan aspal jalan. Mengakibatkan temperatur permukaan akan naik dan mengalir kedalam bagian aspal. Kemudian specimen pelat alumunium didalam aspal akan mentrasfer panas menuju sisi hot side dari termoelektrik generator. terlihat pada tabel 1 bagaimana pengaruh radiasi matahari terhadap temperatur lempeng alumunium yang merupakan sisi hot side untuk termoelektrik generator.

Pada Tabel 1 radiasi pada temperature hot side pada masing variasi kedalaman 2 cm dengan kedalaman 2 cm lebih cepat menyerap panas karena lebih dekat dengan permukaan aspal. Pada saat nilai radiasi matahari paling tinggi yaitu 987 W/m saat jam 12.00 , temperatur hot side juga mengalami suhu paling

puncak yaitu 36.4 °C. temperatur puncak yang terdapat pada pelat dengan kedalaman 4 cm yaitu pada jam 14.30 sebesar 35.4 °C dan untuk pelat kedalaman 6 cm suhu puncaknya yaitu 34.7 °C pada saat jam 15.00. tingga rendah nya radiasi juga karena faktor di mana posisi matahari apa terhalang oleh awan atau tidak sempurna dalam menerima radiasi.

Tabel 1. Radiasi terhadap temperatur hot side pada pelat alumunium

Hour	T Hot Side °C			Ambient Temp °C	Radiation intensity
	2 cm	4 cm	6 cm		
1	32.4	32.1	31.2	27.2	635
2	32.7	32.4	31.7	27.5	644
3	32.9	32.7	32.1	27.2	669
4	33.1	33.1	32.2	27.3	741
5	33.8	33.4	33.2	27.1	767
6	34.1	34.1	33.6	28.8	783
7	35.3	35.3	34.3	28.6	796
8	36.4	35.4	34.7	29.2	887
9	35.3	35.2	34.3	29.4	781
10	34.4	34.2	34.2	29.6	764
11	34.3	34.2	33.3	29.1	751
12	34.7	34.3	32.6	28.8	733

Pada Tabel 1 radiasi pada temperature hot side pada masing variasi kedalaman 2 cm dengan kedalaman 2 cm lebih cepat menyerap panas karena lebih dekat dengan permukaan aspal. Pada saat nilai radiasi matahari paling tinggi yaitu 987 W/m saat jam 12.00 , temperatur hot side juga mengalami suhu paling puncak yaitu 36.4 °C. temperatur puncak yang terdapat pada pelat dengan kedalaman 4 cm yaitu pada jam 14.30 sebesar 35.4 °C dan untuk pelat kedalaman 6 cm suhu puncaknya yaitu 34.7 °C pada saat jam 15.00. tingga rendah nya radiasi juga karena faktor di mana posisi matahari apa terhalang oleh awan atau tidak sempurna.

Tabel 2. Radiasi terhadap temperatur hot side pada pelat Tembaga

Hour	T Hot Side °C			Ambient Temp °C	Radiation intensity
	2 cm	4 cm	6 cm		
1	32.4	32.1	31.2	27.2	635
2	32.7	32.4	31.7	27.5	644
3	32.9	32.7	32.1	27.2	669
4	33.1	33.1	32.2	27.3	741
5	33.8	33.4	33.2	27.1	767
6	34.1	34.1	33.6	28.8	783
7	35.3	35.3	34.3	28.6	796
8	37.6	35.4	34.4	29.2	887

9	35.3	35.2	34.3	29.4	781
10	34.4	34.2	34.2	29.6	764
11	34.3	34.2	33.3	29.1	751
12	34.7	34.1	32.6	28.8	733

Pada Tabel 2 Temperatur pada pelat dengan kedalaman 2 cm mengalami penurunan seiring dengan semakin berkurangnya radiasi matahari. Namun temperatur pada pelat kedalaman 4 cm dan 6 cm cenderung meningkat walaupun radiasi matahari mengalami penurunan. Ini terjadi karena permukaan aspal kontak langsung dengan udara luar dibandingkan dengan temperatur didalam aspal. Sehingga temperatur hot side pada pelat kedalaman 2 cm juga ikut mengalami penurunan.

Hasil yang terdapat pada temperatur cold side Pada Tabel 3 merupakan pengaruh radiasi matahari terhadap temperatur cold side pada termoelektrik generator. temperatur cold side diukur pada heat sink yang bersentuhan dengan sisi dingin dari termoelektrik generator. Peran heat sink pada penelitian ini harus diperhatikan, agar perbedaan temperatur pada termoelektrik generator semakin besar. oleh karena itu heat sink dibuat bersirip dan diisi air agar panas yang diterima dari termoelektrik generator lebih maksimal.

Tabel 3 Radiasi terhadap temperatur Cold side pada Aluminium

Hour	T Cold Side °C			Ambient Temp °C	Radiation intensity
	2 cm	4 cm	6 cm		
1	27.2	27.2	27.1	27.2	635
2	27.2	27.2	27.2	27.5	644
3	27.3	27.1	27.3	27.2	669
4	27.5	27.5	27.5	27.3	741
5	27.6	27.6	27.6	27.1	767
6	27.8	27.8	27.8	28.8	783
7	27.1	27.1	28.2	28.6	796
8	27.2	27.3	28.3	29.2	887
9	27.1	27.1	27.9	29.4	781
10	26.9	27.6	27.8	29.6	764
11	27.6	27.1	27.4	29.1	751
12	27.5	27.2	27.1	28.8	733

Temperatur cold side pada tiap variasi tidak terlalu berbeda, yang mana temperatur berkisar antara 27 °C – 28 °C. dikarenakan untuk cold side pada objek heat sink tetap stabil karena distabilkan oleh air untuk membasahi sisi sirip pada heatsink Temperatur heat sink di control agar selalu konstan dengan cara menutup dengan tanah agar panas matahari tidak mempengaruhi temperatur heat sink tersebut. Berikut dat output

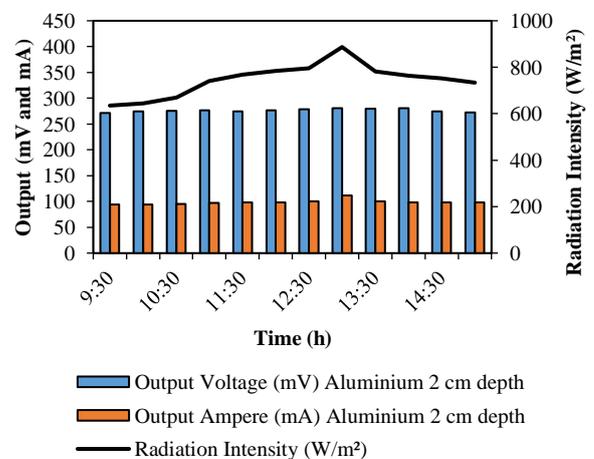
pelat aluminium dan tembaga. Dari Tabel. 4 kita bisa lihat temperature hot side pada masing-masing kedalama pada pelat tembaga nilai tertinggi terdapat pada kedalam 2 cm.

Tabel 4. Radiasi terhadap temperatur cold side pada tembaga.

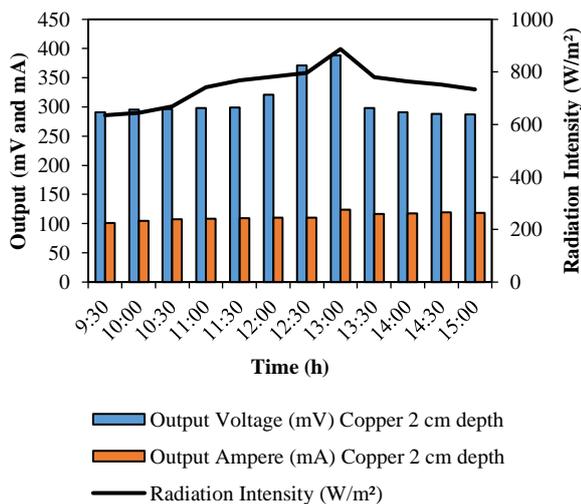
Hour	T Cold Side °C			Ambient Temp °C	Radiation intensity
	2 cm	4 cm	6 cm		
1	27.2	27.2	27.1	27.2	635
2	27.2	27.2	27.2	27.5	644
3	27.3	27.1	27.3	27.2	669
4	27.5	27.5	27.5	27.3	741
5	27.6	27.6	27.6	27.1	767
6	27.8	27.8	27.8	28.8	783
7	27.1	28.1	28.2	28.6	796
8	28.2	28.3	28.3	29.2	887
9	28.1	28.1	27.9	29.4	781
10	26.9	27.6	27.8	29.6	764
11	27.6	27.1	27.4	29.1	751
12	27.5	27.2	27.1	28.8	733

Dilihat dari Tabel 4 pada temperature cold side pada tembaga nilai terlihat stabil berubah nya tidak terlalu signifikan. Pada temperature cold side perubahan suhu pada T3 (heat sink) tidak terlalu jauh dari temperature aluminium.

Pada Gambar 3 Pada grafik (a) Aluminium output dari Thermoecleetric Generator di lihat voltage (mV) tertinggi terjadi pada jam 13:00 wib dan terendah terjadi pada pukul 14:30 dan pada pelat tembaga kenaikan terjadi pada pukul 13.30 wib dan yang terendah pada pukul 14: 30 wib.



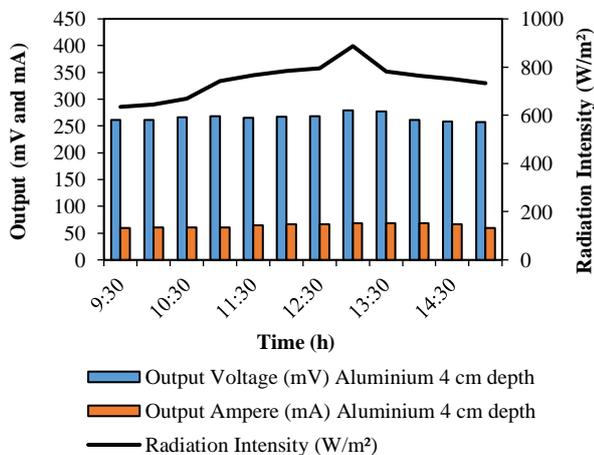
(a)



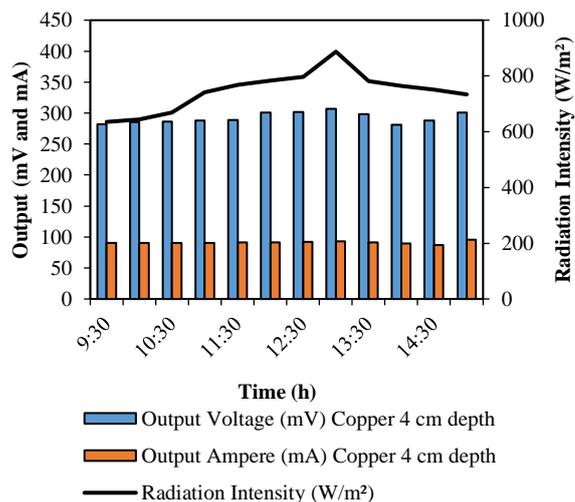
(b)

Gambar 3. Pengaruh radiasi terhadap output pada pelat (a) Aluminium kedalaman 2 cm (b) Tembaga kedalaman 2 cm

Dilihat pada grafik Gambar 3 *Output* yang didapat dari *thermoelectric* ini adalah tegangan (mV) dan kuat arus (A). Pada saat pengambilan data pertama, pelat 2 cm mampu menghasilkan tegangan sebesar 26 mV dan kuat arus sebesar 6 mA ketika nilai radiasi matahari sebesar 644 W/m². Sedangkan saat puncak radiasi matahari 887 W/m² yaitu ketika jam 13.00 siang, *thermoelectric generator* menghasilkan tegangan sebesar 30 mV dan kuat arus sebesar 9.24 mA. Jadi untuk output terhadap radiasi besar tembaga dari pada spesimen pelat aluminium dikarenakan sifat dari konduktivitasnya. Lebih baik tembaga dari pada aluminium.



(a)



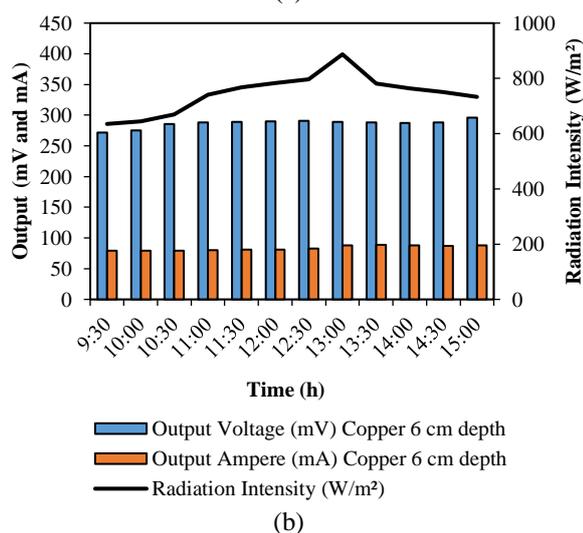
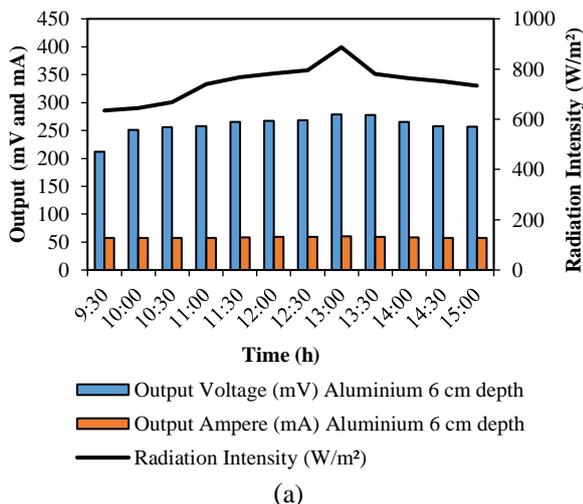
(b)

Gambar 4. Pengaruh radiasi terhadap output pada pelat (a) Aluminium kedalaman 4 cm (b) Tembaga kedalaman 4 cm

Pada pelat kedalaman 4 cm di Gambar 4 saat pengambilan data pertama output dari *thermoelectric generator* menghasilkan tegangan sebesar 28.2 mV dan kuat arus 8.01 mA dengan intensitas radiasi 635 W/m². Tegangan yang dihasilkan mengalami kenaikan sampai akhir pengambilan data. Ketika puncak radiasi matahari 887 W/m², output yang dihasilkan sebesar 30 mV dan kuat arus sebesar 9.24 mA. Kemudian output terus mengalami kenaikan tidak terlalu besar dan mencapai nilai output pada jam 15.00 sebesar 28.2 mV dan kuat arus sebesar 8.01 mA dengan intensitas radiasi matahari sebesar 733 W/m².

Terlihat pada grafik bawah masing-masing pelat sepisemen bawah grafik menunjukkan bahwa tembaga lebih besar output nya dari pada aluminium

Nilai pada tembaga lebih lebih besar dibandingkan pelat aluminium. Dan itu berpengaruh pada nilai daya yang di serap modul termolektrik.



Gambar 5 Pengaruh radiasi terhadap output pada pelat (a) Aluminium kedalaman 6 cm (b) Tembaga kedalaman 6 cm

Tidak jauh berbeda dengan pelat kedalaman 4 cm. Pada gambar 5 output pada pelat kedalaman 6 cm yang dihasilkan juga mengalami kenaikan walaupun intensitas radiasi matahari berkurang. Namun output yang dihasilkan tidak terlalu besar dari pelat kedalaman 4 cm, karena letak pelat yang terlalu jauh dari permukaan aspal. Sehingga panas permukaan membutuhkan waktu sedikit lebih lama untuk sampai pada kedalaman 4 cm. Output yang didapat saat puncak radiasi matahari sebesar 29.1 mV dan kuat arus sebesar 083.1 mA. Sedangkan pada pengambilan data terakhir output yang dihasilkan sebesar 27.2 mV dan kuat arus sebesar 85.2 mA dengan intensitas radiasi matahari sebesar 733 W/m².

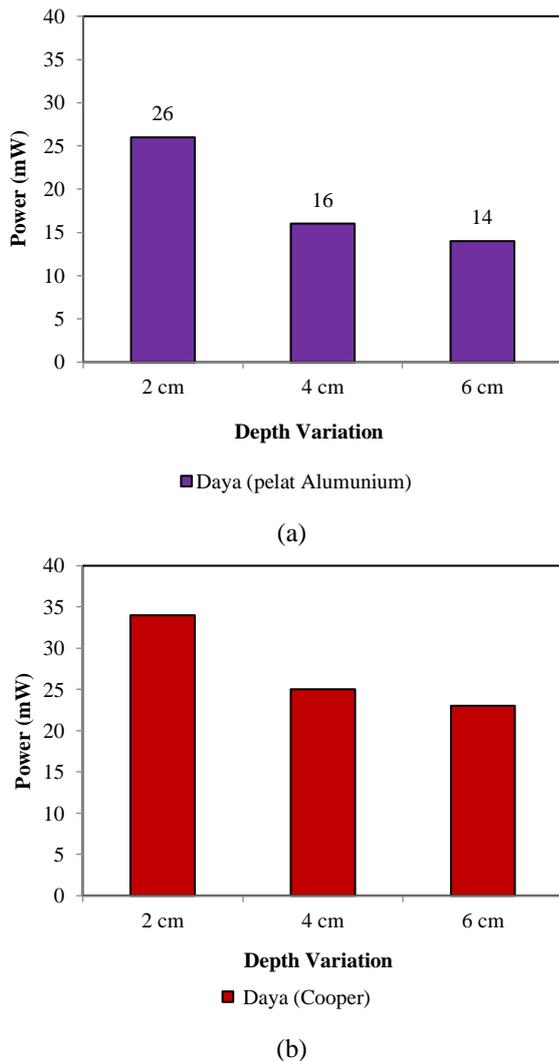
Dari gambar 3, 4 dan 5 kita melihat pengaruh kedalaman pelat aluminium terhadap daya yang dihasilkan. Karena pelat kedalaman 2 cm lebih dekat dengan permukaan aspal, maka daya yang dihasilkan lebih cepat dihasilkan pada saat

pengambilan data pertama dibandingkan dengan pelat kedalaman 4 cm dan 6 cm. Akibat pengaruh radiasi terhadap panas pelat maka daya pada pelat kedalaman 2 cm juga ikut turun karena permukaan aspal berkontak langsung dengan udara luar yang menyebabkan temperatur aspal menurun. Akibatnya nilai ΔT semakin rendah yang mempengaruhi output alat. Namun hal ini tidak terjadi pada pelat kedalaman 4 cm dan 6 cm pada gambar, hal ini terjadi karena panas matahari masih tersimpan didalam aspal.

Temperatur heat sink atau T2 juga sangat mempengaruhi output dari alat, karena heat sink bertujuan untuk menerima panas yang masuk dalam modul termoelektrik generator. Temperatur T2 cenderung konstan pada temperatur 28° C, karena heat sink sudah dirancang sedemikian rupa agar dapat langsung menguraikan panas yang diterima. Jika tidak maka temperatur tanah mendominasi sehingga perbedaan temperatur akan menjadi lebih kecil lagi yang mengakibatkan output alat juga akan semakin kecil.

Dari perbandingan kedalaman ketiga pelat tersebut, maka pelat dengan kedalaman 2 cm dinilai lebih bagus daripada pelat pada variasi kedalaman 4 dan 6 cm. Karena jarak perpindahan panas dari permukaan aspal ke pelat tembaga kedalaman 2 cm lebih pendek, mengakibatkan panas yang diterima termoelektrik generator menjadi lebih besar sehingga daya yang dihasilkan lebih besar.

Pada Gambar. 5 ada 2 grafik daya pada masing-masing pelat aluminium dan tembaga di mana pada kedalaman 2 cm daya yang dihasilkan besar 27 mW pada pelat tembaga terjadi kenaikan tertinggi pada 2 cm sebesar 34 mW. Kenaikan pada pelat kedalaman 2 cm dikarenakan posisi pelat yang lebih banyak terkena paparan sinar matahari langsung



Gambar 6. Rata – rata daya pada pelat (a) Aluminium (b) Tembaga

Kita lihat dari gambar 6 grafik range pada nilai daya yang dihasilkan pada pelat tembaga lebih besar dibandingkan pelat aluminium itu terjadi di akibat kan sifat konduktivitas pelat tembaga lebih baik dari pada aluminium. Pada puncak daya yang di dapat kan sebesar 34 mW dan untuk pelat kedalaman 6 cm sebesar 23 mW. Hal ini di sebabkan nilai konduktivitas termal pada material tembaga lebih unggul dibandingkan material aluminium.

KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan, temperatur lempeng sangat mempengaruhi daya output yang dihasilkan oleh termoelektrik generator. didapatkan bahwa pelat dengan kedalaman 2 cm dinilai lebih baik dari pada pelat dengan kedalaman 4 cm dan 6 cm karena daya yang dihasilkan lebih besar. ini terjadi karena pelat

dengan kedalaman 2 cm lebih dekat dengan permukaan aspal. Hasil penelitian menunjukkan bahwa temperatur *hot side* pada tembaga dengan kedalaman 2 cm lebih cepat menyerap panas karena lebih dekat dengan permukaan aspal. Pada saat nilai radiasi matahari paling tinggi yaitu 887 W/m saat jam 13.00, temperatur hot side juga mengalami suhu paling puncak yaitu 36.4 °C. Sedangkan temperatur puncak yang terdapat temperature terhadap tembaga pada pelat dengan kedalaman 2 cm yaitu pada jam 14.30 sebesar 37.6 °C dan untuk pelat kedalaman 6 cm suhu puncaknya yaitu 37.9 °C pada saat jam 15.00. Pelat dengan kedalaman 2 cm dapat menghasilkan daya yang lebih besar dibandingkan pada pelat kedalaman 4 cm dan 6 cm. Hal ini terjadi karena panas yang diterima pelat kedalaman 4 cm dan 6 cm lebih lambat dibandingkan dengan pelat dengan kedalaman 2 cm.

DAFTAR PUSTAKA

- G. Min, D.M. Roe, Handbook of thermoelectrics, Peltier devices as generator, CRC Press LLC, Florida, 1994, p.479
- Chandra, S. Sunarno, H dan indarto, B. 2017. *Generator Termoelektrik Untuk Pengisian Aki*. Institut Teknologi Surabaya, Surabaya. Volume 13, Nomor 2
- Chen. JQ, Wang. H, Zhu. HZ. *Analytical approach for evaluating temperature field of thermal modified asphalt pavement and urban heat island effect*. Appl Therm Eng 2017;113:739–48.
- Hamdi, S. 2014. *Mengenal Lama Penyinaran Matahari Sebagai Salah Satu Parameter Klimatologi*. LAPAN
- Dessouky, S. 2017. *Harvesting of Thermoelectric Energy From Asphalt Pavements*. University of Texas at San Antonio
- Duarte, F. dan Ferreira, A. 2017. *Energy Harvesting On Road Pavements*. State of Art 169, 79-90.
- Jiang, W. Yuan, D. Xu, S. Hu, H. dan Sha, A. 2017. *Energy Harvesting From Asphalt Pavement Using Thermoelectric Technology*. 205, 941-950.
- Kang-Won W, Correia AJ. *A pilot study for investigation of novel methods to harvest solar energy from asphalt pavements*. Goyang City (South Korea): Korea Institute of Construction Technology (KICT); 2010.
- Khaligh A, Onar OC. *Energy Harvesting: solar, wind, and ocean energy conversion systems*. Boca Raton (FL, USA): CRC Press Inc; 2010.
- Kisgyorgy, L. Plesz, B. 2015. *Thermal Energy Of Asphalt Pavements Using Thermoelectric*. 54, 23-35.
- Motamed A, Bahia HU. *Incorporating temperature into the constitutive equation for plastic deformation in asphalt binders*. Constr Build Mater 2012;29:647–58.

Schreier M, Roschewsky N, Dobler E, Meyer S, Huebl H, Gross R, Goennenwein STB. *Current heating induced spin seebeck effect*. Appl Phys Lett 2013;103(24):1–5.

TNO. SolaRoad: *paving the way to the roads of the future*.
<https://www.tno.nl/media/4574/solaroadtechnology.pdf> [accessed February 6, 2017].

Xiong HC, Wang LB. *Piezoelectric energy harvester for public roadway: on-site installation and evaluation*. Appl Energy 2016;174:101–7.