



**PEMANFAATAN POTENSI SUMBER AIR PANAS DI
BLAWAN BONDOWOSO SEBAGAI PEMBANGKIT
LISTRIK ALTERNATIF BERBASIS TEC**

SKRIPSI

oleh :

**JAMALUDDIN KHALILY
NIM 111910201004**

**PROGRAM STUDI STRATA I TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2015**



**PEMANFAATAN POTENSI SUMBER AIR PANAS DI
BLAWAN BONDOWOSO SEBAGAI PEMBANGKIT
LISTRIK ALTERNATIF BERBASIS TEC**

SKRIPSI

diajukan guna melengkapi tugas akhir dan memenuhi salah satu syarat
untuk menyelesaikan Program Studi S1 Teknik Elektro
dan mencapai gelar Sarjana Teknik

oleh :

**JAMALUDDIN KHALILY
NIM 111910201004**

**PROGRAM STUDI STRATA I TEKNIK ELEKTRO
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS JEMBER
2015**

PERSEMBAHAN

Syukur alhamdulillah atas segala nikmat yang Allah telah berikan sepanjang hidup ini. “Sungguh tiada kesulitan urusan di dunia kecuali disertai dengan kemudahan”, janji Allah dalam kitab suci-Nya yang menjadi pedoman umat Islam sedunia. Kini salah satu nikmat itu Allah limpahkan pada hamba-Nya, terselesaikannya kewajiban menuntut ilmu pada fase ini adalah wujud nikmat luar biasa serta bukti janji-Nya. Tanpa campur tangan-Nya tiada akan kuasa menyelesaikan tugas akhir ini sendiri.

Tugas akhir ini semoga dapat menjadi persembahan serta wujud rasa terima kasihku kepada:

1. Allah SWT yang telah mencukupi hamba-Nya dengan segala bentuk rahman rohim-Nya, memberikan hidayah dalam tiap langkah dan melimpahkan barokah atas segala usaha;
2. Rasulullah Muhammad SAW yang memberikan suri tauladan amaliyah pada umatnya untuk dicontoh agar dapat menjadi hamba yang beriman dan bertaqwa pada Allah SWT, serta dapat bermanfaat seperti halnya beliau yang hadirnya merupakan rahmatan lil ‘alamiin;
3. Kedua Orangtuaku, Ibu Imamas Sholihah, S.Pd. dan abah Drs. Munawir Yas’ad, M.Pd., yang tak hentinya mendoakan kelancaran urusan dan suksesku, memberikan dukungan dalam beragam bentuk tanpa henti, dan segala usaha mereka demi anaknya yang tak pernah kutau;
4. Sodara-sodara dan seluruh personil Ikatan Keluarga Besar Bani Dahlan (IBADAH) yang senantiasa memotivasi dengan segala pertanyaan menyudutkan dan pengalaman yang dibagikannya;
5. Segenap guru selama karir pendidikan formal & non-formal yang telah mengajarkan ilmu pengetahuan dan wawasannya sebagai bekal untuk sukses dunia-akhirat;
6. Almamater jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

MOTO

Bukankah kami telah memberikan umur yang cukup kepadamu semua. Dalam masa itu orang yang mau mengerti dapatlah mengambil pengertian dan orang yang memberikan peringatan pun telah datang padamu semua.*)

Tiada kata uzur dalam berjuang.**)

مُحَافَظَةٌ عَلَى قَدِيمِ الصَّالِحِ وَالْأَخْذُ عَلَى جَدِيدِ الْأَ صْلَحْ

Memelihara tradisi lama yang baik dan mengambil tradisi baru yang lebih baik.***)

*) QS. Fathir : 37

**) KH. Abdul Wahab Hasbullah

***) KH. M. Hasyim Asy'ari

PERNYATAAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama: Jamaluddin Khalily

NIM : 111910201004

menyatakan dengan sesungguhnya bahwa karya ilmiah yang berjudul *"Pemanfaatan Potensi Sumber Air Panas di Blawan Bondowoso sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berbasis TEC"* adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali kutipan yang sudah saya sebutkan sumbernya, belum pernah diajukan pada institusi mana pun, dan bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab penuh atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 13 Oktober 2015

Yang menyatakan,

Jamaluddin Khalily
NIM 111910201004

SKRIPSI

**PEMANFAATAN POTENSI SUMBER AIR PANAS DI
BLAWAN BONDOWOSO SEBAGAI PEMBANGKIT
LISTRIK ALTERNATIF BERBASIS TEC**

oleh

Jamaluddin Khalily
NIM 111910201004

Pembimbing

Dosen Pembimbing Utama : Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.

Dosen Pembimbing Anggota : Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.

PENGESAHAN

Skripsi berjudul “*Pemanfaatan Potensi Sumber Air Panas di Blawan Bondowoso sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berbasis TEC*” telah diuji dan disahkan pada:

hari, tanggal : Selasa, 13 Oktober 2015

tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember.

Tim Penguji:

Pembimbing Utama,

Pembimbing Anggota,

Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T.
NIP.19710402 200312 1 001

Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T.
NIP.19700404 199601 1 001

Penguji I,

Penguji II,

Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T.
NIP. 19710614 199702 1 001

Ir. Widyono Hadi, M.T.
NIP.19610414 198902 1 001

Mengesahkan
Dekan,

Ir. Widyono Hadi, M.T.
NIP. 19610414 198902 1 001

RINGKASAN

Pemanfaatan Potensi Sumber Air Panas di Blawan Bondowoso sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berbasis TEC; Jamaluddin Khalily, 111910201004; 2015;59 halaman; Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Dewasa ini kebutuhan akan energi listrik di dunia semakin meningkat, termasuk Indonesia juga mengalami hal yang sama. Dan pemenuhan kebutuhan akan energi saat ini sebagian besar diperoleh dari penggunaan bahan bakar fosil oleh Pembangkit listrik yang berkapasitas besar. Namun kini mulai banyak diterapkan pemanfaatan energi pengganti lain yang lebih ramah lingkungan, bebas polusi, dan sifatnya yang terbarukan. Potensi geotermal di Indonesia yang menghasilkan sumber air panas, menyimpan potensi energi panas yang sifatnya termasuk energi terbarukan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu analisa di lapangan mengenai Pemanfaatan Potensi Sumber Air Panas di Blawan Bondowoso Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berbasis TEC (*Thermoelectric Cooler*).

TEC (*Thermoelectric Cooler*) merupakan *solid state technology* yang umumnya menjadi alternatif teknologi pendingin selain sistem kompresi uap, yang menggunakan efek Peltier. Dalam penelitian ini, TEC dialih fungsikan sebagai pembangkit listrik tenaga panas / TEG (*thermoelectric generator*) yang menggunakan efek Seebeck, dengan syarat adanya perbedaan suhu yang signifikan di antara kedua sisinyamaka arus listrik akan mengalir dalam rangkaian tersebut. Digunakan 9 buah TEC berdimensi 4x4cm yang dirangkai secara seri, dengan bahan berupa Bi_2Te_3 (*Bismuth telluride*) sehingga memiliki nilai koefisien ZT (variabel sosok merit) sebesar 0,7 yang dipakai sebagai dasar untuk melakukan perhitungan efisiensi kinerja dari TEG. Sumber air panas di Blawan memiliki temperatur pada kisaran 45-49,5 °C. Pengambilan data potensi dilakukan selama 3 hari yakni 21-23 Agustus 2015. Mulai pukul 9:00 WIB hingga pukul 15:00 WIB, dengan pencatatan keluaran data potensi setiap selang 30 menit. Data yang diperoleh dengan menggunakan alat bantu pengambilan data

(purwarupa TEG), dipakai untuk melakukan analisa mengenai seberapa berpotensi TEG dalam skala lebih besar bila diterapkan. Karakteristik kinerja TEG di lokasi penelitian juga dapat diketahui dan dianalisa.

Data yang diambil menggunakan alat bantu pengambilan data yaitu tegangan keluaran TEG (V_{TEG}), tegangan keluaran konverter (V_{conv}), arus keluaran konverter (I_{conv}), suhu sisi panas TEC (T_{hot}), suhu sisi dingin TEC (T_{cold}), suhu sumber air panas ($T_{hot\ water}$), suhu air pendingin ($T_{cold\ water}$), suhu lingkungan (T_{env}), dan daya keluaran (P_{TEG}). Hasil pengambilan data potensi selama 3 hari menunjukkan tren pada masing-masing karakteristik. Karakteristik tegangan V_{TEG} terhadap waktu yaitu saat pagi hari menghasilkan tegangan yang cukup besar, lalu menurun seiring waktu beranjak siang meskipun penurunan tidak terjadi secara linier, kemudian mengalami kenaikan V_{TEG} mulai pukul 14:00 s/d 15:00 WIB. Tercatat V_{TEG} tertinggi dimiliki hari ke-2 sebesar 4,506V pada pukul 9:00 WIB dan V_{TEG} terendah dimiliki hari ke-1 sebesar 2,001V pada pukul 13:30 WIB. Karakteristik arus (I_{conv}) terhadap waktu memiliki perubahan besar arus yang dapat dikatakan tidak begitu signifikan. Variasi besar arus tercatat pada angka 0,04A dan 0,03A, namun rata-rata stabil pada 0,03A. Data arus dalam ketiga hari cenderung memiliki tren grafik sama, kecuali data arus hari ke-2 pada pukul 10:00 WIB.

Karakteristik suhu sumber air panas ($T_{hot\ water}$) terhadap waktu pada ketiga hari mengalami kenaikan suhu saat waktu beranjak siang (matahari makin terik), lalu mengalami penurunan suhu seperti saat pagi hari ketika waktu beranjak sore. Suhu air panas stabil pada 49,3 °C dan mengalami kenaikan suhu tertinggi mencapai 49,4 – 49,5 °C. Sedangkan karakteristik suhu lingkungan (T_{env}) terhadap waktu memiliki grafik membentuk semacam bukit, ketika pagi pukul 9:00 WIB suhu lingkungan tercatat cukup rendah pada masing-masing hari secara berurutan, yakni bersuhu 23,3 °C, 22,9 °C, dan 23,6 °C. Semakin siang dan semakin terik matahari maka suhu lingkungan juga semakin meningkat, begitu pula sebaliknya. Suhu lingkungan tertinggi ada pada hari ke-3 pukul 13:30 WIB sebesar 31,3 °C. Kemudian karakteristik daya (P_{TEG}) terhadap waktu diperoleh melalui perhitungan dengan persamaan matematis, tren daya yang dimiliki pada

ketiga hari membentuk kurva seperti palung laut, bagian grafik yang menurun curam merupakan efek dari menurunnya tegangan keluaran (V_{TEG}), yang besar V_{TEG} tersebut lebih kecil dari tegangan masukan yang dapat ditoleransi oleh konverter. Contohnya V_{TEG} hari ke-1 pada pukul 11:30 dan 12:00 WIB hanya sebesar 2,711V dan 2,469V, tegangan sedemikian lebih kecil dari toleransi minimal yang diberikan konverter (2,8 - 2,9V) untuk dapat bekerja normal. Sehingga otomatis konverter tidak dapat menaikkan tegangan sesuai pengaturan awal (*setting* di 12V), dan hanya mampu menaikkan masing-masing menjadi 3,661V dan 3,279V. Daya tertinggi yang dicapai pada ketiga hari sebesar 0,48watt, dan daya terendah dicapai pada hari ke-1 sebesar 0,07962watt. Arus disini bukan faktor yang memberi pengaruh besar terhadap daya yang dihasilkan, dikarenakan arus yang terukur relatif stabil di 0,03A akibat dari kepingan TEC yang tersusun seri.

SUMMARY

The Use of Hot Springs Potential in Blawan Bondowoso as an Alternative Power Plant Based on TEC; Jamaluddin Khalily, 111910201004; 2015; 59 pages; Department of Electrical Engineering Faculty of Engineering, University of Jember.

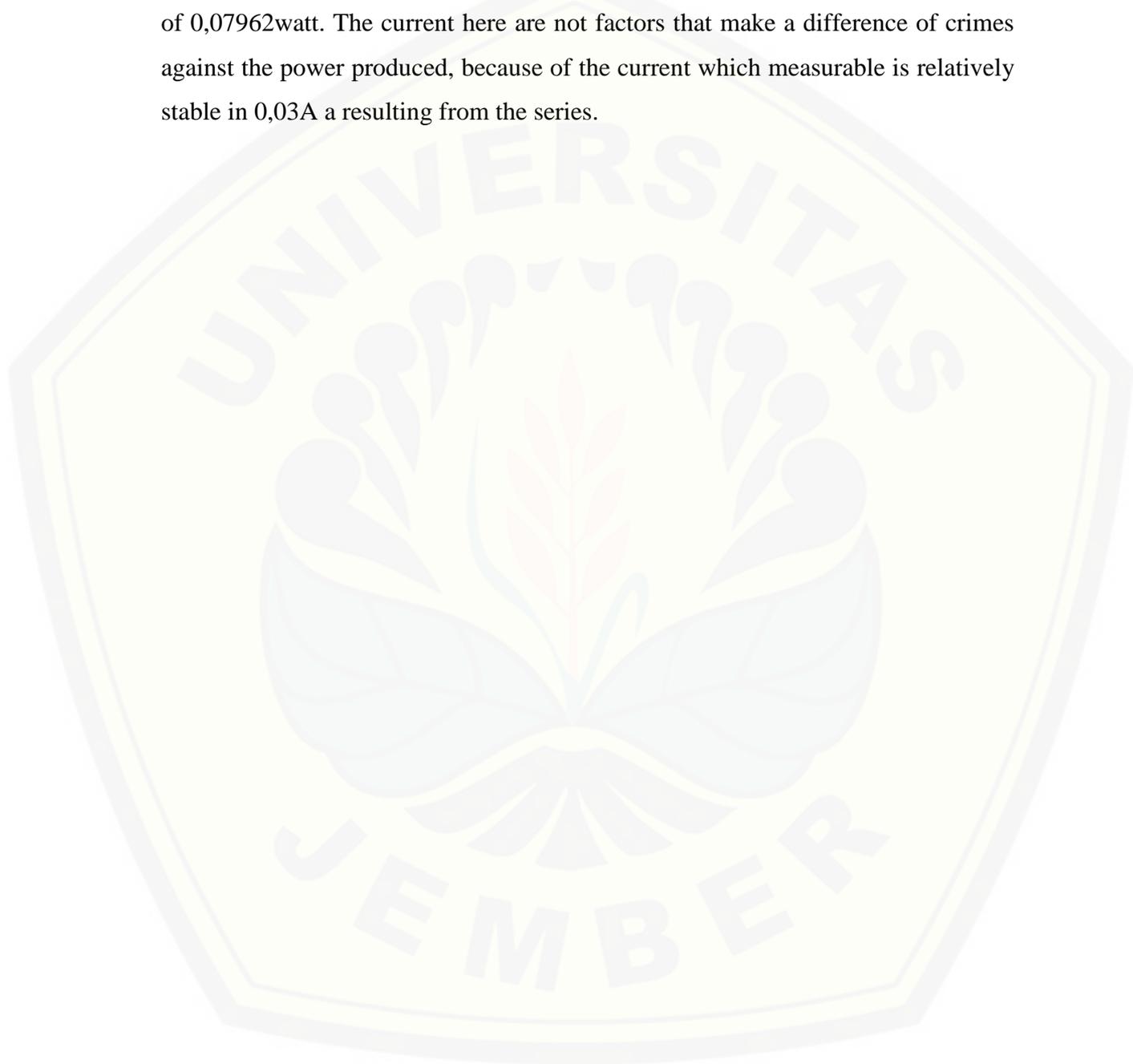
An electricity need in the world has increased significantly these days, and it does so for Indonesia. The need of energy consumption mostly are obtained by the use of fossil fuels by the large amount of a generator power. However, there are many other renewable energy sources that have been applied which are environmentally and free of pollution nowadays. A geothermal potency in Indonesia produces renewable energy of hot water. The method used in this research is analysis in the field about the potential of hot springs in Blawan Bondowoso as an alternative power plant based on TEC (thermoelectric cooler).

TEC (thermoelectric cooler) is a solid state technology that was appointed as the cooling alternative technology generally other than steam compression system, using Peltier effect. In this research, TEC moved functions as power stations heat / TEG (thermoelectric generator) using Seebeck effect, with the terms that they have had different significant temperature between the two sides then a current of electricity would flow in the series of them. Using 9 of TEC infinite dimensional 4x4cm which have developed in series, by the kinds of Bi_2Te_3 (bismuth telluride) so as to have value the coefficient ZT (of variable the figure of merit) as much as 0,7 used as a for just calculate the performance of TEG efficiency. Hot springs in Blawan have temperature at the range 45-49,5 °C. An adoption potential of data are done for 3 days (21-23) on August 2015. It is started at 9:00 WIB to 15:00 WIB, with recording output data the potential of every hose 30 minutes. The data are collected by using the data tools (TEG prototype), it used for doing an analysis on how TEG potential in larger scale had been applied. The characteristic of TEG's performance in the research locations can also be known and analysed.

The data taken by using the retrieval data namely an output voltage are TEG (V_{TEG}), output voltage converter (V_{conv}), the current exodus converter (I_{conv}), hot side temperature of TEC (T_{hot}), cold side temperature of TEC (T_{cold}), the temperature of water source heat ($T_{hot\ water}$), cooling water temperature ($T_{cold\ water}$), the environmental temperature (T_{env}), and power output (P_{TEG}). Result of making the potential for 3 day indicating a trend in every characteristics. The characteristic of voltage V_{TEG} respect to time was that in the morning, it produces a voltage large, and declines by the time move into the day, although the decline does not occur in a linear manner, then increases V_{TEG} starting at 14:00 until 15:00 WIB. It is recorded as the highest V_{TEG} owned second day of 4,506V at 9:00 WIB and the lowest V_{TEG} owned in the first day of 2,001V at 13:30 WIB. The characteristic of the current (I_{conv}) of time had the changes the amount of current that could be said only slightly. The variation of the current amount is recorded at approximately 0,04A and 0,03A, but the average is levelled off at 0,03A. The data currently in the third day tend to have the same charts, except the current data in the second day at 10:00 WIB.

The characteristic of hot springs temperature ($T_{hot\ water}$) against time at three days has experienced a rise in temperature of time in to the day (the sun more blistering), then drops in the temperature in the morning when the time is going to the afternoon. The temperature of hot water is stable at 49,3 °C and increases the hottest reaching 49,4 – 49,5 °C. While characteristic of environment temperature (T_{env}) to the time has a grasshopper such a hill, in the morning at 9:00 WIB the temperature of environment is too low each day in a row, absolutely 23,3 °C, 22,9 °C, and 23,6 °C. In the afternoon and the hot day, the environment of temperature increases, and vice versa. The temperature of environment is the third highest at 13:30 WIB of 31,3 °C. Then the characteristic of (P_{TEG}) is obtained through mathematical calculations of equation, trend resources have on the third day form a curve as sea trough, the chart steeping decline is the effect of declines in an output voltage (V_{TEG}), great V_{TEG} is less of voltage input tolerable by converter. For example, V_{TEG} in the first day at 11:30 and 12:00 WIB is only 2,711V and 2,469V, the voltage in such is smaller than tolerance at least it is

given converter (2,8 - 2,9V) to achieve a normal working. So an automatic converter could not raise voltage in accordance arrangement early (setting in 12V), and is only able to raise each became 3,661V and 3,279V. The highest power reached at the all days of 0,48watt, and the lowest reached at the first day of 0,07962watt. The current here are not factors that make a difference of crimes against the power produced, because of the current which measurable is relatively stable in 0,03A a resulting from the series.



PRAKATA

Segala puji bagi Allah SWT yang Maha akan segala sesuatu, atas limpahan rahmat, nikmat, dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “*Pemanfaatan Potensi Sumber Air Panas di Blawan Bondowoso sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berbasis TEC*”. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan program studi strata satu (S1) Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Selama penyusunan skripsi ini penulis mendapat bantuan dari berbagai pihak, untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ir. Widyono Hadi, M.T., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember;
2. Dr. Bambang Sri Kaloko, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Utama;
3. Suprihadi Prasetyono, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Anggota;
4. Dr. Azmi Saleh, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji Utama;
5. Ir. Widyono Hadi, M.T., selaku Dosen Penguji Anggota;
6. Kedua Orangtua saya, Ibu Imamas Sholihah, S.Pd dan abah Drs. Munawir Yas'ad, M.Pd;
7. Ikatan Keluarga Besar Bani Dahlan (IBADAH), mulai dari mbah, pakde, bude, paklek, bulek, adek-adek, para sepupu gahol, sampai dengan cucu-cicitnya mbah;
8. Teman seperjuangan selama penelitian yang saling memotivasi dan berbaik hati memberi bantuan, Dicky Dharmawan dan Yanu Arif Santoso;
9. Teman yang menyempatkan diri menyumbang saran, Budi Noviansyah, Darma Arif Santoso, Rohmat Khoirul Sidiq, dan M. Aji Prasetyo;
10. U10 dan Sahabat yang selalu menjadi tempat pelipur lara, penggugah tawa, serta tempat pulang paling nyaman selama di Jember;
11. Sahabat-sahabat semenjak di Bahrul 'Ulum Tambakberas yang selalu menjadi tempat berbagi tanpa pernah rasa bosan menyelimuti, serta loyalitas tanpa batas yang amat berarti;

12. Rekan-rekan sejawat Teknik Elektro 2011 yang tidak bisa saya sebutkan satu per satu, terima kasih atas solidaritas persahabatan yang tak akan terlupakan, dukungan serta semangat juang yang tiada surut;
13. Almamater Jurusan Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Jember.

Segala kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis maupun pembaca sekalian.

Jember, 13 Oktober 2015

Penulis

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN SAMPUL	i
HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PERSEMBAHAN	iii
HALAMAN MOTO	iv
HALAMAN PERNYATAAN	v
HALAMAN PEMBIMBING	vi
HALAMAN PENGESAHAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	xi
PRAKATA	xiv
DAFTAR ISI	xvi
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR GAMBAR	xix
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	4
1.5 Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSATAKA	5
2.1 <i>Thermoelectric Cooler</i> (TEC)	5
2.2 Energi dan Daya	7
2.3 Sistem Pendingin	8
2.4 Interpolasi	12
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Tahapan Penelitian	17
3.2 Diagram Alir Penelitian.....	18
3.3 Blok Diagram Sistem	19

3.4	Alat Bantu Pengambilan Data (Purwarupa TEG)	20
3.4.1	Desain Alat Bantu Pengambilan Data	20
3.4.2	<i>Data Sheet</i> Modul TEG Bismuth Telluride.....	22
3.5	Pembangunan Data Potensi Pembangkit	24
3.5.1	Pengaruh Suhu Terhadap Keluaran Pembangkit Berbasis TEC	25
3.5.2	Teknik Pengambilan Data	25
BAB 4.	HASIL DAN PEMBAHASAN	27
4.1	Pengujian Alat Bantu Pengambilan Data (Purwarupa TEG) ...	27
4.2	Hasil Pengambilan <i>Sample</i> Data Potensi di Blawan	31
4.3	Kajian Potensi Energi Terbarukan di Blawan	44
4.3.1	Potensi Penerapan TEG di Sumber Air Panas Blawan ..	44
4.3.2	Perbandingan Potensi dengan Hasil Penelitian Lain	46
BAB 5.	PENUTUP	51
5.1	Kesimpulan	51
5.2	Saran	52
DAFTAR PUSTAKA		53
LAMPIRAN-LAMPIRAN		55

DAFTAR TABEL

	Halaman
3.1 <i>Data Sheet</i> Modul TEG yang digunakan (TEC1-12706).....	22
4.1 Hasil Pengujian Beberapa Sistem Pendingin pada Alat Bantu	28
4.2 Hasil Pengambilan Data Potensi di Sumber Air Panas Blawan (Hari Ke-1, 21 Agustus 2015)	33
4.3 Hasil Pengambilan Data Potensi di Sumber Air Panas Blawan (Hari Ke-2, 22 Agustus 2015)	34
4.4 Hasil Pengambilan Data Potensi di Sumber Air Panas Blawan (Hari Ke-3, 23 Agustus 2015)	35
4.5 Perbandingan dengan Hasil Penelitian Lain.....	46

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
2.1	Jenis-jenis TEC 5
2.2	(a) Pendingin Termoelektrik Tipe TEC1-12706, (b) Prinsip Kerjanya . 6
2.3	Prinsip Kerja <i>Thermoelectric Generator</i> (TEG) 7
2.4	Sistem Pendingin Udara 9
2.5	Sistem Pendingin Air 10
2.6	(a) Sistem Pendingin <i>Dry Ice</i> , (b) Nitrogen Cair..... 11
2.7	(a) Sistem Pendingin Pengubah Fasa, (b) Alur Kerjanya..... 12
2.8	Grafik Data Interpolasi Linier 13
2.9	Grafik Data Interpolasi Kuadratik 14
2.10	Grafik Data Interpolasi Polinomial 15
3.1	Diagram Alir Penelitian 18
3.2	Blok Diagram Sistem Purwarupa Pembangkit Listrik Tenaga Air Panas atau TEG 20
3.3	(a) Kondisi Lingkungan Sumber Air Panas, (b) Bak Penampung 21
3.4	Desain Purwarupa TEG sebagai Alat Bantu Pengambilan Data dengan Sistem Pendingin Air (<i>water cooling</i>) 21
3.5	Susunan TEC 22
3.6	Grafik Daya Beban TEG (TEC1-12706) Terhadap Tegangan Beban pada Beberapa Variasi Selisih Suhu (ΔT) 24
4.1	Grafik Tegangan V_{TEG} Terhadap Waktu 36
4.2	Grafik Perbandingan Tegangan TEG & Konverter..... 38
4.3	Grafik Arus Terhadap Waktu 39
4.4	Grafik Suhu <i>Hot Springs</i> Terhadap Waktu 40
4.5	Grafik Suhu Lingkungan Terhadap Waktu 41
4.6	Grafik Daya Terhadap Waktu 42
4.7	Purwarupa TEG 45
4.8	Grafik Grafik Selisih Suhu 2 Sisi TEC Hari ke-1 47

4.9	Grafik Grafik Selisih Suhu 2 Sisi TEC Hari ke-2	48
4.10	Grafik Grafik Selisih Suhu 2 Sisi TEC Hari ke-3	48



BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini kebutuhan akan energi listrik di dunia semakin meningkat, termasuk Indonesia juga mengalami hal yang sama. Peningkatan konsumsi listrik tersebut umumnya disebabkan semakin banyaknya perangkat elektronik yang digunakan dalam kehidupan masyarakat sehari-hari, serta konsumsi listrik pada segmen industri yang juga turut meningkat sekitar dua kali dari pertumbuhan jumlah pelanggannya, menunjukkan bahwa Indonesia mulai menjadi tempat yang bagus untuk bertumbuhnya industri skala besar. Sedangkan peningkatan kebutuhan listrik ini belum diimbangi dengan peningkatan kapasitas pembangkit listrik yang ada, sehingga kondisi pemadaman listrik tidak jarang ditemui terjadi di kawasan pemukiman sipil. (Administrator, 2013)

Pembangkit listrik yang berkapasitas besar saat ini mayoritas menggunakan bantuan bahan bakar fosil untuk proses produksinya. Namun seperti yang diketahui publik, bahwa jumlah cadangan bahan bakar fosil yang tersisa di bumi nantinya akan semakin sedikit bahkan diperkirakan akan habis suatu saat kelak. Selain penggunaan bahan bakar fosil oleh pembangkit listrik, kekhawatiran akan semakin menipisnya jumlah bahan bakar fosil juga timbul akibat penggunaannya dalam jumlah besar untuk kendaraan bermotor yang populasinya setiap tahun terus meningkat seiring dengan bermunculannya produk-produk terbaru dari pabrikan. (Challoner, Jack, 2000)

Semakin berkembangnya teknologi di era modern, secara langsung mempengaruhi akan permintaan energi selama seratus tahun terakhir. Dan pemenuhan kebutuhan akan energi saat ini sebagian besar diperoleh dari penggunaan bahan bakar fosil dalam jumlah yang tidak sedikit. Hal ini memberi dampak pada pencemaran udara serta lingkungan. Beranjak dari masalah yang timbul akibat penggunaan bahan bakar fosil yang berlebihan untuk keperluan pemenuhan energi, kini mulai banyak diterapkan pemanfaatan energi pengganti lain yang lebih ramah lingkungan, bebas polusi, dan sifatnya yang terbarukan

(ketersediaannya melimpah). Contoh sumber energi terbarukan di Indonesia yang sering dijumpai penggunaannya adalah energi surya, hidroelektrik, energi angin, dan geotermal. Berbeda dengan bahan bakar fosil yang sifatnya tak terbarukan sehingga ketersediaannya di bumi terbatas dan suatu saat dapat habis. (Komunitas Dian Aksara, 2007)

Dalam prakteknya, untuk dapat memanfaatkan sumber energi terbarukan misal energi surya, diperlukan alat pengkonversi energi berupa panel surya yang didalamnya tersusun atas beberapa sel surya untuk mengubah foton yang dipancarkan matahari menjadi energi listrik. Berpotensi pemanfaatan energi surya ini sayangnya tidak dibarengi dengan terjangkaunya investasi untuk pembelian panel surya, sehingga sampai saat ini baru pihak tertentu saja yang dapat memanfaatkan energi surya untuk suplai kebutuhan listriknya. (Challoner, Jack, 2000)

Wilayah Indonesia yang secara geografis dikelilingi banyak gunung berapi dan lapisan batuan bumi yang bervariasi jenisnya, memiliki potensi geotermal yang banyak tersebar. Selain pemanfaatan geotermal secara langsung untuk pembangkit listrik, panas yang dihasilkan dari dalam bumi juga dapat menciptakan sumber air panas yang merupakan hasil proses pemanasan air dalam tanah secara geothermal akibat terbentuknya celah di dalam lapisan batuan bumi (en.wikipedia.org/wiki/Hot_spring). Panas dan temperatur yang dihasilkan tergantung dari kedalaman sumber geotermal ini.

Sumber air panas juga dapat terjadi akibat pemanasan air dalam tanah karena aktivitas vulkanik di suatu gunung berapi yang aktif. Melihat potensi energi panas yang dimiliki oleh sumber air panas yakni sifatnya yang termasuk energi terbarukan, dan keberadaan sumber air panas yang tidak sedikit di Indonesia. Maka untuk mengatasi kebutuhan suplai energi listrik khususnya di lingkungan sumber air panas yang kebanyakan telah menjadi objek wisata, pemanfaatan terhadap energi panas untuk menghasilkan energi listrik memberikan keuntungan tersendiri sehingga tidak bergantung pada suplai listrik PLN. Salah satu metodenya adalah yang akan dibahas dalam tugas akhir ini yaitu Pemanfaatan Potensi Sumber Air Panas di Blawan Bondowoso Sebagai

Pembangkit Listrik Alternatif Berbasis TEC.(The World Bank Washington, D.C., 1994)

TEC dalam penelitian inidialih fungsikan sebagai pembangkit listrik tenaga panas / *thermoelectric generator* (TEG). Ketika terjadi perbedaan panas yang signifikan di antara kedua sisinya, perbedaan tegangan akan tercipta di antara kedua sisi komponen ini. Penggunaan TEC sebagai pembangkit energi alternatif akan lebih ekonomis dari segi investasi awal dibandingkan dengan pembangkit lain seperti halnya panel surya. Dengan memanfaatkan potensi energi yang dimiliki oleh sumber air panas di daerah Blawan Bondowoso, lebih lanjut dengan mempertimbangkan hasil survei di lapangan, bukan tidak mungkin pembangkit listrik tenaga air panas akan dapat menjadi alternatif energi terbarukan yang baru.(Gutierrez, F dan Mendez, F, 2008)

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, timbul beberapa rumusan masalah berikut:

1. Membangun data potensi pembangkit listrik tenaga air panas yang berbasis *Thermoelectric Cooler* (TEC) untuk memanfaatkan sumber air panas di daerah Blawan Bondowoso.
2. Mempelajari pengaruh suhu pada pembangkit listrik tenaga air panas yang berbasis *Thermoelectric Cooler* (TEC) terhadap keluaran energi listrik yang dihasilkan.

1.3 Batasan Masalah

Pada proses desain dan pembuatan tentu terdapat berbagai masalah yang akan timbul, agar tidak terjadi pembahasan masalah yang terlalu meluas, maka diperlukan pembatasan masalah, yaitu:

1. *Thermoelectric Cooler* (TEC) yang digunakan bertipe TEC1-12706.
2. TEC berukuran 4x4cm.
3. Sistem pendingin menggunakan *refrigerant* cair.
4. Keluaran pembangkit berupa arus searah (DC).

5. Keluaran energi disalurkan langsung ke beban.
6. Beban yang digunakan bersifat tetap atau tidak fluktuatif (beban DC).
7. Pengambilan data dilakukan dari pagi hingga sore hari.
8. Tidak membahas mengenai sistem inverter maupun konverter.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini, yaitu:

1. Menghasilkan data potensi pembangkit listrik tenaga air panas yang berbasis *Thermoelectric Cooler* (TEC) untuk memanfaatkan sumber air panas di daerah Blawan Bondowoso.
2. Menganalisa pengaruh suhu pada sebuah pembangkit listrik tenaga air panas yang berbasis *Thermoelectric Cooler* (TEC) terhadap keluaran energi listrik yang dihasilkan.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat di ambil dari penulisan tugas akhir ini, yaitu:

1. Mengembangkan pembangkit listrik alternatif yang menggunakan energi terbarukan untuk mengurangi polusi di Indonesia.
2. Sebagai referensi untuk membahas pembangkit listrik alternatif untuk penelitian selanjutnya.

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

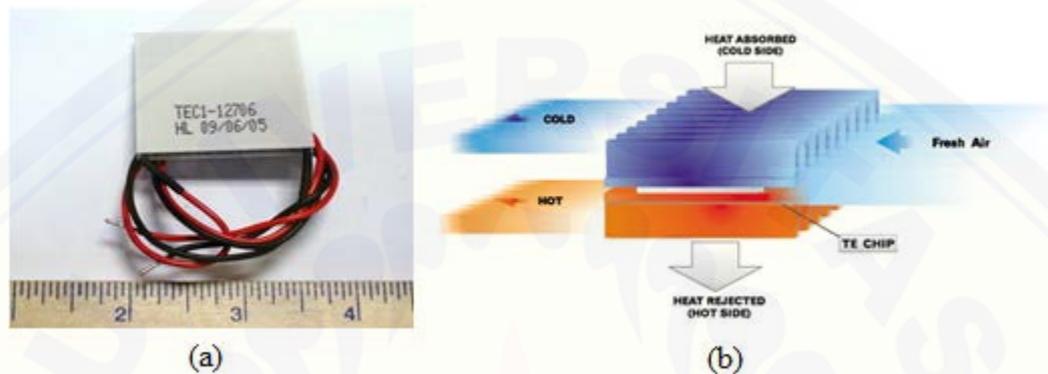
2.1 *Thermoelectric Cooler* (TEC)

Thermoelectric Cooler merupakan *solid state technology* yang bisa menjadi alternatif teknologi pendingin selain sistem kompresi uap (*vapor compression*) yang masih memanfaatkan *refrigerant*. Dibandingkan dengan teknologi kompresi uap yang menggunakan *refrigerant* sebagai media penyerap kalor, teknologi *thermoelectric cooler* relatif lebih ramah lingkungan, tahan lama dan bisa digunakan dalam skala besar dan kecil. Teknologi termoelektrik telah digunakan pada beberapa bidang aplikasi seperti, peralatan militer, peralatan ruang angkasa, produk-produk industri yang memanfaatkan modul termoelektrik sebagai pendingin. Gambar 2.1 menunjukkan beberapa tipe dari pendingin termoelektrik (TEC):



Gambar 2.1 Jenis-jenis TEC

Pendingin termoelektrik (*thermoelectric cooler*) ini adalah komponen elektronika yang menggunakan efek Peltier (1934) untuk membuat aliran panas (*heat flux*) pada percabangan (*junction*) antara dua jenis material yang berbeda dengan mengalirkan arus listrik pada dua buah material itu yang direkatkan dalam sebuah rangkaian. Pada gambar 2.2 merupakan gambar wujud dari pendingin termolelektrik dan prinsip kerjanya:

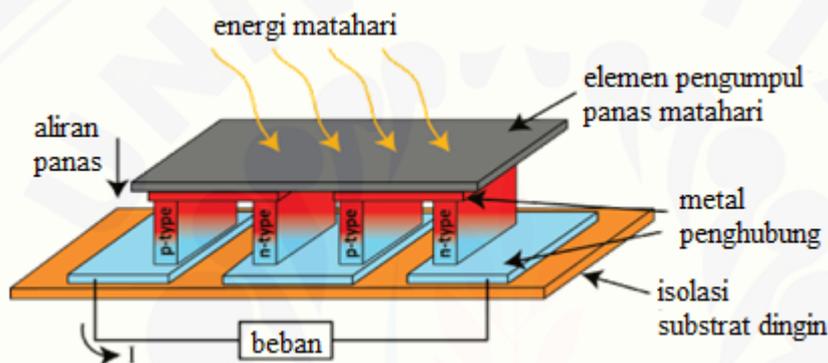


Gambar 2.2 (a) Pendingin Termoelektrik Tipe TEC1-12706, (b) Prinsip Kerjanya. Dalam kerjanya, arus listrik searah (DC) mengalir dalam pendingin termoelektrik yang menyebabkan kalor berpindah dari satu sisi pendingin termoelektrik ke sisi lainnya, sehingga terbentuk sisi dingin dan sisi panas. Gambar diatas menunjukkan aliran elektron dari semikonduktor tipe P yang memiliki tingkat energi lebih rendah, menyerap kalor di bagian yang didinginkan lalu elektron mengalir menuju semikonduktor tipe N melalui konduktor penghubung yang permukaannya (T_c) akan mengalami penurunan temperatur.

Kalor yang diserap akan berpindah melalui semikonduktor bersamaan dengan pergerakan elektron ke sisi panas modul (T_h). Pada kondisi ideal, jumlah kalor yang diserap pada sisi dingin dan dilepas pada sisi panas bergantung pada koefisien Peltier dan arus listrik yang digunakan. Pada saat dioperasikan jumlah kalor yang diserap pada sisi dingin akan berkurang dikarenakan dua faktor, yaitu kalor yang terbentuk pada material semikonduktor dikarenakan perbedaan temperatur antara sisi dingin & sisi panas modul (*conducted heat*) serta *Joule Heat* yang nilainya akan sama dengan kuadrat dari arus listrik yang digunakan. Sehingga pada kondisi apapun kesetimbangan termal yang terjadi karena efek

Peltier pada sisi dingin akan sama dengan jumlah kalor yang terbentuk pada semikonduktor dijumlahkan dengan $1 \frac{1}{2}$ *Joule heat*.

Penemuan penting pertama yang berkaitan dengan termoelektrisitas terjadi pada tahun 1821, ketika seorang fisikawan Jerman bernama Thomas Johan Seebeck menemukan fenomena jika dua material logam yang berbeda dihubungkan dalam suatu rangkaian tertutup dan kedua sambungan (*junction*) dipertahankan pada suhu yang berbeda maka arus listrik akan mengalir dalam rangkaian tersebut. Gambaran visual fenomena seebeck ditunjukkan pada gambar 2.3:



Gambar 2.3 Prinsip Kerja *Thermoelectric Generator* (TEG)

Gambar diatas menunjukkan bahwa TEC dapat juga dialih fungsikan sebagai pembangkit listrik tenaga panas / *thermoelectric generator* (TEG), dengan syarat adanya perbedaan suhu yang signifikan di antara kedua sisinya. Aplikasi termoelektrik sebagai pembangkit daya dibagi menjadi 2 bagian yaitu, sebagai pembangkit daya rendah dan pembangkit daya tinggi. Aplikasi pembangkit daya rendah meliputi pemanfaatan panas tubuh manusia untuk menjalankan jam tangan, sedangkan pembangkit daya tinggi pada termoelektrik memanfaatkan panas dari sisa panas gas buang yang dihasilkan dari industri maupun pemanfaatan sisa panas dari pembakaran bahan bakar. (Sukur, Edi, 2004)

2.2 Energi dan Daya

Ketika muatan melewati elemen rangkaian maka medan listrik bekerja pada muatan tersebut. Total usaha yang bekerja pada muatan (q) yang melewati rangkaian elemen sebanding dengan produk (q) dan beda

potensial (V). Jika arus adalah I dan selang waktu (dt), maka jumlah muatan yang mengalir adalah $dQ = I dt$. Usaha yang bekerja pada muatan ini adalah (Young, W.D dan Freedman, R.A, 1996):

$$dW = VdQ = VI dt \quad \dots\dots\dots(\text{Persamaan 2.1})$$

Usaha ini menunjukkan energi listrik yang ditransfer ke dalam elemen rangkaian. Transfer energi tiap satuan waktu disebut daya yang ditunjukkan dengan P. Pembagian persamaan 2.1 di atas dengan dt akan didapat kecepatan pengiriman energi pada rangkaian tersebut yaitu:

$$\frac{dw}{dt} = P = V.I \quad \dots\dots\dots(\text{Persamaan 2.2})$$

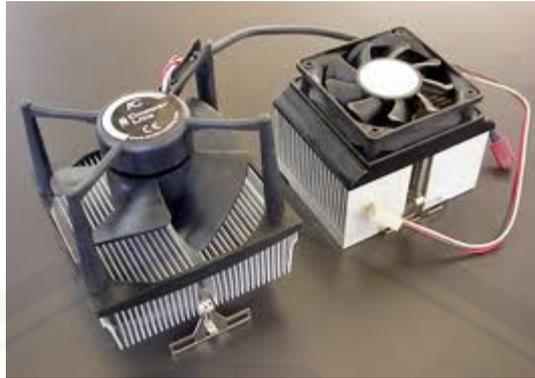
satuan untuk V adalah volt atau joule per coulomb dan satuan I adalah ampere atau coulomb per sekon, dengan demikian satuan P adalah J/s (watt).

2.3 Sistem Pendingin

Pada sebuah perangkat elektronik yang kompleks teknologi pendinginan terus berevolusi selama tugas pendampingannya terhadap prosesor. Tetapi memang tidak sepesat perkembangan teknologi prosesor itu sendiri. Ini karena untuk kondisi normal, penggunaan teknologi pendinginan standar sudah cukup untuk mendinginkan prosesor. Di era saat ini, jenis sistem pendingin yang sering diaplikasi pada perangkat elektronik ada beberapa macam yaitu:

1. Pendingin Udara

Pendingin udara atau biasa disebut *stock cooling* adalah sebuah pendingin yang umumnya menjadi bawaan saat sebuah perangkat elektronik masih dalam kondisi standar, misal pada PC. Jenis pendingin ini merupakan sistem pendingin yang paling tua di dunia PC dan masih digunakan hingga saat ini. Sistem ini mendominasi sistem pendinginan pada PC karena kesederhanaannya dan harganya yang murah. Walau sistem ini juga memiliki beberapa kekurangan, salah satunya yaitu menghasilkan suara bising. Pada gambar 2.4 adalah contoh sebuah sistem pendingin udara beserta dengan komponennya:



Gambar 2.4 Sistem Pendingin Udara

Sistem pendingin udara terdiri dari 2 buah komponen, yaitu *heatsink* dan kipas (*fan*). *Heatsink* berguna untuk menyerap panas pada prosesor. Bilah-bilahnya berguna untuk menyalurkan panas prosesor ke udara sekitar. Dan kipas berguna untuk menguraikan panas *heatsink* ke udara sekitar dengan lebih cepat. Fungsi desain *heatsink* yang berbilah-bilah ini bertujuan untuk lebih memudahkan penyaluran udara panas yang diserapnya ke udara sekitar. (Dewo, E. Setio, 2003)

2. Pendingin Air (*Water Cooling*)

Sistem ini menggunakan air untuk menyerap panas di *heatsink*. Prinsip kerjanya mirip dengan sistem radiator pada mobil. Pada prosesor dipasang blok air yang berisi banyak bilah tembaga atau aluminium yang bekerja seperti *heatsink*, yaitu menyerap panas prosesor. Tetapi bilah-bilah ini diletakkan dalam blok yang berisi air. Pada blok ini terdapat dua buah saluran, satu untuk jalur masuk air dan yang lain untuk keluar air. Panas pada bilah-bilah *heatsink* ini diserap oleh air yang kemudian dibuang keluar blok air menuju *reservoir* atau penampung air melewati selang air. Air ini kemudian didinginkan dengan kipas pendingin yang terdapat pada *reservoir*. Gambar 2.5 dapat membantu menjelaskan mengenai proses kerja pendingin tipe ini, yang merupakan contoh sistem pendingin air beserta dengan komponen kelengkapannya:



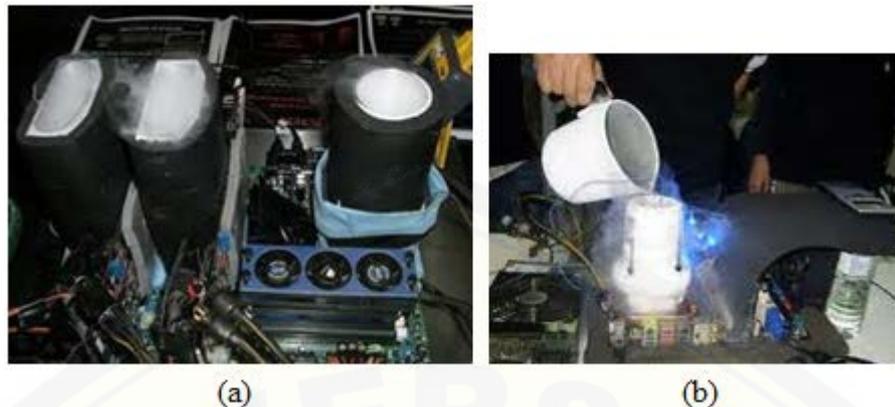
Gambar 2.5 Sistem Pendingin Air

Air dalam *reservoir* yang telah dingin kemudian dipompa oleh pompa air elektrik menuju keluar *reservoir* melewati selang air kemudian masuk ke blok air untuk menggantikan air yang telah bersirkulasi mendinginkan *heatsink*. Jadi air ini bersirkulasi mendinginkan *heatsink*, kemudian kembali keluar menuju *reservoir* yang kemudian air panas ini akan didinginkan oleh kipas.

Sistem pendinginan air dalam PC membawa beberapa kelebihan yaitu, komponen terintegrasi seperti CPU atau *graphics card* akan menjadi 10% lebih dingin sehingga umurnya akan lebih panjang (blog.komputerbutut.com), produksi panas lebih rendah, beban sistem dan kebutuhan ventilasi berkurang, sistem PC lebih senyap atau nyaris tanpa bunyi karena jarak antara blok air dengan *reservoir* bisa fleksibel dengan jarak sampai sejauh 3 meter, ini berarti tidak ada motor kipas dalam PC. (Dewo, E. Setio, 2003)

3. Pendingin *Dry Ice* dan Nitrogen Cair

Prinsip pendinginan tipe ini sangat simpel. Prosesor maupun komponen perangkat elektronik lain yang akan didinginkan ditempelkan langsung dengan dasar tabung tembaga (bonk) yang nantinya bonk tersebut akan diisi dengan *dry ice* atau Nitrogen Cair. (Dewo, E. Setio, 2003) Gambar 2.6 merupakan contoh penerapan pendingin tipe ini pada komponen prosesor sebuah *personal computer* (PC) serta proses pengisian nitrogen cair pada bonk:



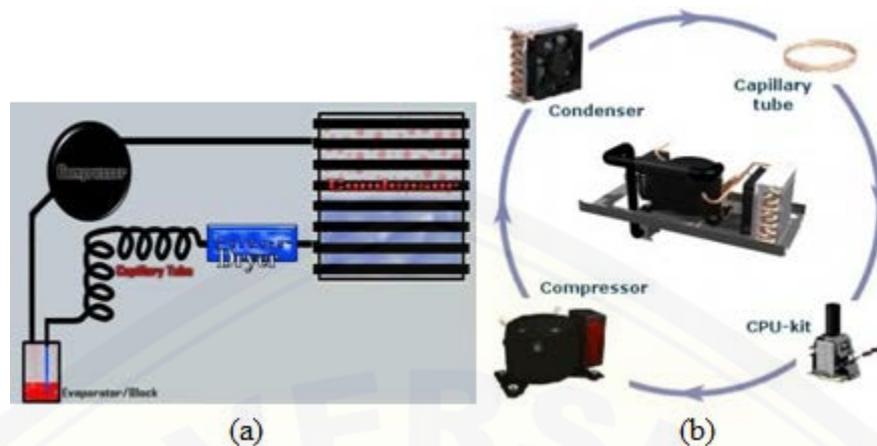
Gambar 2.6 (a) Sistem Pendingin *Dry Ice*, (b) Nitrogen Cair

Pendinginan tipe ini umumnya digunakan untuk pendinginan ekstrim, dimana untuk meng-*overclock* prosesor, lebih lanjut diperlukan suhu minus yang ekstrim. Suhu pendingin *dry ice* bisa mencapai $-78^{\circ}\text{C}/-109^{\circ}\text{F}$ sedangkan nitrogen cair lebih ekstrim, bisa mencapai -190°C (www.instructables.com).

4. Pendingin Pengubah Fasa (*Phase-change cooler*)

Pendinginan tipe ini serupa dengan pendinginan yang digunakan pada kulkas dimana pendinginan akan didorong dengan kompresor. Proses pendinginan dalam kulkas hampir sama dengan proses pendinginan AC. Dengan adanya aliran listrik maka motor kompresor akan bekerja mengisap refrigeran yang bersuhu dan bertekanan rendah dari saluran hisap.

Kompresor kemudian memampatkan refrigeran sehingga menjadi bertekanan tinggi dan bersuhu tinggi, gas tersebut ditekan keluar oleh kompresor memasuki kondensor yang dingin. Refrigeran yang panas dan bertekanan tinggi tersebut di dalam kondensor akan didinginkan oleh udara di luar (panasnya berpindah dari kondensor ke udara sekelilingnya), sehingga suhunya turun (menjadi dingin). Refrigeran cair yang dingin kemudian memasuki pipa kapiler yang berdiameter kecil dan panjang sehingga tekanannya turun drastis. (Dewo, E. Setio, 2003) Gambar 2.7 dibawah ini menunjukkan sistem pendingin pengubah fasa beserta alur kerjanya:



Gambar 2.7 (a) Sistem Pendingin Pengubah Fasa, (b) Alur Kerjanya

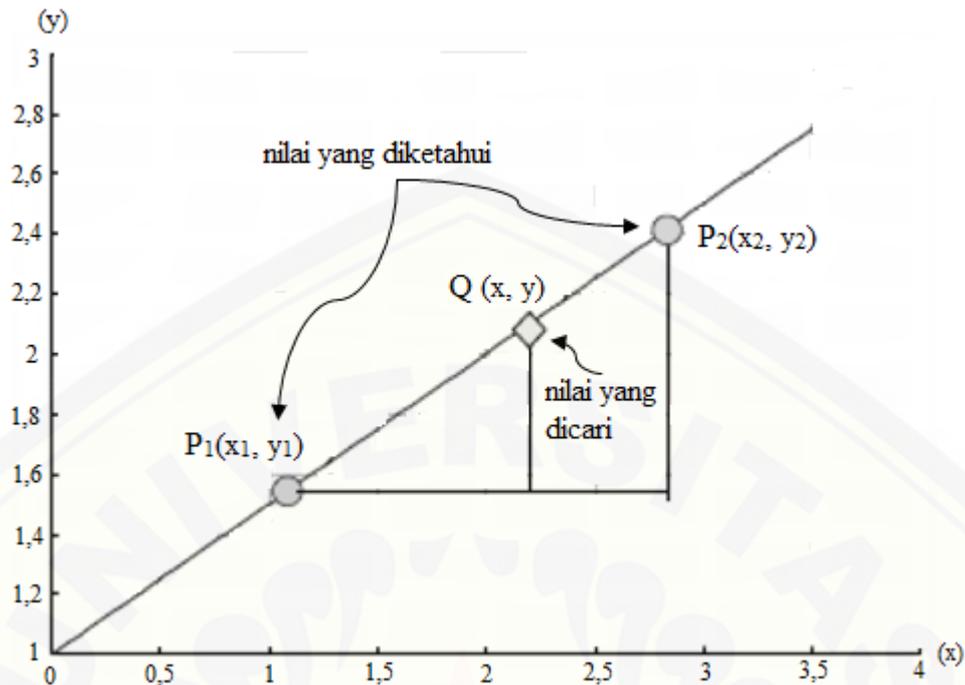
Dari pipa kapiler, refrigeran tersebut kemudian menuju evaporator. Evaporator berfungsi menyerap panas dari benda yang dimasukkan kedalam kulkas. Kemudian evaporator menguapkan bahan pendingin untuk melawan panas dan mendinginkannya. Sesuai fungsinya evaporator adalah alat penguap bahan pendingin agar efektif dalam menyerap panas, evaporator di buat dari bahan logam antikarat,yaitu tembaga danaluminium (zkipedia.blogspot.com). Di dalam kompresor, refrigeran dari evaporator yang berbentuk gas akan dimampatkan dan dipompakan lagi ke kondensor, begitu seterusnya proses ini berulang-ulang.

2.4 Interpolasi

Interpolasi merupakan suatu pendekatan numerik yang perlu dilakukan, bila kita memerlukan nilai suatu fungsi $y = y(x)$ yang tidak diketahui perumusannya secara tepat pada nilai argumen x tertentu, bila nilainya pada argumen lain di sekitar argumen yang diinginkan diketahui. Ada berbagai cara interpolasi yang dapat disusun, yang tergantung pada anggapan kita tentang fungsi yang menghubungkan $y = f(x)$, yang nilai y -nya diketahui. (Fairuzabadi, Muhammad, 2013) Ada beberapa jenis interpolasi yaitu:

- Interpolasi Linier

Merupakan cara untuk menentukan nilai pada titik-titik yang terdapat diantara 2 buah titik dengan menggunakan pendekatan fungsi garis lurus. Gambar 2.8 merupakan bentuk grafik dari pendekatan interpolasi jenis ini:



Gambar 2.8 Grafik Data Interpolasi Linier

Pada persamaan garis lurus yang melalui 2 titik $P_1(x_1, y_1)$ dan $P_2(x_2, y_2)$, maka dapat dirumuskan persamaan berikut,

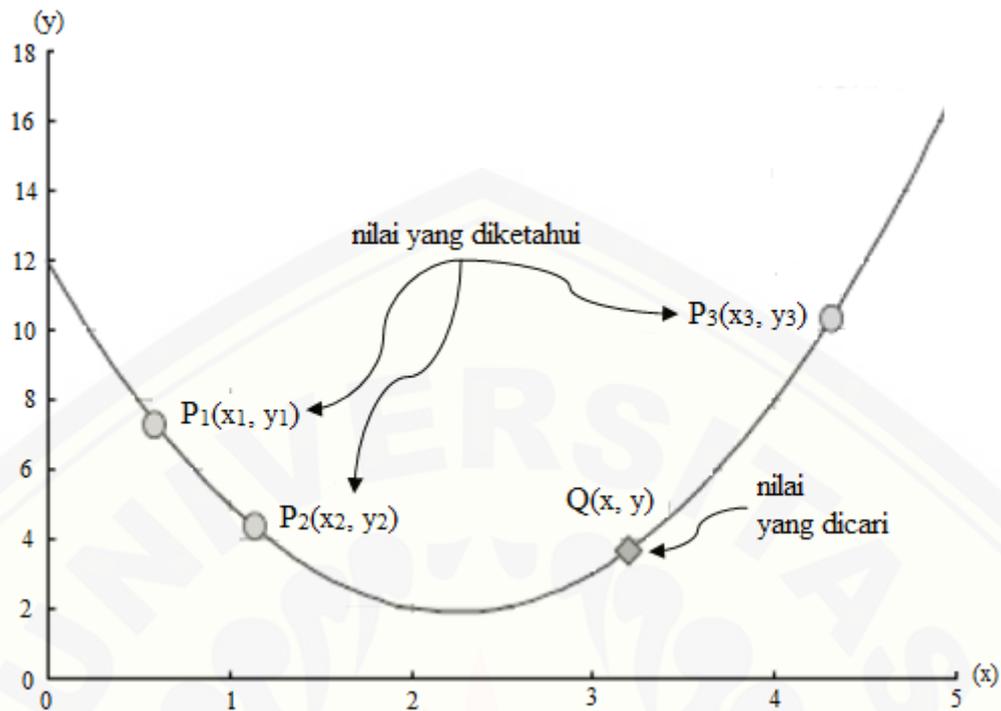
$$\frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{x-x_1}{x_2-x_1} \quad \dots\dots\dots(\text{Persamaan 2.3})$$

sehingga berdasarkan persamaan diatas, dapat diperoleh persamaan untuk mengerjakan interpolasi linier yaitu:

$$y = \frac{y_2-y_1}{x_2-x_1}(x - x_1) + y_1 \quad \dots\dots\dots(\text{Persamaan 2.4})$$

- Interpolasi Kuadratik

Merupakan cara untuk menemukan nilai pada titik-titik antara 3 buah titik dengan menggunakan pendekatan fungsi kuadrat 3 titik yang diketahui, $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$ dan $P_3(x_3, y_3)$. Gambar 2.9 menunjukkan grafik dari pendekatan fungsi jenis ini:



Gambar 2.9 Grafik Data Interpolasi Kuadratik

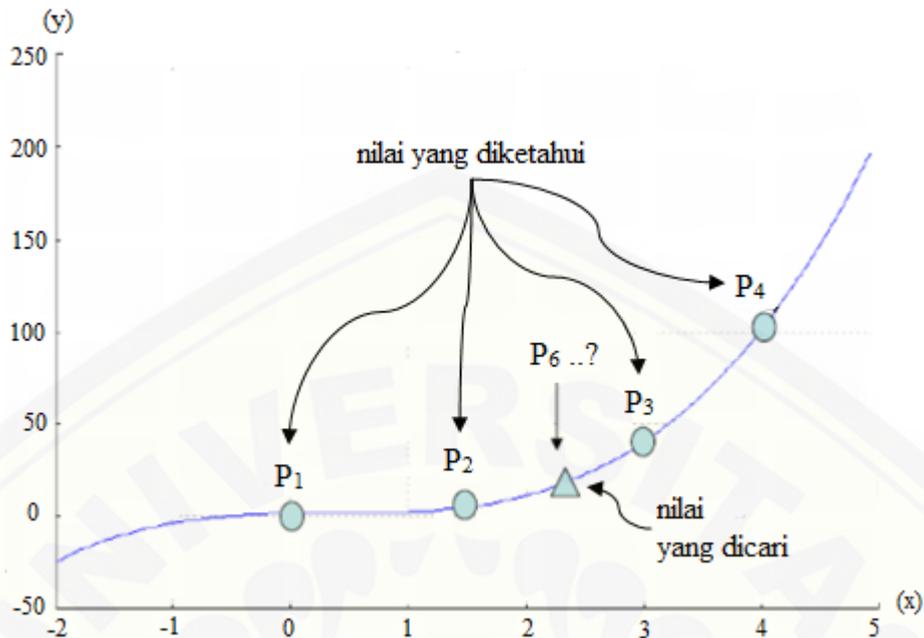
Untuk memperoleh titik $Q(x, y)$ digunakan interpolasi kuadratik:

$$y = y_1 \frac{(x - x_2)(x - x_3)}{(x_1 - x_2)(x_1 - x_3)} + y_2 \frac{(x - x_1)(x - x_3)}{(x_2 - x_1)(x_2 - x_3)} + y_3 \frac{(x - x_1)(x - x_2)}{(x_3 - x_1)(x_3 - x_2)}$$

.....(Persamaan 2.5)

- Interpolasi Polinomial

Digunakan untuk menentukan nilai titik-titik antara N buah titik dengan menggunakan pendekatan fungsi polinomial pangkat $N-1$. Titik-titik yang diketahui: $P_1(x_1, y_1)$, $P_2(x_2, y_2)$, $P_3(x_3, y_3)$... $P_N(x_N, y_N)$. Penggunaan pendekatan fungsi jenis ini memiliki bentuk grafik seperti ditunjukkan pada gambar 2.10:



Gambar 2.10 Grafik Data Interpolasi Polinomial

Persamaan polinomial pangkat N-1 Masukkan nilai dari setiap titik ke dalam persamaan polinomial di atas,

$$y = a_0 + a_1x + a_2x^2 + \dots + a_{n-1}x^{n-1} \dots\dots\dots(\text{Persamaan 2.6})$$

Sehingga didapatkan persamaan simultan dengan n persamaan dan n variabel bebas dibawah ini,

$$y_1 = a_0 + a_1x_1 + a_2x_1^2 + a_3x_1^3 + \dots + a_{n-1}x_1^{n-1}(\text{Persamaan 2.7})$$

$$y_2 = a_0 + a_1x_2 + a_2x_2^2 + a_3x_2^3 + \dots + a_{n-1}x_2^{n-1}(\text{Persamaan 2.8})$$

$$y_3 = a_0 + a_1x_3 + a_2x_3^2 + a_3x_3^3 + \dots + a_{n-1}x_3^{n-1}(\text{Persamaan 2.9})$$

.....

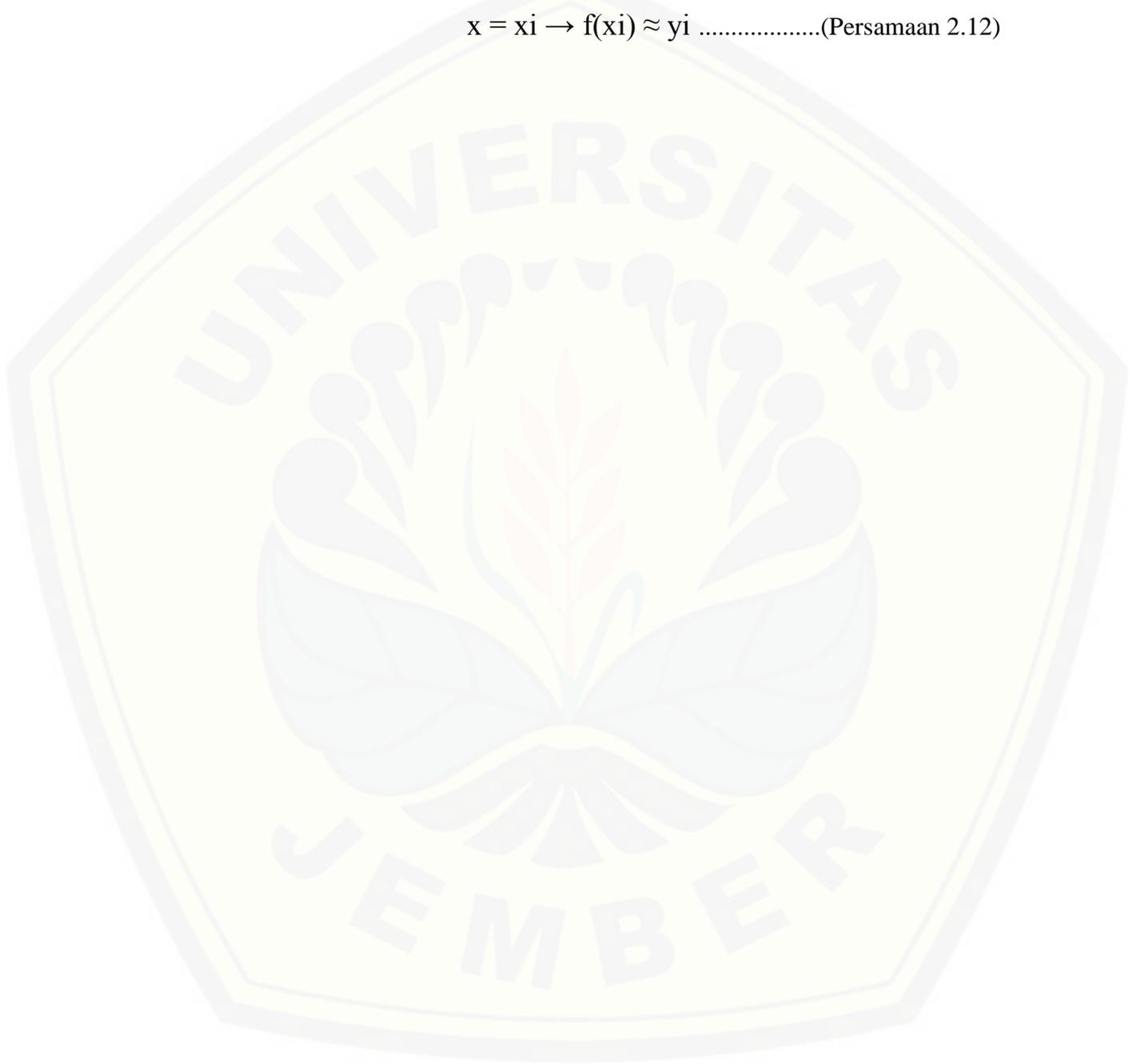
$$y_n = a_0 + a_1x_n + a_2x_n^2 + a_3x_n^3 + \dots + a_{n-1}x_n^{n-1}(\text{Persamaan 2.10})$$

Aproksimasi dikenal juga sebagai interpolasi, yang merupakan salah satu usaha untuk menyajikan data berbentuk grafis menjadi kalimat matematis. Secara umum aproksimasi harus mendapatkan suatu fungsi yang melewati semua titik yang diketahui. Karena harus melewati semua titik yang ada, maka ada banyak fungsi yang memenuhi, kecuali jika fungsi tersebut mempunyai syarat tertentu.

$$x = x_i \rightarrow f(x_i) = y_i \dots\dots\dots(\text{Persamaan 2.11})$$

Sedangkan secara khusus interpolasi atau aproksimasi tidak mensyaratkan melewati semua titik. Walaupun demikian solusi yang didapat haruslah merupakan hasil terbaik yang mendekati semua titik yang diketahui. Aproksimasi secara khusus lebih dikenal dengan istilah regresi.

$$x = x_i \rightarrow f(x_i) \approx y_i \dots\dots\dots(\text{Persamaan 2.12})$$



BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Dalam penelitian yang akan dilakukan terdapat serangkaian tahap yang harus dilewati, demi mencapai tujuan penelitian yang diharapkan. Diantara tahap-tahap dalam penelitian ini secara garis besarnya meliputi:

1. Tahap studi literatur

Tahap ini membantu dalam mendapatkan referensi penelitian dengan topik pembahasan yang sama, sebagai acuan untuk penelitian yang hendak dilakukan. Serta digunakan sebagai tolak ukur validitas hasil penelitian yang diperoleh nantinya.

2. Tahap survei kondisi lokasi penelitian

Survei memiliki peran dalam penentuan wilayah cakupan penelitian serta batasan hal-hal yang masuk dalam penelitian. Hasil survei juga dapat menjadi bekal untuk menyiapkan antisipasi kebutuhan penelitian bilamana dimungkinkan terjadi gangguan (*error*) saat dilakukan pengambilan data di lokasi penelitian.

3. Tahap desain & perencanaan komponen purwarupa pembangkit listrik tenaga air panas yang berbasis *Thermoelectric Cooler* (TEC)

Pada tahap desain dan perencanaan purwarupa ini ditujukan sebagai alat bantu pengambilan data potensi yang disesuaikan dengan kondisi di lokasi penelitian. Sebab dengan menggunakan komponen termoelektrik sebenarnya di lokasi penelitian diharapkan data yang diperoleh lebih akurat sesuai kondisi di lokasi.

4. Tahap pembuatan / rancang bangun purwarupa TEG sesuai desain

Berdasarkan desain dan perencanaan yang telah dibuat, maka dalam proses rancang bangun lebih mudah karena sudah memiliki desain dengan ukuran yang jelas sesuai dengan kebutuhan di lokasi penelitian. Sehingga alat bantu ini dapat memudahkan dalam proses pengambilan data potensi.

5. Pengujian perangkat purwarupa pembangkit listrik dalam menghasilkan keluaran

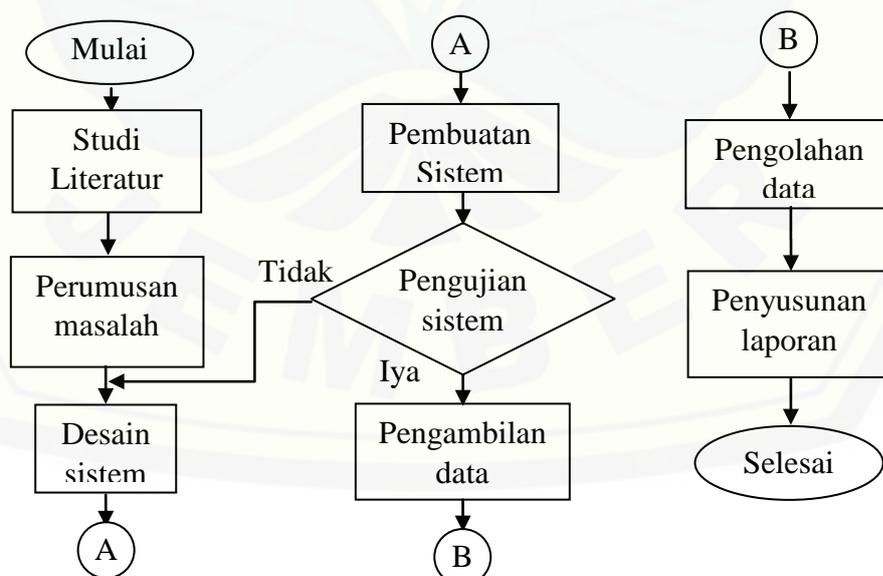
Sebelum dilakukan pengambilan data potensi di lokasi penelitian yakni sumber air panas di Blawan Bondowoso, maka mutlak perlu dilakukan pengujian. Hal ini sebagai bentuk antisipasi dan memastikan alat bantu pengambilan data potensi bekerja dengan benar, sehingga diharapkan data yang diperoleh akurat sesuai yang dikehendaki.

6. Tahap pengambilan data di lokasi penelitian dan analisa potensi

Setelah tahap-tahap bagian sebelumnya dilakukan dan tidak terdapat kendala yang mengganggu kerja alat bantu pengambilan data, maka berikutnya dapat dilakukan pengambilan data potensi di lokasi penelitian sesuai dengan waktu yang telah direncanakan. Data potensi yang telah diambil kemudian diolah dalam aplikasi Ms. Excel, dan selanjutnya dilakukan analisa mengenai kinerja, karakteristik, serta tren potensi energi yang mampu dihasilkan.

3.2 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian ini terdapat langkah yang harus dilewati untuk mencapai tujuan yang diharapkan. Diantara langkah tersebut dijelaskan melalui diagram alir pada gambar 3.1:



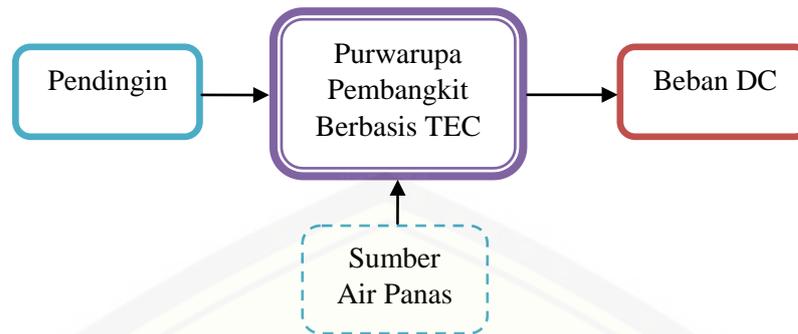
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Seperti dijelaskan pada diagram alir diatas, penelitian diawali dengan melakukan studi literatur terhadap penelitian dengan topik maupun objek bahasan yang sama. Setelah didapat daftar literatur yang menjadi tolak ukur pada penelitian ini, maka dirumuskan masalah yang menjadi fokus penelitian. Untuk menyelesaikan masalah yang telah dirumuskan, digunakan metode tertentu dalam menjawabnya. Dalam penelitian ini diperlukan alat bantu pengambilan data berupa purwarupa TEG (*thermoelectric generator*) agar dapat mengambil data potensi di sumber air panas Blawan. Sehingga perlu dibuat desain sistem dari purwarupa TEG yang memudahkan dalam pengambilan data potensi, sebab parameter data yang diambil tidak sedikit.

Ketika desain sistem telah direncanakan, maka dilakukan pembuatan atau rancang bangun dari desain tersebut. Untuk selanjutnya diadakan pengujian terhadap purwarupa TEG dalam skala laboratorium, apakah dapat beroperasi dengan benar atau tidak untuk pengambilan data. Bila tidak beroperasi dengan benar, maka dilakukan desain sistem ulang atau perbaikan desain menyesuaikan kondisi di lokasi penelitian. Dan bila purwarupa TEG telah beroperasi dengan benar, berarti siap dilakukan pengambilan data potensi di sumber air panas Blawan. Setelah data potensi energi listrik yang dihasilkan diperoleh, maka data tersebut diolah agar dapat disajikan dalam bentuk lain untuk mewakili pembangkit listrik alternatif dalam skala lebih besar. Sebab alat bantu pengambilan data (purwarupa TEG) yang dibuat skalanya kecil, sehingga kurang kompatibel bila data potensi yang diperoleh dijadikan tolak ukur secara langsung mengenai seberapa berpotensi pembangkit alternatif ini bila diterapkan. Data yang telah diolah kemudian disusun dalam sebuah laporan penelitian agar dapat menjadi acuan bila kedepannya ada yang melakukan penelitian

3.3 Blok Diagram Sistem

Secara garis besar, alur pemanfaatan energi terbarukan berupa sumber air panas untuk membangkitkan energi listrik adalah seperti ditunjukkan gambar 3.2:



Gambar 3.2 Blok Diagram Sistem Purwarupa Pembangkit Listrik Tenaga Air Panas atau TEG

Sumber air panas dipaparkan pada blok sisi panas TEC (*thermoelectric cooler*) dengan perantara sebidang plat stainless sebagai penghantar panas. Panas yang timbul pada blok sisi panas TEC menimbulkan pergerakan elektron pada *junction* didalam TEC, sehingga menghasilkan aliran arus listrik. Adanya pendingin yang menempel pada permukaan blok sisi dingin TEC berguna untuk menjaga perbedaan suhu antara kedua sisi TEC, sehingga energi listrik yang dihasilkan dapat stabil. Pada penelitian ini, energi listrik yang dihasilkan langsung disalurkan ke beban DC, yang berupa kipas DC dengan spesifikasi tegangan 12V dan 0,11A.

3.4 Alat Bantu Pengambilan Data (Purwarupa TEG)

Penelitian mengenai pembangkit listrik berbasis TEC ini dalam proses desain dan pembuatan sistem pembangkitnya, didasarkan pada hasil studi literatur serta disesuaikan dengan hasil survei lokasi penelitian. Sehingga dapat dibuat purwarupa alat konversi energi alternatif yakni TEG (*Thermoelectric Generator*) sebagai alat bantu untuk pengambilan data potensi energi terbarukan yang berupa sumber air panas di Blawan.

3.4.1 Desain Alat Bantu Pengambilan Data

Dari hasil pengamatan atau survei di lokasi penelitian, yang diketahui bahwasannya sumber air panas yang memancar, sebagiannya dialirkan ke pemandian umum dan sebagian lain dialirkan pada bak persegi panjang berukuran 2,2x1 meter dengan kedalaman 0,6 meter yang berada di tempat terbuka. Kondisi tersebut seperti dijelaskan pada gambar 3.3:



Gambar 3.3 (a) Kondisi Lingkungan Sumber Air Panas, (b) Bak Penampung Sumber air panas di Blawan memiliki temperatur pada kisaran 45-49,5 °C. Air panas yang terus memancar dari sumbernya ini mengakibatkan isi bak air penuh, sehingga terdapat aliran air panas yang terbuang dari bak dengan debit tertentu yang stabil. Gambar 3.4 menunjukkan desain purwarupa TEG yang dibuat sebagai alat bantu mengambil data potensi:



Gambar 3.4 Desain Purwarupa TEG sebagai Alat Bantu Pengambilan Data dengan Sistem Pendingin Air (*water cooling*)

Pada desain purwarupa yang telah dibuat diatas, digunakan plat *stainless* 2mm sebagai penghantar panas ke blok sisi panas TEC. Bagian penghantar panas ini langsung di apungkan pada bak sumber air panas. Sehingga diharapkan panas dari sumber air panas dapat terserap maksimal oleh blok sisi panas TEC. TEC yang digunakan dalam penelitian ini berjumlah 9 buah berukuran 4x4cm, yang dihubung seri demi mencapai tegangan dalam kisaran 12 - 13V dengan bantuan konverter DC. Sejumlah TEC tersebut disusun pada permukaan plat *stainless* seperti ditunjukkan gambar 3.5:



Gambar 3.5 Susunan TEC

Pemanasan yang cepat pada TEC ini akan diimbangi dengan proses pendinginan yang memakai sistem *water cooling* tanpa sirkulasi, yakni terdapat kotak persegi panjang berupa *heatsink* yang berisi air pendingin pada bidang atas, difungsikan untuk meredam panas yang terserap oleh blok sisi dingin TEC.

3.4.2 Data Sheet Modul TEG Bismuth Telluride

Modul termoelektrik ini didesain dan diproduksi dengan teknologi yang unik untuk mengkonversi energi panas menjadi listrik. Modul termoelektrik yang berbahan Bi_2Te_3 dapat bekerja pada suhu setinggi $260\text{ }^\circ\text{C}$ secara terus-menerus dan sesekali sampai $380\text{ }^\circ\text{C}$ tanpa mengurangi mutu modul. Energi yang dibangkitkan berupa listrik DC sepanjang terdapat perbedaan suhu pada kedua sisinya. Listrik yang dibangkitkan akan semakin besar ketika perbedaan suhu kedua sisi modul termoelektrik meningkat, serta efisiensi konversi energinya juga semakin meningkat. Penjelasan *data sheet* modul TEG Bi_2Te_3 (TEC1-12706) lebih jelas ditunjukkan pada tabel 3.1 berikut:

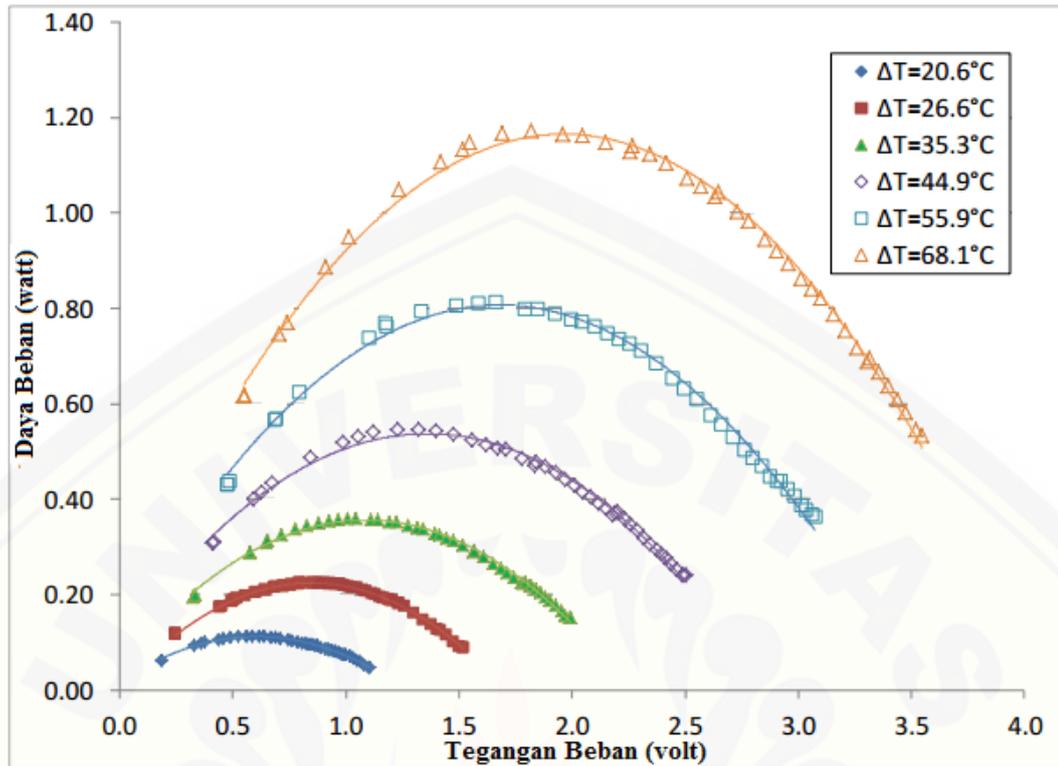
Tabel 3.1 *Data Sheet* Modul TEG yang digunakan (TEC1-12706)

Tipe Modul	TEC1-12706
Dimensi	4cm x 4cm x 0,35cm
Bahan Termoelektrik	Bi_2Te_3 (<i>Bismuth telluride</i>)
Jumlah Termokopel	127
Konstruksi Solder	$138\text{ }^\circ\text{C}$

Suhu Operasi	Dibawah 200-250 °C
Batas Suhu	300 °C
Selisih Suhu Thot-Tcold (ΔT)	100 °C : Keluaran Daya Maks. 2,5W
	70 °C : Keluaran Daya Maks. 1,5W
Ekspektasi Umur Pemakaian	200.000 jam
Spesifikasi Berdasarkan Suhu Sisi Panas pada 230 °C dan Suhu Sisi Dingin pada 50 °C	<ul style="list-style-type: none"> ○ V_{oc} (<i>Open Circuit</i>): 8,6V ○ Tegangan Keluaran Pasangan Beban: 4,2V ○ Arus Keluaran Pasangan Beban: 1,4A ○ Daya Keluaran Pasangan Beban: 5,9W

(John, Stephen T, International Journal of Computer Applications Volume 97- No.18, 2014)

V_{oc} merupakan tegangan keluaran modul saat tanpa beban. Pasangan keluaran beban adalah keluaran modul saat tahanan beban sama dengan tahanan modul. Tegangan atau arus keluaran akan berubah mengikuti beban. Daya keluaran maksimal menyesuaikan pada beban.(www.termo-gen.se: 2006) Gambar 3.6 dibawah ini menunjukkan karakteristik modul TEG (TEC1-12706) mengenai daya beban terhadap tegangan beban pada beberapa variasi selisih suhu kedua sisi modul (ΔT), yang dihasilkan dari penelitian berjudul "*Power and Efficiency Measurement in a Thermoelectric Generator*" pada tahun 2012 oleh Dr. Steven O'Halloran dan Mr. Matthew Rodrigues dari University of Portland. Efisiensi meningkat seiring dengan peningkatan selisih suhu (ΔT) di kedua sisi modul TEG.



Gambar 3.6 Grafik Daya Beban TEG (TEC1-12706) Terhadap Tegangan Beban pada Beberapa Variasi Selisih Suhu (ΔT)

(Dr. O'Halloran, Steven dan Mr. Rodrigues, Matthew, American Society for Engineering Education, 2012)

3.5 Pembangunan Data Potensi Pembangkit

Untuk membangun data potensi pembangkit listrik listrik berbasis TEC yang memanfaatkan sumber air panas tentu perlu diketahui besar nilai parameter acuannya. Parameter penting dalam pembangkit listrik berbasis TEC yang memanfaatkan efek seebeck yaitu tegangan, arus, daya keluaran dan efisiensi.

Model matematis dari efek seebeck untuk mencari nilai parameter tersebut adalah sebagai berikut:

Tegangan keluaran, $V = \alpha \Delta T$ Persamaan (3.1)

V = tegangan keluaran (volt)

α = koefisien seebeck ($V/^\circ C$)

ΔT = beda temperatur antara sisi panas dan dingin ($T_h - T_c$) ($^\circ C$)

Arus keluaran, $I = \frac{\alpha \Delta T}{2R}$ Persamaan (3.2)

I = arus keluaran (A)

R = tahanan beban (Ohm)

Daya keluaran, $P_o = \frac{(\alpha \Delta T)^2}{4R} = V \cdot I$ Persamaan (3.3)

P_o = daya keluaran (watt)

Efisiensi digambarkan sebagai rasio keluaran daya listrik yakni,

$$\varepsilon = \frac{T_{hot} - T_{cold}}{T_{hot}} \frac{\sqrt{1+ZT} - 1}{\sqrt{1+ZT} + \frac{T_{cold}}{T_{hot}}} \times 100 \quad \text{.....Persamaan (3.4)}$$

ε = efisiensi TEG (%)

T_{hot} = suhu blok sisi panas TEC (°C)

T_{cold} = suhu blok sisi dingin TEC (°C)

ZT = koefisien sosok merit (Bi_2Te_3 (*Bismuth telluride*) $ZT \approx 0,7$)

Perhitungan matematis mengenai efisiensi tersebut berfungsi untuk mengetahui seberapa optimal sebuah pembangkit alternatif TEG, sehingga dapat diketahui tingkat kelayakannya bila diterapkan. Rumus efisiensi diatas juga digunakan pada penelitian di Korea oleh Nyambayar Baatar dan Shiho Kim (2011) mengenai topik yang sama namun dengan objek penelitian yang berbeda.

3.5.1 Pengaruh Suhu Terhadap Keluaran Pembangkit Berbasis TEC

Pada penelitian ini selain dilakukan pengambilan data potensi keluaran arus, tegangan, dan daya yang dihasilkan, juga dilakukan pengkajian pengaruh suhu lingkungan maupun suhu TEC itu sendiri terhadap keluaran energi listrik yang dihasilkan. Hal ini bertujuan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh suhu lingkungan maupun suhu TEC terhadap optimal kerja dari pembangkit listrik berbasis TEC, serta untuk mengetahui dan dapat menganalisa seberapa besar pengaruh perubahan suhu tersebut dapat diabaikan.

3.5.2 Teknik Pengambilan Data

Pengambilan data pada penelitian ini disusun untuk membangun data potensi air panas sebagai pembangkit listrik alternatif dari pagi hingga sore dalam

sebulan. Pengambilan data ini dilakukan pukul 9:00 WIB hingga pukul 15:00 WIB. Data yang diperoleh selanjutnya diplot pada bidang kartesius dengan menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel. Grafik yang diperoleh digunakan untuk melakukan analisa terhadap potensi yang dimiliki sumber air panas Blawan sebagai refleksi nyata jumlah energi listrik yang dihasilkan. Hal ini perlu dilakukan untuk mengetahui seberapa potensi dan optimalnya kerja sistem pembangkit listrik berbasis TEC apabila dibangun.

Pengambilan data potensi air panas di Blawan sebagai pembangkit listrik nantinya tidak utuh selama sebulan, melainkan menggunakan teknik pencuplikan dalam beberapa hari. Maka dibutuhkan interpolasi untuk melengkapi data potensi yang diinginkan. Interpolasi sendiri merupakan sebuah cara menentukan nilai pada tabel data yang tidak tertera secara tertulis dalam tabel yang dimaksudkan. Pada hakekatnya interpolasi itu sendiri merupakan pencarian sebuah titik diantara dua sumbu yakni minimal dan maksimal dalam sebuah data linier, yang umum disebut dengan interpolasi linier.

BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah pada bagian sebelumnya direncanakan mengenai langkah-langkah yang hendak dilakukan untuk mencapai tujuan yang dikehendaki yakni, mengetahui seberapa potensi yang dimiliki sumber air panas di Blawan sebagai salah satu bentuk energi terbarukan yang dapat dimanfaatkan untuk dapat membangkitkan energi listrik. Maka pada bab ini akan dikemukakan analisa hasil selama proses persiapan alat bantu pengambilan data dan saat pengambilan data di lapangan berlangsung, serta akan dijelaskan pembahasan mengenai hasil data potensi yang diperoleh dan faktor-faktor yang mempengaruhinya.

4.1 Pengujian Alat Bantu Pengambilan Data (Purwarupa TEG)

Pada penelitian tentang studi potensi ini, dibutuhkan alat bantu untuk dapat mengukur dan mengetahui besar nilai dari variabel-variabel penting yang digunakan sebagai bahan analisa hasil data potensi yang diperoleh di lokasi penelitian. Alat bantu tersebut berupa sejumlah TEC yang disusun sedemikian rupa menjadi sebuah alat yang kompak dan terhubung dengan panel indikator/pemantau sebagai penunjuk hasil keluaran energi listrik yang dihasilkan dari proses konversi energi panas di lokasi. Dan variabel-variabel penting yang dimaksud diantaranya yaitu:

- tegangan keluaran TEG (V_{TEG}),
- tegangan keluaran konverter (V_{conv}),
- arus keluaran konverter (I_{conv}),
- suhu sisi panas TEC (T_{hot}),
- suhu sisi dingin TEC (T_{cold}),
- suhu sumber air panas ($T_{hot\ water}$),
- suhu air pendingin ($T_{cold\ water}$),
- suhu lingkungan (T_{env}),
- daya keluaran (P_{TEG}).

Sebelum melakukan pengambilan data di lokasi penelitian, terlebih dahulu dilakukan percobaan untuk menguji alat bantu yang hendak digunakan. Percobaan ini difungsikan sebagai penentu penggunaan sistem pendingin pada sisi dingin TEC yang paling kompatibel, tidak menyerap energi listrik yang dihasilkan, serta stabil menjaga suhu sisi dingin TEC agar tidak terpengaruh sisi panasnya. Sehingga konversi energi yang berlangsung dapat menghasilkan energi listrik yang lebih besar. Dalam percobaan ini menggunakan beberapa pendingin diantaranya yaitu *heatsink* saja, *heatsink & kipas DC*, *heatsink& air biasa*. Tabel 4.1 menunjukkan hasil pengujian kemampuan beberapa sistem pendingin yang telah disebutkan:

Tabel 4.1 Hasil Pengujian Beberapa Sistem Pendingin pada Alat Bantu

Jumlah Modul TEC	Tahanan Modul (Ohm)	Sistem Pendingin	V_{TEG} (Volt)	T_{cold} (°C)	T_{hot} (°C)	$T_{hot\ water}$ (°C)	$T_{cold\ water}$ (°C)
9 modul TEC disusun seri	4,25	<i>heatsink</i> saja	6,91	61,2	76,3	79,1	-
		<i>heatsink & kipas DC</i>	7,63	50,3	77,1	79,9	-
		<i>heatsink& air biasa</i>	7,55	50,7	77,8	79,8	51,5

Dari hasil diatas, diketahui karakteristik dari masing-masing sistem pendingin. Ketika menggunakan *heatsink* saja sebagai pendingin, hasil konversi energi yang terjadi pada TEC terpantau cukup besar yakni 6,91 volt. Namun setelah beberapa detik berlalu, suhu panas pada sisi panas TEC merambat ke sisi dingin TEC dalam waktu yang cukup singkat. Meski sebelumnya sempat tercipta perbedaan suhu di kedua sisinya sebesar 15,1°C, tapi kondisi tersebut tidak berlangsung lama. Sehingga akibat terjadinya rambatan panas pada kedua sisi TEC, maka selisih perbedaan suhu di kedua sisinya semakin mengecil. Bahkan hingga +suhu kedua sisinya ada pada tingkat yang sama. Hal ini merupakan efek dari *heatsink* itu sendiri yang bersifat menyerap panas pada komponen yang didinginkan, lalu membuang panasnya melalui sirip-sirip yang terdapat padanya.

Dampak dari kondisi tersebut adalah penurunan besar energi listrik yang dihasilkan, yang mulanya 6,91 volt turun mencapai 0 volt. Penurunan keluaran energi yang dihasilkan ini berjalan seiring dengan penurunan perbedaan suhu pada kedua sisi TEC. Semakin cepat penurunan perbedaan suhu kedua sisinya, maka semakin cepat pula penurunan besar keluaran energi listrik yang dihasilkan.

Setelah pengujian *heatsink* saja sebagai pendingin dirasa kurang stabil menjaga perbedaan suhu di kedua sisi TEC, maka dilakukan pengujian berikutnya yakni menggunakan kombinasi *heatsink* & kipas DC sebagai sistem pendingin. Kipas DC yang dipakai memiliki spesifikasi 12 volt dan arus 0,11 A, berjumlah 2 buah karena menyesuaikan dengan luas bidang *heatsink* yang didinginkan. Sumber listrik yang dipakai untuk menghidupkan kipas DC yaitu dari energi listrik yang dihasilkan TEG. Namun seperti diketahui dari pengujian sebelumnya, TEG hanya mampu menghasilkan tegangan pada kisaran 6-7 volt, sedangkan tegangan kerja kipas DC adalah 12 volt. Untuk dapat melakukan pengujian sistem pendingin ini, maka digunakan konverter penaik tegangan (*boost converter*) dengan spesifikasi 3-30 volt dapat naik hingga 4-35 volt. Besar kenaikan tegangan ini dapat diatur manual sesuai kebutuhan, mengacu pada kebutuhan pengujian maka besar kenaikan tegangan diatur sebesar 12 volt. Pada skala pengujian alat bantu pengambilan data ini, sumber air panas digantikan dengan air panas yang telah dimasak hingga mencapai suhu menyerupai di lokasi penelitian, yakni pada kisaran 50-70 °C seperti pada pengujian sebelumnya.

Ketika pengujian kombinasi *heatsink* & kipas DC sebagai sistem pendingin dilakukan, hasil konversi energi yang dihasilkan terpantau sebesar 7,63 volt. Kondisi keluaran energi tersebut berlangsung stabil dalam beberapa menit, karena begitu energi listrik dihasilkan maka kipas DC langsung aktif mendinginkan *heatsink*. Namun saat pendinginan oleh kipas DC belum mencapai titik stabil, tegangan yang dihasilkan TEG terlebih dahulu menurun. Sehingga tidak seberapa lama kipas DC aktif kemudian non-aktif kembali. Hal ini disebabkan oleh penurunan suhu air panas karena tidak ada faktor yang menjaga suhu panas tersebut stabil, serta terpengaruh oleh suhu lingkungan sekitar. Berdasarkan hasil ini, penggunaan keluaran energi listrik dari TEG secara langsung untuk

menghidupkan kipas DC dapat dikatakan tidak efisien, karena dalam kasus ini hasil dari konversi energi yang dilakukan tidak seberapa besar. Berbeda situasi apabila TEG ini dibuat dalam skala besar seperti pembangkit besar pada umumnya. Dalam skala kecil ini, agar dapat mendinginkan sisi dingin TEC secara optimal dan stabil, terlebih dahulu dibutuhkan sumber listrik dari luar untuk menghidupkan kipas DC sebelum proses konversi energi panas mulai berlangsung. Hal yang demikian tentu saja kurang cocok dengan prinsip energi terbarukan sendiri yakni, menghasilkan energi listrik semaksimal mungkin dengan penggunaan sumber energi dari luar seminimal mungkin.

Mengacu pada hasil pengujian sebelumnya, kemudian dilakukan pengujian terhadap *heatsink* & air biasa sebagai pendingin. Agar dapat mendinginkan secara optimal, maka kombinasi *heatsink* & air biasa diatur sedemikian rupa sehingga air biasa dapat ditempatkan pada *heatsink* yang telah dimodifikasi. Ketika pengujian terhadap pendingin jenis ini, diketahui energi yang dihasilkan alat bantu (TEG) ini sebesar 7,55 volt. Tegangan sebesar itu terjadi hanya saat awal proses konversi energi dimulai, ketika panas pada sisi panas TEC belum merambat ke sisi dingin. Setelah beberapa detik, penurunan tegangan mulai terjadi hingga turun mencapai tingkat tegangan tertentu meski tidak terlalu besar. Lalu besar tegangan yang dihasilkan stabil pada tingkat tersebut. Pada kondisi ini, perbedaan suhu di kedua sisi TEC sebesar 27,1 °C. Tentu saja besar perbedaan suhu ini tidak semakin meningkat, tapi menurun walau tidak banyak hanya sekitar 2,5-3,5 °C. Saat kondisi ini, diamati pula perbedaan suhu dari air panas yang dikonversi dengan air biasa yang sebagai pendingin, terpantau perbedaan suhunya mencapai 28,3 °C.

Kestabilan energi yang dihasilkan oleh alat bantu (TEG) ini tidak berlangsung lama, sampai ketika suhu air panas mulai menurun akibat pengaruh faktor lingkungan serta tidak adanya faktor yang menjaga stabilnya suhu air panas, maka penurunan keluaran energi TEG juga ikut menurun. Saat diamati pada kondisi tersebut, setiap terjadi penurunan suhu air panas sebesar 0,1 °C selalu dibarengi dengan penurunan tegangan keluaran TEG sebesar 0,01 volt. Berdasarkan hasil pengamatan itu, dapat dianalisa bahwasannya semakin tinggi suhu air panas yang hendak dikonversi TEG maka semakin besar pula energi

listrik yang dapat dihasilkan, dengan catatan perbedaan suhu di kedua sisi TEC terjaga. Dan bila suhu air panas semakin rendah maka semakin rendah pula energi listrik yang dapat dihasilkan.

4.2 Hasil Pengambilan *Sample Data* Potensi di Blawan

Setelah alat bantu untuk mengambil data (TEG) di lokasi penelitian selesai diuji coba dalam skala laboratorium, dan tidak terdapat kesalahan ataupun gangguan pada alat tersebut saat dioperasikan maka selanjutnya dapat dilakukan pengambilan data secara langsung di lokasi sumber air panas. Kesalahan ataupun gangguan ini dapat diketahui dengan berlandaskan pada penelitian sebelumnya yang telah tercantum pada jurnal yang digunakan sebagai acuan. Diantara indikasi kesalahan ataupun gangguan yang sempat terjadi ketika uji coba alat bantu pengambilan data (TEG) yaitu, energi listrik yang dihasilkan berada pada tingkat terlalu rendah dibandingkan hasil dari penelitian sebelumnya, alat ukur sebagai pemantau keluaran energi TEG belum berjalan sempurna (akurasi yang kurang), serta beberapa kesalahan pada proses manufaktur yang membutuhkan penyempurnaan dan penyesuaian dengan kondisi lingkungan di lokasi sumber air panas demi mendapatkan hasil optimal.

Pada tahap perencanaan, pengambilan data dilakukan selama sepekan (7 hari) dari pukul 09:00 s/d 15:00 WIB. Dengan menggunakan 9 buah TEC (*Thermoelectric Cooler*) berdimensi 4x4cm yang difungsikan sebagai TEG (*Thermoelectric Generator*) dan dirangkai secara seri untuk mendapatkan tingkat tegangan mendekati tegangan dasar DC pada umumnya yakni 12V. Namun selama proses pengerjaan alat bantu pengambilan data, terdapat faktor *human error*. Sehingga pada akhirnya perlu dilakukan pengecekan kembali pada setiap sambungan kabel untuk memastikan rangkaian sudah benar, baik rangkaian kabel pada TEG, beban, maupun pada alat ukur. Dalam perencanaan awal beban yang digunakan berupa beban DC (*direct current*). Beban DC yang digunakan adalah berupa kipas DC 12V 0,11A.

Terdapat beberapa sumber air panas di kawasan Blawan, yang hampir semuanya dimanfaatkan penduduk sebagai kolam pemandian umum air hangat.

Sumber air panas tersebut tidak langsung digunakan, melainkan dicampur dengan air dingin yang ketersediaannya begitu melimpah di kawasan Blawan. Hal itu dilakukan sebab pada beberapa sumber air panas memiliki suhu yang relatif tinggi. Namun hanya ada 2 sumber air panas dengan suhu yang paling tinggi, yakni bersuhu 45,9 °C dan 49,3 °C. Dan pada penelitian ini, pengambilan data potensi dilakukan di sumber air panas yang bersuhu paling tinggi yakni 49,3 °C, agar lebih optimal hasil yang didapat. Serta dengan alasan pendukungnya adalah pemandian umum pada sumber air panas ini termasuk paling tidak ramai dikunjungi, karena model pemandiannya berupa 2 bilik kamar mandi, bukan berupa kolam seperti yang lain.

Proses pengambilan data potensi dilakukan pertama kali pada jumat 21 agustus 2015. Seperti perencanaan semula, pengambilan data akan dilakukan selama sepekan (7 hari) dari pukul 09:00 s/d 15:00 WIB. Namun setelah pengambilan data potensi berjalan 3 hari, pada saat dilakukan pengujian pada alat bantu terdapat kendala yaitu TEG tidak menghasilkan energi listrik seperti sebelumnya. Setelah dilakukan pengecekan pada setiap bagian, didapati rusaknya 6 buah TEC dan hanya 3 buah TEC yang dapat bekerja normal.

Kerusakan 6 buah TEC yang terjadi bukan pada fisik luarnya (kabel pada kedua ujungnya ataupun keramik sisi luarnya), melainkan diperkirakan rusak pada sisi *junction*-nya. Padahal fungsi *junction* pada TEC ini sangat berperan penting dalam mengkonversi panas menjadi listrik, sehingga fungsi semula dari TEC dapat berubah menjadi TEG. Asumsi demikian berlandaskan pada hasil pengecekan dengan AVO meter, ketika dicek tahanan pada kedua ujung kabelnya tidak muncul besar nilai tahanannya. Berbeda dengan TEC yang masih normal, ketika diukur besar tahanan di kedua ujung kabelnya, AVO meter dapat menampilkan besar nilainya. Meski tahu jumlah TEC yang rusak demikian, namun belum diketahui penyebab rusaknya *junction* didalam TEC tersebut.

Oleh karenanya, pada penelitian ini hanya dilakukan pengambilan data potensi selama 3 hari sesuai waktu yang telah ditentukan. Meskipun belum dapat mewakili potensi sumber air panas Blawan sebagai pembangkit listrik alternatif selama sebulan, tapi dari hasil data yang didapat setidaknya cukup memberikan

gambaran mengenai tren energi yang dihasilkan pada hari-hari lainnya dengan kondisi yang sama. Pada tabel 4.2, 4.3, dan 4.4 menunjukkan data potensi yang didapatkan selama tiga hari dari tanggal 21-23 agustus 2015:

Tabel 4.2 Hasil Pengambilan Data Potensi di Sumber Air Panas Blawan (Hari Ke-1, 21 Agustus 2015)

Waktu (WIB)	V_{TEG} (Volt)	V_{conv} (Volt)	I_{conv} (A)	T_{cold} (°C)	T_{hot} (°C)	T_{hot water} (°C)	T_{cold water} (°C)	T_{env} (°C)	P_{TEG} (watt)
09:00	4,307	12	0,04	24,6	41,0	49,3	19,4	23,3	0,48
09:30	4,211	12	0,04	25,5	40,2	49,3	25,3	25,6	0,48
10:00	3,498	12	0,04	31,2	39,3	49,3	30,8	26,9	0,48
10:30	3,627	12	0,03	32,7	39,3	49,3	32,5	29,2	0,36
11:00	3,310	12	0,04	35,3	37,2	49,3	31,4	29,3	0,48
11:30	2,711	3,661	0,04	35,7	39,9	49,4	35,8	30,1	0,14644
12:00	2,469	3,279	0,03	36,0	40,0	49,4	35,9	30,7	0,09837
12:30	2,106	2,734	0,03	36,1	40,2	49,5	36,0	30,8	0,08202
13:00	2,008	2,696	0,03	36,3	40,3	49,5	36,0	31,1	0,08088
13:30	2,001	2,654	0,03	36,3	40,4	49,5	36,1	31,1	0,07962
14:00	3,509	12	0,03	35,9	39,2	49,4	35,7	29,4	0,36
14:30	4,019	12	0,04	31,5	39,1	49,3	24,1	24,8	0,48
15:00	4,260	12	0,04	30,7	38,9	49,3	23,3	24,0	0,48

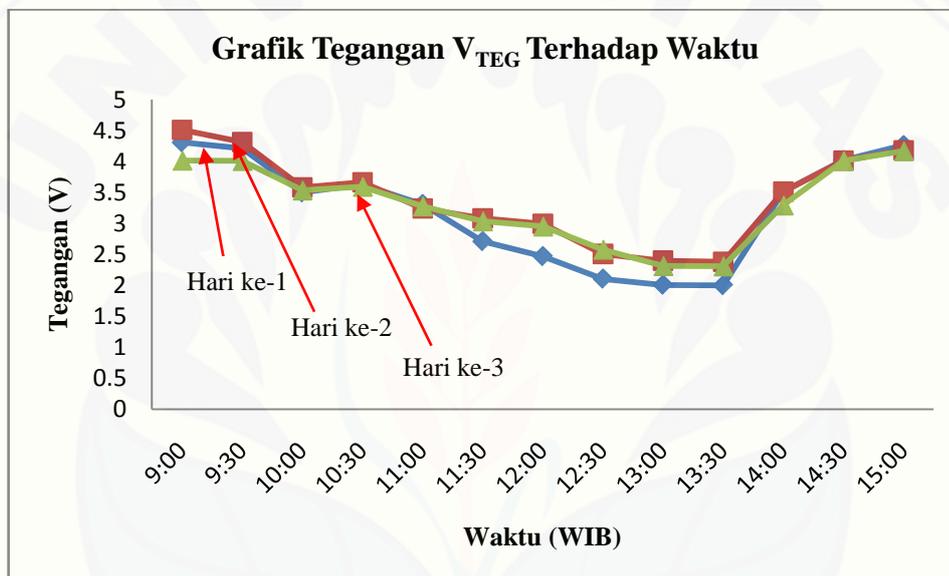
Tabel 4.3 Hasil Pengambilan Data Potensi di Sumber Air Panas Blawan (Hari Ke-2, 22 Agustus 2015)

Waktu (WIB)	V_{TEG} (Volt)	V_{conv} (Volt)	I_{conv} (A)	T_{cold} (°C)	T_{hot} (°C)	$T_{hot\ water}$ (°C)	$T_{cold\ water}$ (°C)	T_{env} (°C)	P_{TEG} (watt)
09:00	4,506	12	0,04	24,5	37,5	49,2	18,4	22,9	0,48
09:30	4,310	12	0,04	26,9	37,5	49,3	25,5	25,9	0,48
10:00	3,580	12	0,03	30,2	37,3	49,2	30,9	27,6	0,36
10:30	3,662	12	0,03	32,8	38,3	49,3	32,5	28,8	0,36
11:00	3,240	12	0,04	35,5	38,5	49,3	31,5	30,0	0,48
11:30	3,080	12	0,04	34,5	40,3	49,5	36,1	30,2	0,48
12:00	2,994	12	0,03	34,9	40,3	49,5	36,3	30,6	0,36
12:30	2,506	3,321	0,03	35,0	40,4	49,5	36,3	30,7	0,09963
13:00	2,398	3,180	0,03	35,4	40,5	49,5	36,3	30,9	0,0954
13:30	2,381	3,163	0,03	35,4	40,6	49,5	36,4	30,9	0,09489
14:00	3,510	12	0,03	35,6	39,1	49,4	35,4	28,5	0,36
14:30	4,014	12	0,04	31,3	39,0	49,3	23,8	24,4	0,48
15:00	4,178	12	0,04	29,1	38,9	49,3	22,6	23,8	0,48

Tabel 4.4 Hasil Pengambilan Data Potensi di Sumber Air Panas Blawan (Hari Ke-3, 23 Agustus 2015)

Waktu (WIB)	V_{TEG} (Volt)	V_{conv} (Volt)	I_{conv} (A)	T_{cold} (°C)	T_{hot} (°C)	$T_{hot\ water}$ (°C)	$T_{cold\ water}$ (°C)	T_{env} (°C)	P_{TEG} (watt)
09:00	4,014	12	0,04	24,8	42,2	49,3	19,8	23,6	0,48
09:30	4,009	12	0,04	24,9	42,0	49,3	25,0	26,2	0,48
10:00	3,533	12	0,04	31,0	39,1	49,3	30,8	28,0	0,48
10:30	3,592	12	0,03	32,7	39,2	49,3	32,6	28,8	0,36
11:00	3,277	12	0,04	35,6	38,3	49,3	32,0	29,5	0,48
11:30	3,035	12	0,04	35,4	40,2	49,4	36,0	30,1	0,48
12:00	2,951	12	0,03	35,8	40,3	49,5	36,2	30,5	0,36
12:30	2,579	3,379	0,03	35,9	40,3	49,5	36,2	30,7	0,10137
13:00	2,314	3,067	0,03	36,0	40,5	49,5	36,4	31,3	0,09201
13:30	2,309	3,045	0,03	36,0	40,6	49,5	36,4	31,3	0,09135
14:00	3,291	12	0,03	35,8	39,3	49,4	35,6	29,7	0,36
14:30	4,007	12	0,04	31,1	39,3	49,3	24,3	25,0	0,48
15:00	4,166	12	0,04	29,0	38,9	49,3	23,7	24,4	0,48

Dari sejumlah data potensi yang diperoleh diatas, menunjukkan kemiripan keluaran energi yang dihasilkan TEG selama 3 hari. Data ketiga hari tersebut memiliki tren yang sama, meski terdapat perbedaan nilai pada beberapa parameter data. Agar lebih jelas tren potensi yang didapat pada tiap harinya, maka data-data diatas ditampilkan dalam grafik. Diantaranya yang ditampilkan dalam grafik yaitu karakteristik tegangan terhadap waktu, arus terhadap waktu, suhu sumber air panas (*hot springs*) terhadap waktu, suhu lingkungan terhadap waktu, dan daya terhadap waktu. Grafik mengenai karakteristik tegangan terhadap waktu ditunjukkan pada gambar 4.1:



Gambar 4.1 Grafik Tegangan V_{TEG} Terhadap Waktu

Gambar 4.1 menunjukkan karakteristik tegangan yang dihasilkan dari ketiga hari selama pengambilan data. Dari ketiga hari tersebut memiliki tren potensi tegangan yang sama. Saat pagi hari menghasilkan tegangan yang cukup besar, lalu menurun seiring waktu beranjak siang meskipun penurunan tidak terjadi secara linier, hal ini tercatat pada pukul 10:30 WIB pada ketiga hari selama pengambilan data. Penurunan tersebut merupakan dampak dari meningkatnya suhu lingkungan yang memberi pengaruh pada sistem pendingin di sisi dingin TEC. Ketika pukul 9:00 WIB, tegangan (V_{TEG}) terbesar didapat pada hari ke-2 sebesar 4,506V dan terendah dihasilkan pada hari ke-3 sebesar 4,014V. Puncak penurunan tegangan (V_{TEG}) yang dihasilkan terjadi antara pukul 13:00 s/d 13:30

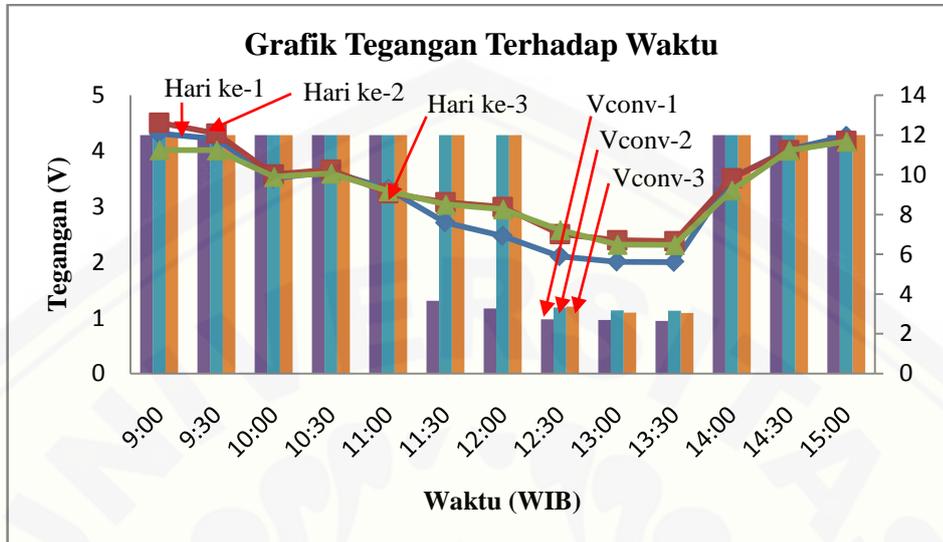
WIB, dan hari ke-1 tercatat menghasilkan tegangan terendah sebesar 2,008V dan 2,001V. Sedangkan pada hari lain yang mengalami puncak penurunan juga, namun menghasilkan tegangan (V_{TEG}) paling besar tercatat dimiliki hari ke-2 yaitu 2,398V dan 2,381V.

Berdasarkan hasil pengambilan data di lokasi penelitian yang kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik, selama rentang waktu yang telah ditentukan TEG tidak terus-menerus mengalami penurunan produksi tegangan (V_{TEG}). Tercatat pada ketiga hari tersebut mengalami tren kenaikan produksi tegangan (V_{TEG}) mulai pukul 14:00 s/d 15:00 WIB. Ini merupakan efek dari kembali menurunnya suhu lingkungan (T_{env}) di sekitar sumber air panas, sehingga sistem pendinginan pada TEG juga kembali optimal. Dari ketiga hari selama pengambilan data, tercatat naiknya suhu lingkungan (T_{env}) terjadi mulai pukul 11:30 s/d 13:30 WIB dengan rentang kenaikan suhu antara 30-31,3 °C.

Pada pukul 14:00 WIB yang mencatat kenaikan tegangan (V_{TEG}) terbesar adalah hari ke-2 yakni 3,51V dan kenaikan terendah tercatat pada hari ke-3 sebesar 3,291V. Faktor suhu memberi pengaruh yang cukup besar pada sebuah TEG dalam menghasilkan energi listrik. Di lokasi sumber air panas Blawan, pengaruh suhu lingkungan (T_{env}) jauh lebih besar terhadap energi listrik yang dihasilkan, dibanding pengaruh suhu sumber air panas itu sendiri ($T_{hot\ water}$). Hal ini dikarenakan suhu sumber air panas yang memancar relatif stabil pada kisaran 49,3 °C, meski selama pengambilan data di lokasi penelitian sempat tercatat naiknya suhu sumber air panas ($T_{hot\ water}$) yakni sebesar 49,5 °C pada siang hari. Naiknya suhu ini adalah faktor suhu lingkungan (T_{env}) yang saat itu juga sedang tinggi, serta didukung letak sumber air panas yang berada di tempat terbuka.

Data potensi dalam ketiga hari tersebut meski memiliki tren grafik yang sama, namun memiliki perbedaan besar nilai keluarannya. Adapun besar nilai data dari ketiga hari tersebut tidak terpaut jauh, hanya terpaut tiga angka dibelakang koma saja, grafik dapat menunjukkan selisihnya secara visual. Dengan kecilnya selisih perbedaan keluaran energi yang dihasilkan di setiap harinya, maka dapat diperkirakan bahwa rata-rata keluarannya akan stabil dengan tren yang sama. Dengan catatan, faktor kondisi lingkungan tetap atau tidak berubah signifikan.

Perbandingan mengenai tegangan sebelum dan setelah masuk konverter disajikan dalam grafik pada gambar 4.2:



Gambar 4.2 Grafik Perbandingan Tegangan TEG & Konverter

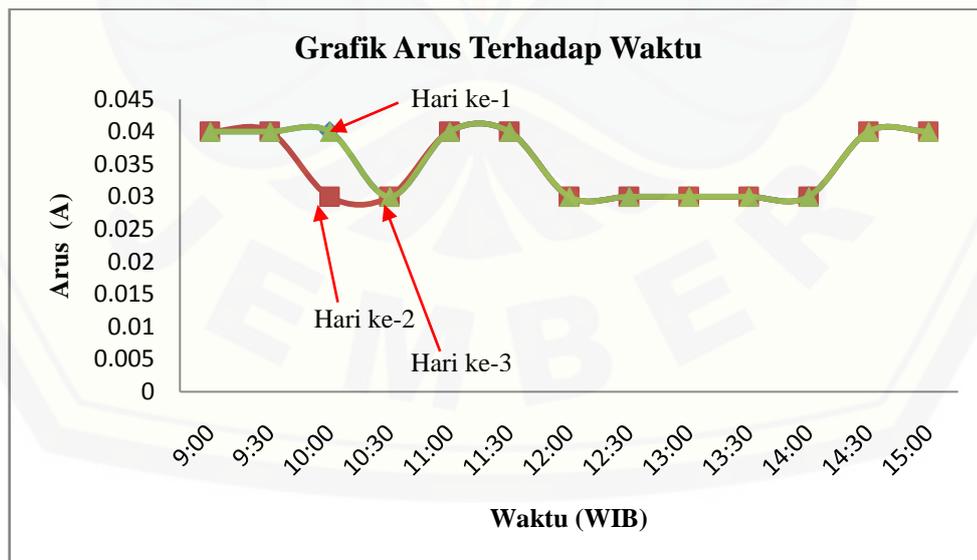
Alat bantu pengambilan data (TEG) pada penelitian ini ditingkatkan besar tegangannya dengan konverter, dalam situasi ini yang digunakan adalah konverter jenis *boost* atau penaik tegangan. Penggunaan konverter jenis ini dengan alasan tegangan yang dihasilkan oleh TEG cukup rendah, jauh dari tegangan kerja beban yang digunakan, yakni berupa sebuah kipas DC 12V 0,11A. Berdasarkan spesifikasinya, konverter ini mampu bekerja menaikkan tegangan dari minimal 3V menjadi maksimal 30V dan bila masukan minimal 4V dapat dinaikkan sampai 35V. Dan besar naiknya tegangan dapat diatur secara manual sesuai kebutuhan. Namun untuk menyesuaikan kebutuhan pada penelitian ini, konverter diatur menaikkan tegangan menjadi 12V saja.

Tegangan sebesar 12V yang dihasilkan konverter ini diukur ketika keadaan tanpa beban atau umumnya disebut V_{oc} (tegangan *open circuit*), namun pada penelitian ini digunakan istilah V_{conv} (tegangan konverter) untuk memudahkan pemahaman. Grafik diatas memaparkan bagaimana kinerja konverter dalam menaikkan tegangan sehingga dapat mensuplai ke beban DC. Bila ditarik garis penghubung dari tiap puncak grafik batang diatas, maka menghasilkan grafik yang berbentuk kotak. Bentuk grafik yang demikian merupakan efek dari spesifikasi atau karakteristik konverter itu sendiri. Dari data

yang didapat selama tiga hari, dapat dianalisa bahwasannya apabila tegangan (V_{TEG}) yang masuk ke konverter lebih kecil dari 3V ($V_{TEG} < 3V$) bukan berarti langsung tidak dapat menaikkan tegangan sedikit pun. Ternyata masih ada toleransi tegangan minimal yang dapat dinaikkan, hal ini ditunjukkan oleh data potensi pada hari ke-2 dan ke-3 pukul 12:00 WIB. Pada waktu itu V_{TEG} keduanya masing-masing 2,994V dan 2,951V, besar tegangan dalam kisaran tersebut masih dapat dinaikkan besarnya menjadi 12V.

Sedangkan kondisi ketika konverter mulai tidak mampu menaikkan tegangan sesuai kebutuhan yang diinginkan ditunjukkan oleh data potensi hari ke-1 pada pukul 11:30 WIB, V_{TEG} yang dihasilkan sebesar 2,711V hanya dapat dinaikkan oleh konverter menjadi 3,661V. Saat tegangan dari konverter hanya sedemikian, beban kipas DC tidak dapat berputar. Hal ini adalah akibat berubahnya besar tegangan saat tidak dibebani dengan saat dibebani. Saat tegangan awal (V_{TEG}) saja hanya 3,661V maka *drop* tegangan yang terjadi menjadi cukup signifikan saat dihubungkan dengan beban yang memiliki tegangan dasar 12V.

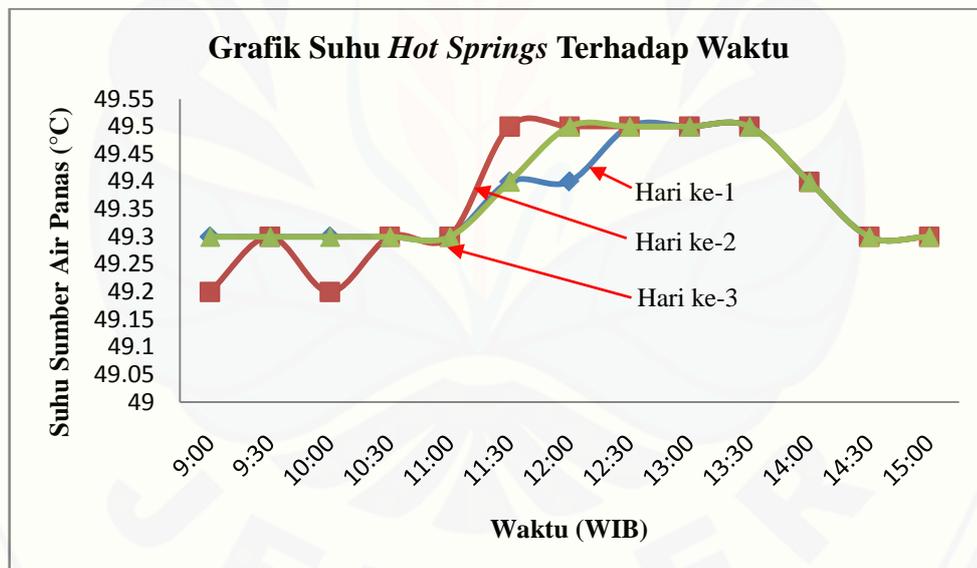
Bukan hanya tegangan yang diamati pada penelitian ini, melainkan juga arus yang dihasilkan juga diamati karakteristiknya, hal tersebut ditunjukkan pada gambar 4.3:



Gambar 4.3 Grafik Arus Terhadap Waktu

Merujuk pada gambar 4.3, grafik arus yang dihasilkan selama 3 hari pengambilan data potensi, secara relatif perubahan besar arus dapat dikatakan tidak begitu signifikan. Variasi besar arus yang tercatat ada pada angka 0,04A dan 0,03A, namun rata-rata stabil pada 0,03A. Pengukuran arus yang dihasilkan oleh TEG ini dalam kondisi terhubung dengan beban atau umumnya disebut I_{sc} (arus *short circuit*), karena arus sendiri baru muncul saat ada beban. Data arus dalam ketiga hari tersebut cenderung memiliki bentuk grafik yang sama, kecuali data arus hari ke-2 pada pukul 10:00 WIB. Karakteristik arus yang demikian merupakan akibat dari setiap keping TEC yang semuanya disusun secara seri. Sehingga arus yang dihasilkan relatif stabil, yang mengalami perubahan hanya tegangan saja. Berbeda jika setiap keping TEC disusun secara paralel, maka kondisi yang terjadi adalah sebaliknya.

Pada gambar 4.4 menunjukkan karakteristik grafik suhu sumber air panas terhadap waktu selama 3 hari pengambilan data potensi:



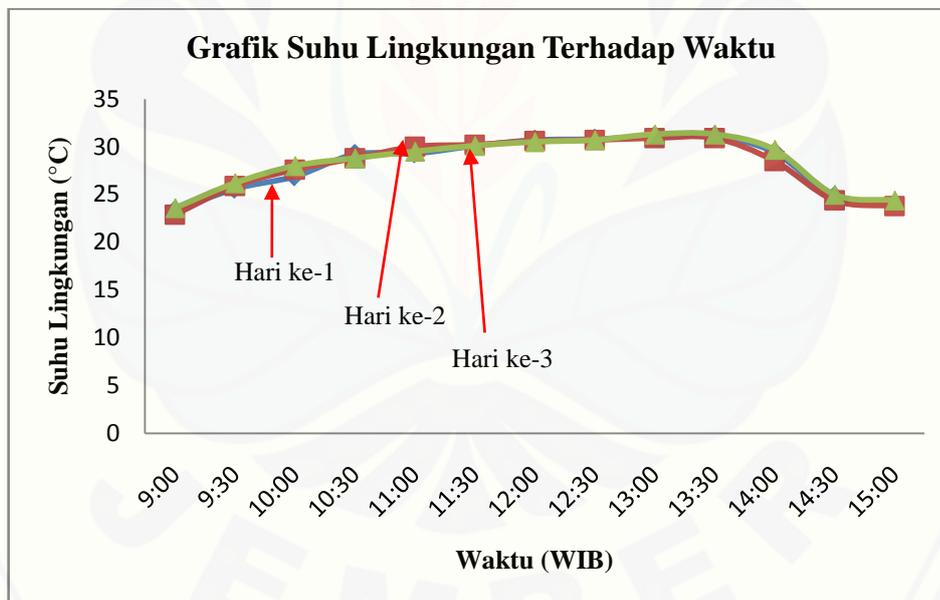
Gambar 4.4 Grafik Suhu *Hot Springs* Terhadap Waktu

Kalor yang dimiliki oleh sumber air panas (*hot springs*) adalah variabel penting yang menjadikan fungsi awal TEC dapat berubah menjadi TEG. Saat pagi pukul 9:00 WIB tercatat pada semua hari suhu air panas mencapai 49,3 °C kecuali hari ke-2 hanya 49,2 °C. Bila diamati, terdapat tren grafik yang sama dari ketiga hari selama pengambilan data potensi. Ketika masuk pukul 11:30 WIB suhu sumber

air panas mengalami kenaikan mencapai 49,4 – 49,5 °C. Setelah mengalami kenaikan suhu, hingga pukul 13:30 WIB suhu air panas rata-rata stabil pada 49,5 °C.

Kemudian suhu air panas kembali beranjak turun mulai 14:00 WIB menjadi 49,4 °C, kondisi ini terjadi pada ketiga hari. Hingga tiba pukul 14:30 s/d 15:00 WIB suhu air panas stabil lagi pada 49,3 °C. Apabila dilihat dari waktu perubahan suhunya, serta lokasi sumber air panas yang berada di tempat terbuka, maka perubahan suhu yang terjadi pada air panas merupakan efek langsung dari perubahan suhu lingkungan yang semakin siang semakin meningkat. Dan saat menjelang sore hari ketika matahari bergeser condong ke barat, suhu lingkungan beranjak menurun, juga memberi pengaruh pada turunnya suhu sumber air panas.

Pengaruh suhu lingkungan terhadap variabel lain telah dijelaskan sedikit pada penjelasan variabel yang terpengaruh langsung. Secara khusus, data mengenai suhu lingkungan terhadap waktu disajikan pada gambar 4.5:



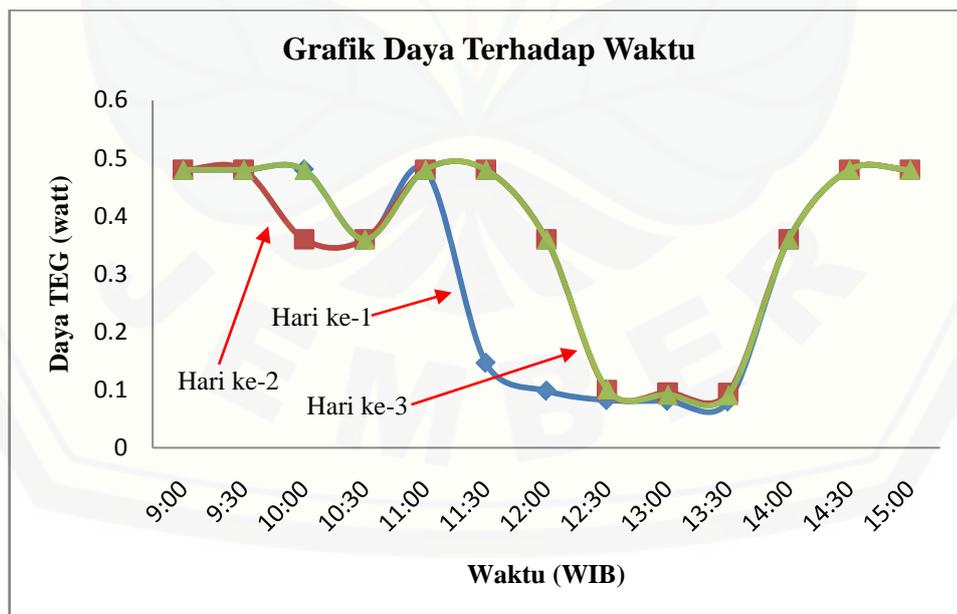
Gambar 4.5 Grafik Suhu Lingkungan Terhadap Waktu

Berdasarkan pengukuran langsung terhadap air normal di area pemukiman penduduk di Blawan, thermometer menunjukkan angka 15,8 °C. Pengukuran tersebut dilakukan siang hari sekitar pukul 13:00 WIB, bahkan lebih dingin dibanding suhu minimal yang mampu dicapai AC (Air Conditioner) ruangan pada umumnya yang hanya memiliki suhu terendah 16 °C. Jadi tidak heran ketika pagi

hari pukul 9:00 WIB pengambilan data dilakukan, suhu lingkungan tercatat cukup rendah pada masing-masing hari secara berurutan, yakni pada suhu 23,3 °C, 22,9 °C, dan 23,6 °C.

Meski diketahui suhu air normal di kawasan perbukitan ini cukup rendah padahal siang hari, tapi tidak berpengaruh terhadap suhu lingkungan ketika matahari mulai meninggi, terlebih di area atau tempat terbuka. Karenanya tidak salah grafik suhu lingkungan terhadap waktu membentuk semacam bukit. Semakin siang dan semakin terik matahari maka suhu lingkungan juga semakin meningkat, begitu pula sebaliknya. Suhu lingkungan tertinggi ada pada hari ke-3 pukul 13:30 WIB sebesar 31,3 °C, dan pada waktu yang sama dengan suhu terendah ada pada hari ke-2 sebesar 30,9 °C. Dari hasil pengukuran tercatat suhu lingkungan mulai turun pada pukul 14:00 WIB, hingga waktu berikutnya suhu lingkungan terus mengalami penurunan. Ketiga hari selama pengambilan data potensi cenderung memiliki tren grafik yang sama, hanya selisih beberapa angka dibelakang koma. Sehingga grafiknya tampak berhimpit atau rapat.

Setelah diketahui data potensi energi yang dihasilkan TEG, yakni besar tegangan dan arusnya. Maka melalui perhitungan dengan persamaan matematis didapatkan besar daya yang dihasilkan. Hal tersebut ditunjukkan pada gambar 4.6:



Gambar 4.6 Grafik Daya Terhadap Waktu

Daya disini diperoleh dengan mengkalikan V_{conv} (tegangan setelah konverter) dengan I_{conv} (arus setelah konverter). Perkalian terhadap V_{conv} tersebut ditujukan agar diketahui daya sebenarnya yang tersalur pada beban. Akan berbeda besar daya yang diperoleh jika dikalikan dengan V_{TEG} (tegangan sebelum masuk konverter), dan tentu tidak sesuai dengan daya sesungguhnya yang masuk ke beban.

Grafik diatas menunjukkan karakteristik daya yang dimiliki oleh TEG. Saat pagi hari pukul 9:00 s/d 9:30 WIB, ketiga hari memiliki daya yang sama sebesar 0,48 Watt. Lalu saat pukul 10:00 WIB data hari ke-2 mencatatkan daya yang berbeda dibanding dua hari yang lain yakni lebih kecil 0,36 Watt. Perbedaan daya yang dihasilkan juga terdapat pada pukul 11:30 dan 12:00 WIB di hari ke-1, ketika dua hari lain memiliki daya yang sama yakni 0,48 Watt dan 0,36 Watt, tapi daya hari ke-1 hanya sebesar 0,14644 Watt dan 0,09837 Watt. Hal tersebut merupakan dampak langsung dari V_{TEG} yang dihasilkan, contohnya V_{TEG} hari ke-1 pada pukul 11:30 dan 12:00 WIB itu hanya sebesar 2,711V dan 2,469V, tegangan sedemikian lebih kecil dari toleransi minimal yang diberikan konverter (2,8 - 2,9V) untuk dapat bekerja normal. Sehingga otomatis konverter tidak dapat menaikkan tegangan sesuai pengaturan awal (*setting* di 12V), dan hanya mampu menaikkan masing-masing menjadi 3,661V dan 3,279V.

Selain adanya perbedaan daya pada beberapa titik waktu dari ketiga hari pengambilan data. Namun data dari ketiga hari ini juga memiliki persamaan, persamaannya ada pada tren grafik yang terbentuk. Tren yang paling jelas adalah terbentuknya kurva seperti palung laut. Pada bagian grafik yang menurun curam ini merupakan efek dari menurunnya tegangan keluaran (V_{TEG}), yang besar V_{TEG} tersebut lebih kecil dari tegangan masukan yang dapat ditoleransi oleh konverter. Jadi besar V_{conv} pun menjadi lebih kecil, sehingga mengakibatkan daya yang dihasilkan juga *drop*. Dapat disimpulkan bahwa turun serta naiknya grafik daya ini mengikuti turun serta naiknya V_{TEG} , yakni daya (P_{TEG}) berbanding lurus dengan V_{TEG} . Arus disini bukan faktor yang memberi pengaruh besar terhadap daya yang dihasilkan, dikarenakan arus yang terukur relatif stabil di 0,03A akibat dari kepingan TEC yang tersusun seri.

4.3 Kajian Potensi Energi Terbarukan di Blawan

4.3.1 Potensi Penerapan TEG di Sumber Air Panas Blawan

Berdasarkan hasil yang didapatkan selama pengambilan data menggunakan alat bantu (TEG), serta karakteristik kinerja yang dimiliki. Maka dapat diperhitungkan mengenai seberapa berpotensi penerapan sebuah TEG untuk memanfaatkan energi terbarukan di suatu lokasi. Pada penelitian ini, kajian potensi penerapan TEG diperhitungkan untuk dapat menyuplai sebuah rumah DC dengan kebutuhan daya sebesar 100 watt dengan arus 2,9A. Rumah DC adalah rumah yang memiliki beragam perangkat elektronik dasar yang langsung menggunakan sumber DC (*Direct Current*) sebagai suplai listriknya. Asumsi adanya sebuah rumah DC pada penelitian ini adalah untuk memudahkan dalam penyaluran energi ke beban, dan lebih efisien karena sumber listrik yang berupa DC dapat langsung digunakan beban yang mayoritas membutuhkan sumber DC. Daripada harus dirubah ke AC (*Alternating Current*) dahulu menggunakan *inverter*, lalu dirubah kembali ke DC menggunakan *rectifier*. Tentu jauh lebih tidak efisien karena akan terdapat rugi-rugi pada setiap proses konversi yang terjadi.

Pada subbab sebelumnya, telah dijelaskan mengenai seberapa besar daya yang dapat dihasilkan TEG dalam beberapa variasi waktu. Untuk memudahkan dalam perhitungan kajian potensi penerapan TEG di Blawan, maka dipilih nilai daya tertinggi yang dihasilkan oleh TEG. Hal ini dilakukan dengan alasan karena *sample* kinerja paling optimal dari TEG dirasa dapat mewakili potensi sesungguhnya yang dapat dihasilkan. Skala purwarupa TEG yang dibuat dalam penelitian ini menggunakan 9 buah TEC berdimensi 4x4cm yang disusun seri dengan tambahan sebuah konverter (maksimal menaikkan tegangan 35V), diperoleh daya paling tinggi sebesar 0,48 watt dengan arus 0,04A.

Gambar 4.7 merupakan purwarupa TEG dalam skala penelitian, yang hanya digunakan untuk mengambil *sample* data potensi energi listrik yang mampu dihasilkan oleh TEG dengan memanfaatkan sumber air panas. Sehingga dapat diperhitungkan seberapa potensi penerapan TEG di sumber air panas Blawan. Purwarupa TEG yang sedang beroperasi ditunjukkan pada gambar 4.7:



Gambar 4.7 Purwarupa TEG

Dengan keluaran daya maksimal sebesar 0,48 watt dengan arus 0,04A, agar dapat memenuhi kebutuhan daya 100 watt dari sebuah rumah DC. Pada setiap purwarupa TEG ini terdiri dari 9 buah TEC yang tersusun seri. Karena kebutuhan pemenuhan suplai daya 100 watt DC, maka dibutuhkan 73 purwarupa TEG seperti pada penelitian yang disusun secara paralel, dengan tujuan untuk mencapai besar arus seperti kebutuhan yakni 2,9A. Sebab pada rangkaian paralel, total arus sama dengan jumlah dari keseluruhan arus yang dihasilkan masing-masing purwarupa TEG, dan besar tegangan total menjadi sama atau tetap seperti yang dihasilkan oleh sebuah purwarupa TEG yakni 12V. Sehingga berdasarkan teori perhitungan ini, diperoleh arus total (I_{tot}) 2,92A.

Untuk mengetahui besar kenaikan tegangan yang diperlukan agar mampu mengatasi kebutuhan daya beban DC 100 watt, maka jumlah kebutuhan daya dibagi dengan besar arus yang telah diketahui berdasarkan perhitungan secara teori, sehingga diketahui kebutuhan tegangan sebesar 34,246V ~ 35V. Untuk mendapatkan tegangan lebih besar 73 purwarupa TEG tersebut ditambah sebanyak 3 kalinya kemudian disusun secara seri. Tanpa memperhitungkan rugi-

rugi yang terjadi, berdasarkan perhitungan teori TEG yang diterapkan di sumber air panas Blawan kini dengan keluaran 36V, 2,92A dapat menyuplai daya sebesar 105,12watt. Untuk mencapai daya tersebut diperlukan 1971 buah TEC, kebutuhan terhadap TEC yang cukup banyak ini merupakan efek dari kurang tingginya suhu sumber air panas yakni hanya pada rentang 49,2 – 49,5 °C.

4.3.2 Perbandingan Potensi dengan Hasil Penelitian Lain

Civitas akademik dari perguruan tinggi di Korea yang bernama Nyambayar Baatar (Department of Electrical Engineering, Chungbuk National University) dan Shiho Kim (School of Integrated Technology & Yonsei Institute of Convergence Technology Yonsei University Songdo, Incheon) pernah menerbitkan jurnal penelitian pada desember 2011 dengan topik yang sama, yakni *Thermoelectric Generator* (TEG) namun penerapannya pada objek yang berbeda. Pada penelitian tersebut, TEG diterapkan untuk menggantikan fungsi radiator di kendaraan bermesin diesel atau *Internal Combustion Engine* (ICE) berkapasitas 2.0 liter. Tabel 4.5 menunjukkan perbandingan dari kedua penelitian ini:

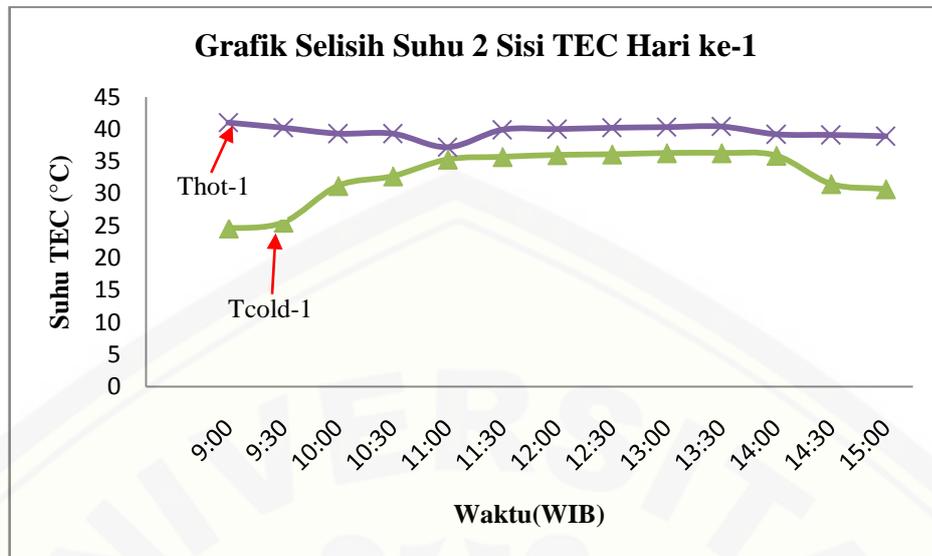
Tabel 4.5 Perbandingan dengan Hasil Penelitian Lain

Parameter Pemanding	Penelitian di Korea (TELKOMNIKA, Vol.9, No.3, Desember 2011)	Penelitian di Blawan
Objek penelitian	Mesin kendaraan ICE	Sumber air panas alami
Jumlah penggunaan TEC	72 buah	9 x 219 purwarupa TEG = 1971 buah
Dimensi TEC	4 x 4cm	4 x 4cm
Bahan TEC	Bi_2Te_3 (<i>Bismuth telluride</i>)	Bi_2Te_3 (<i>Bismuth telluride</i>)
Pendingin	Udara paksa & sirkulasi <i>coolant radiator</i>	Heatsink & air biasa (tanpa sirkulasi)
<i>Heatpipes</i>	128 buah	-
Sifat perubahan suhu objek	Dinamis	Relatif stabil
Pengujian	Kondisi mesin <i>idle</i> & berjalan 80 km/h	Pukul 9:00 s/d 15:00WIB
Profil suhu sisi panas TEC	90-95 °C (<i>idle</i>) & 95-100 °C (80 km/h)	42,2 °C (teroptimal) & 38,3 °C (terendah) hari ke-3
Profil suhu sisi dingin TEC	sekitar 70 °C (<i>idle</i>) & sekitar 45 °C (80 km/h)	24,8 °C (teroptimal) & 35,6 °C (terendah) hari ke-3
Selisih suhu sisi panas & dingin	sekitar 25 °C (<i>idle</i>) & sekitar 55 °C (80 km/h)	17,4°C (teroptimal) & 2,7°C (terendah)

V_{oc} , I_{sc} , dan daya Maksimal	30V, 3,8A, dan 28,5watt (<i>idle</i>) 50V, 6A, dan 75watt (80 km/h)	36V, 2,92A, dan 105,12watt
Efisiensi	3,91% (<i>idle</i>) & 9,52% (80 km/h)	0,957% (terendah) & 6,62% (tertinggi)

Yang dimanfaatkan oleh TEG di penelitian tersebut adalah aliran panas air pendingin mesin. Konstruksi purwarupa TEG ini terdiri dari 72 buah TEC berdimensi 4x4cm dan 128 *heat pipes*, yang dibuat sedemikian rupa agar memiliki fungsi seperti radiator konvensional. Uji coba dilakukan pada kondisi putaran mesin *idle* dan kondisi berjalan dengan kecepatan 80 km/h. Hasil uji coba menunjukkan ketika kondisi putaran mesin *idle*, blok sisi panas memiliki rentang suhu 90-95 °C dan sisi dingin memiliki profil suhu sekitar 70 °C. Sehingga perbedaan suhu antara sisi panas & sisi dingin sekitar 25 °C. Yang menghasilkan V_{oc} , I_{sc} , dan titik daya maksimal masing-masing sebesar 30V, 3,8A, dan 28,5 watt. Ketika kondisi berjalan dengan kecepatan 80 km/h, blok sisi panas bersuhu antara 95-100 °C dan profil suhu sisi dingin sekitar 45 °C. Sehingga perbedaan suhu pada kondisi ini antara sisi panas & sisi dingin sekitar 55 °C. Serta menghasilkan V_{oc} , I_{sc} , dan titik daya maksimal masing-masing sebesar 50V, 6A, dan 75 watt.

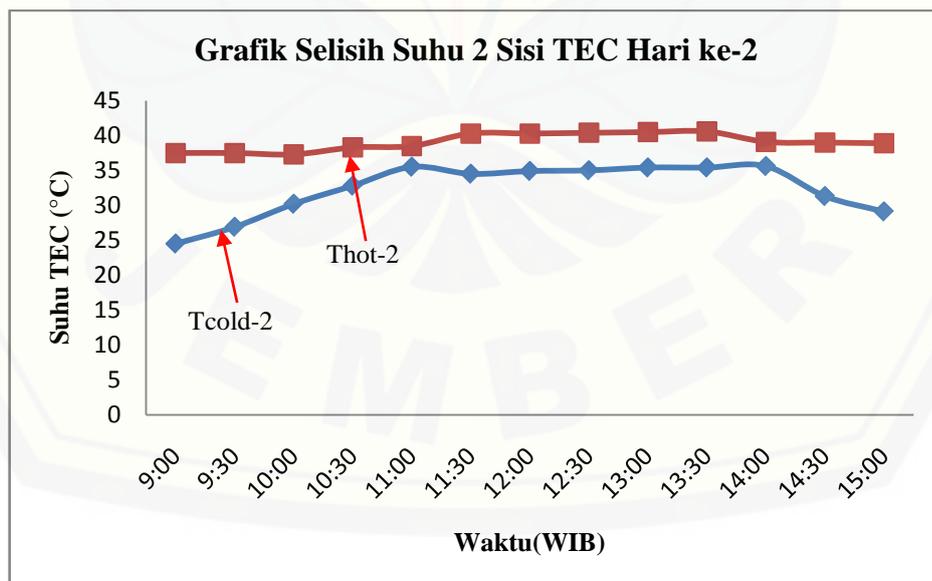
Bila dibandingkan dengan hasil penelitian dalam skripsi ini, melihat dari segi daya yang dihasilkan saja tentu sudah terlihat besar selisihnya. Namun bukan variabel daya saja yang menjadi acuan, melainkan terdapat faktor-faktor lain yang mempengaruhi besarnya selisih keluaran antara kedua penelitian ini. Dibawah ini adalah grafik perbedaan suhu sisi panas & sisi dingin purwarupa TEG selama pengambilan dalam penelitian ini, gambar 4.8 menunjukkan perbedaan suhu antara sisi panas & sisi dingin TEC saat pengambilan data hari ke-1:



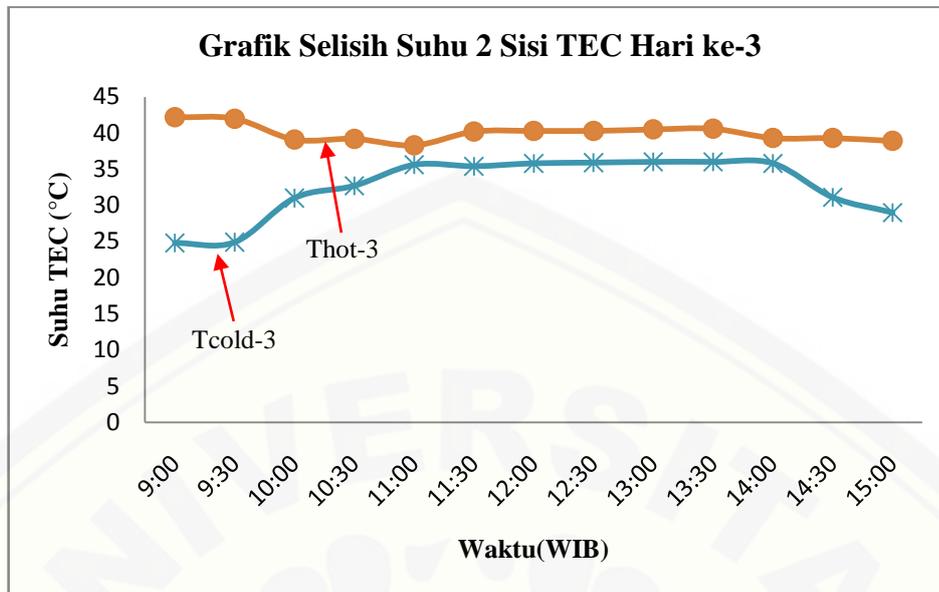
Gambar 4.8 Grafik Selisih Suhu 2 Sisi TEC Hari ke-1

Selisih suhu tertinggi tercatat saat pagi hari pukul 9:00 WIB sebesar 16,4 °C, dan selisih suhu terendah ada pada pukul 11:00 WIB hanya sebesar 1,9 °C. Bila dihubungkan dengan grafik V_{TEG} terhadap waktu di subbab sebelumnya, maka setiap penurunan perbedaan suhu antara sisi panas & sisi dingin TEC terjadi penurunan pula pada besar V_{TEG} .

Secara berturut gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan grafik perbedaan suhu antara sisi panas & sisi dingin TEC saat pengambilan data hari ke-2 dan ke-3:



Gambar 4.9 Grafik Selisih Suhu 2 Sisi TEC Hari ke-2



Gambar 4.10 Grafik Selisih Suhu 2 Sisi TEC Hari ke-3

Pada hari ke-2 selisih suhu tertinggi terjadi pukul 9:00 WIB sebesar 13°C , dan selisih suhu terendah pada pukul 14:00 WIB sebesar 3°C . Sedang pada hari ke-3 selisih suhu tertinggi juga terjadi pada pukul 9:00 WIB sebesar $17,4^{\circ}\text{C}$ dan selisih suhu terendah terjadi pada pukul 11:00 WIB hanya sebesar $2,7^{\circ}\text{C}$. Data perbedaan suhu 2 sisi TEC pada ketiga hari cenderung memiliki tren yang sama, meskipun terdapat perbedaan besar nilai suhu pada masing-masing hari. Kesamaan tren grafik ini ditunjukkan dengan bentuk grafik yang memiliki kemiripan, serta didukung oleh nilai perbedaan suhu tertinggi dan terendah terjadi pada jam yang sama.

Meskipun objek penerapan kedua penelitian ini berbeda, yakni objek penelitian civitas akademik Korea pada kendaraan yang memiliki sifat perubahan suhu sangat dinamis mengikuti kinerja mesin. Sedangkan objek penelitian di Blawan sifat perubahan suhunya lebih stabil, hanya suhu lingkungan yang berubah mengikuti pergerakan waktu dan tingkat teriknya matahari. Namun dengan mengacu pada hasil penelitian civitas akademik Korea dan hasil penelitian yang dilakukan di Blawan, bila dikomparasikan keduanya kemudian ditarik satu poin faktor yang sama-sama mempengaruhi perbedaan hasil energi keduanya. Maka, ditemukan korelasi sangat erat antara besar perbedaan suhu yang tercipta diantara sisi panas & sisi dingin TEC dengan besar energi yang dihasilkan. Hal

tersebut menegaskan bahwa besar perbedaan suhu diantara kedua sisi TEC selalu berbanding lurus dengan energi yang dapat dihasilkan oleh TEG.

Tingkat efisiensi dapat menjadi acuan untuk menentukan seberapa optimal sebuah TEG dalam kinerjanya. Telah diketahuinya nilai dari parameter suhu sisi panas & sisi dingin TEC memudahkan dalam perhitungan tingkat efisiensi yang dimiliki TEG. Serta terdapat variabel ZT yang mewakili sosok merit. Dalam penelitian ini digunakan modul TEC yang berupa Bi_2Te_3 (Bismuth telluride) dengan nilai $ZT \approx 0,7$. Pada penelitian milik civitas akademik Korea, diperoleh efisiensi TEG 3,91% ketika pengujian pada kondisi *idle* dan memiliki efisiensi 9,52% ketika pengujian kondisi berjalan 80 km/h. Sedangkan hasil penelitian purwarupa TEG di Blawan memiliki efisiensi 0,957% ketika dihitung menggunakan data *sample* selisih suhu terendah hari ke-3, dan memiliki efisiensi 6,62% ketika dihitung menggunakan data *sample* selisih suhu tertinggi di hari yang sama.

Dengan tingkat efisiensi TEG yang lebih rendah di Blawan dibandingkan hasil penelitian di Korea, maka penerapan TEG untuk memanfaatkan potensi energi terbarukan berupa sumber air panas di Blawan diperhitungkan kurang tepat dalam segi jumlah investasi pembangunan. Sebab dengan kapasitas daya keluaran yang diharapkan tidak terlalu jauh berbeda, yakni di Korea dengan 72 buah TEC mampu maksimal menghasilkan V_{oc} , I_{sc} , dan titik daya maksimal masing-masing sebesar 50V, 6A, dan 75 watt, dengan syarat blok sisi panas bersuhu antara 95-100 °C dan profil suhu sisi dingin sekitar 45 °C. Sedangkan untuk penerapan di Blawan, butuh 219 purwarupa TEG seperti pada penelitian yang dibagi menjadi 73 purwarupa TEG disusun paralel, lalu 73 purwarupa TEG tersebut ditambah sebanyak 3 kalinya kemudian disusun secara seri untuk menghasilkan V_{oc} , I_{sc} , dan titik daya maksimal masing-masing sebesar 36V, 2,92A, dan 105,12 watt, dengan blok sisi panas bersuhu sekitar 39-42 °C dan suhu sisi dingin sekitar 24,5 °C. Rendahnya keluaran energi yang dihasilkan merupakan efek dari tergolong rendahnya suhu sumber air panas di Blawan, sehingga keluaran TEG sangat rendah (*drop*) disebabkan bekerja cukup jauh dari suhu operasi optimalnya seperti yang tertera dalam *data sheet*.

BAB 5. PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dipaparkan pada bab sebelumnya, mengenai topik “Pemanfaatan Potensi Sumber Air Panas di Blawan Bondowoso Sebagai Pembangkit Listrik Alternatif Berbasis TEC”, terdapat beberapa hal yang dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Suhu sumber air panas di Blawan relatif stabil pada 49,3 °C, meskipun ketika suhu lingkungan (T_{env}) naik antara 28,5 – 31,3 °C cukup berpengaruh terhadap kenaikan suhu sumber air panas yakni naik menjadi 49,4 – 49,5 °C.
2. Perbedaan suhu (ΔT) yang tercipta diantara sisi panas (T_{hot}) & sisi dingin (T_{cold}) modul termoelektrik (TEC1-12706) berbanding lurus dengan besar energi yang dihasilkan. Hal tersebut dibuktikan oleh contoh data hari ke-3, saat ΔT sebesar 2,7 °C tegangan keluaran TEG (V_{TEG}) hanya 3,277V dan saat ΔT sebesar 17,4 °C nilai V_{TEG} diketahui lebih besar yakni 4,014V.
3. Tegangan keluaran TEG (V_{TEG}) selama pengambilan data dinamis dalam rentang tegangan 2,001 – 4,506V sedangkan arus keluaran (I_{conv}) stabil pada kisaran 0,03 – 0,04A, hal ini merupakan akibat dari 9 modul termoelektrik (TEC1-12706) yang disusun secara seri.
4. Potensi penerapan TEG di sumber air panas Blawan untuk memenuhi kebutuhan beban DC 100watt dengan arus 2,9A, membutuhkan modul termoelektrik cukup banyak yakni sejumlah 1971 buah, disebabkan TEG bekerja hanya sekitar 10% dari suhu operasi optimalnya seperti yang tertera dalam *data sheet*.
5. Tingkat efisiensi purwarupa TEG yang diterapkan di Blawan cukup rendah, hanya 6,62% dan efisiensi terendahnya 0,957%, lebih rendah dari penelitian sebelumnya yang diterapkan di Korea. Sehingga penerapan TEG di sumber air panas Blawan diperhitungkan kurang ekonomis dalam segi investasi pembangunannya.

5.2 Saran

Dari hasil data potensi dan karakteristik TEG yang telah dibahas serta dianalisa, dapat diketahui kekurangan dari penerapan TEG di sumber air panas Blawan. Oleh karenanya terdapat saran untuk memperbaiki kekurangan pada penelitian yang telah dilakukan, diantaranya yaitu:

1. Perlu dicari sumber air panas di lokasi lain yang memiliki suhu lebih tinggi dengan suhu lingkungan yang rendah, agar dapat mendekati atau bahkan mencapai suhu operasi optimal TEG.
2. Manufaktur model TEG perlu disempurnakan, agar lebih tahan lama serta dapat optimal bekerja pada semua rentang suhu sehingga efisiensinya semakin meningkat.

DAFTAR PUSTAKA

- Administrator. (2013). “Pemakaian Listrik Semester 1/2013, Tumbuh Tinggi Di Sektor Produktif Dan Rendah Di Kelompok Konsumtif”. Dari sumber <https://www.esdm.go.id>. Diakses pada 17 februari 2015.
- Baatar, Nyambayar dan Kim, Shiho. (2011). “A Thermoelectric Generator Replacing Radiator for Internal Combustion Engine Vehicles”. Korea: Chungbuk National University dan Yonsei University Songdo.
- Challoner, Jack. (2000). “Jendela Iptek Seri 5: Energi”. Jakarta: PT Balai Pustaka.
- Dr. O’Halloran, Steven dan Mr. Rodrigues, Matthew. (2012). “Power and Efficiency Measurement in a Thermoelectric Generator”. Oregon: University of Portland. American Society for Engineering Education.
- Fairuzabadi, Muhammad. (2013). “Metode Numerik - Interpolasi”. Dari sumber <https://fairuzelsaid.wordpress.com/tag/interpolasi/>. Diakses pada 9 maret 2015.
- Gutierrez, F dan Mendez, F. (2008). “Generation Minimization of a Thermoelectric Cooler”. The Open Thermoelectric Journal Vol.2.
- John, Stephen T. (2014). “High Efficient Seebeck Thermoelectric Device for Power System Design and Efficiency Calculation: A Review of Potential Househod Appliances”. India: Sathyabama University. International Journal of Computer Applications (0975-8887) Volume 97-No.18.
- Komunitas Dian Aksara. (2007). “Energi Alternatif”. Bogor: Yudhistira Ghalia Indonesia.

Maysha, Ima; Trisno, Bambang; Hasbullah. (2013). “Pemanfaatan Tenaga Surya Menggunakan Rancangan Panel Surya Berbasis Transistor 2N3055 dan Thermoelectric Cooler”. Bandung: Universitas Pendidikan Indonesia.

Dewo, E. Setio. (2003). “Teknologi Pendingin Prosesor”. Dari sumber <https://ilmukomputer.com>. Diakses pada 19 februari 2015.

Sukur, Edi. (2004). “Melirik Teknologi Termoelektrik sebagai Sumber Energi Alternatif”. Dari sumber <http://www.energi.lipi.go.id/utama.cgi?artikel>. Diakses pada 19 februari 2015.

The World Bank Washington, D.C. (1994). “Indonesia: Environment and Development”. U.S.A.: World Bank Publications. Hal. XXIX.

Young, W.D. dan Freedman, R.A. (1996). University Physics, ninth edition, Addison-Wesley, California.

LAMPIRAN

A. Perhitungan

- Diketahui: Purwarupa TEG skala penelitian terdiri atas 9 TEC 4x4x0,35cm, disusun seri dengan tambahan konverter *boost*. Menghasilkan keluaran 12V, 0,04A berdaya 0,48watt.
- Target: Pemenuhan kebutuhan beban berupa rumah DC 100watt, dengan arus 2,9A.
- Perhitungan potensi TEG mampu menyuplai beban:

Untuk mendapatkan arus 2,9A maka dibutuhkan,

$$\begin{aligned} \text{TEG} &= 2,9\text{A} / 0,04\text{A} \\ &= 72,5 \sim 73 \text{ purwarupa TEG skala penelitian.} \end{aligned}$$

Lalu 73 buah TEG skala penelitian disusun secara paralel, sebab

$$\begin{aligned} I_{\text{par}} &= I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = I_{\text{tot}} \\ \text{sehingga } I_{\text{tot}} &= 0,04\text{A} \times 73 \text{ purwarupa TEG} \\ &= 2,92\text{A.} \end{aligned}$$

Pada rangkaian paralel besar tegangan V_{conv} selalu sama yakni 12V (dengan V_{TEG} stabil 4,506V atau $\geq 3\text{V}$), maka untuk mencapai daya 100watt dibutuhkan

$$\begin{aligned} \text{Tegangan yang dibutuhkan} &= 100\text{watt} / 2,92\text{A} \\ &= 34,246\text{V} \sim 35\text{V.} \end{aligned}$$

Jadi memerlukan Purwarupa TEG (untuk dirangkai seri) = $35\text{V} / 12\text{V}$

$$= 2,9167 \sim 3 \text{ kali.}$$

Ke-73 purwarupa TEG yang sebelumnya telah disusun paralel menghasilkan keluaran 12V, 2,92A, jadi untuk mendapatkan tegangan lebih besar 73 purwarupa TEG tersebut ditambah sebanyak 3 kalinya, kemudian disusun secara seri dikarenakan

$$\begin{aligned} V_{\text{seri}} &= V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n = V_{\text{tot}} \\ V_{\text{tot}} &= 12\text{V} \times 3 \\ \text{sehingga } V_{\text{tot}} &= 36\text{V.} \end{aligned}$$

Tanpa memperhitungkan rugi-rugi yang terjadi, berdasarkan perhitungan teori TEG yang diterapkan di sumber air panas Blawan kini dengan tegangan 36V dan arus 2,92A dapat menyuplai daya sebesar

$$\begin{aligned} P &= 36V \times 2,92A \\ &= 105,12\text{watt.} \end{aligned}$$

- Perhitungan biaya untuk kebutuhan TEC:

$$\begin{aligned} \text{Jumlah kebutuhan TEC} &= \text{TEG skala penelitian} \times (73 \times 3) \\ &= 9 \text{ TEC} \times 219 \\ &= 1971 \text{ buah TEC} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Dana untuk TEC} &= \text{Harga per TEC} \times \text{Jumlah kebutuhan TEC} \\ &= \text{Rp } 50.000 \times 1971 \text{ buah} \\ &= \text{Rp } 98.550.000,- \end{aligned}$$

- Perhitungan efisiensi:

$$\varepsilon = \frac{T_{hot} - T_{cold}}{T_{hot}} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_{cold}}{T_{hot}}}$$

Efisiensi penelitian di Korea (kondisi *Idle*),

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{95 - 70}{95} \frac{\sqrt{1 + 0,7} - 1}{\sqrt{1 + 0,7} + \frac{70}{95}} \\ \varepsilon &= 0,2631 \frac{1,3038 - 1}{1,3038 + 0,7368} \\ \varepsilon &= 0,2631 \times 0,1488 = 0,0391 \\ \varepsilon &= 0,0391 \times 100\% = 3,91\%. \end{aligned}$$

Efisiensi penelitian di Korea (kondisi berjalan 80 km/h),

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \frac{100 - 45}{100} \frac{\sqrt{1 + 0,7} - 1}{\sqrt{1 + 0,7} + \frac{45}{100}} \\ \varepsilon &= 0,55 \frac{1,3038 - 1}{1,3038 + 0,45} \\ \varepsilon &= 0,55 \times 0,1732 = 0,0952 \\ \varepsilon &= 0,0952 \times 100\% = 9,52\%. \end{aligned}$$

Efisiensi purwarupa TEG di Blawan, menggunakan data *sample* selisih suhu terendah (hari ke-3 pukul 11:00WIB),

$$\varepsilon = \frac{38,3 - 35,6}{38,3} \frac{\sqrt{1 + 0,7} - 1}{\sqrt{1 + 0,7} + \frac{35,6}{38,3}}$$

$$\varepsilon = 0,0704 \frac{1,3038 - 1}{1,3038 + 0,9295}$$

$$\varepsilon = 0,0704 \times 0,1360 = 0,0095744$$

$$\varepsilon = 0,0095744 \times 100\% = 0,957\%$$

Efisiensi purwarupa TEG di Blawan, menggunakan data *sample* selisih suhu tertinggi (hari ke-3 pukul 9:00WIB),

$$\varepsilon = \frac{42,2 - 24,8}{42,2} \frac{\sqrt{1 + 0,7} - 1}{\sqrt{1 + 0,7} + \frac{24,8}{42,2}}$$

$$\varepsilon = 0,4123 \frac{1,3038 - 1}{1,3038 + 0,5876}$$

$$\varepsilon = 0,4123 \times 0,1606 = 0,0662$$

$$\varepsilon = 0,0662 \times 100\% = 6,62\%$$

LAMPIRAN

B. Dokumentasi



Pengukuran suhu air pemukiman di rumah warga



Pengambilan *sample* data potensi



Suhu lingkungan saat siang hari



Suhu lingkungan saat pagi hari



Suhu sumber air panas Blawan



Suhu air pendingin sisi dingin TEC



Pengukuran arus I_{sc}



Suhu sisi dingin TEC



Suhu sisi panas TEC (saat tinggi)



Suhu sisi panas TEC (saat rendah)

