



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN *HYBRID SOLAR CELL* DENGAN
*THERMOELECTRIC GENERATOR***

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar sarjana teknik**

ANNISA NURULIANTHY

0806454613

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

DEPOK

JUNI 2012



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGEMBANGAN *HYBRID SOLAR CELL* DENGAN
*THERMOELECTRIC GENERATOR***

SKRIPSI

**Diajukan sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar sarjana teknik**

ANNISA NURULIANTHY

0806454613

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

DEPOK

JUNI 2012

HALAMAN PERNYATAN ORISINALITAS

Skripsi ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Annisa Nurulianthy

NPM : 0806454613

Tanda Tangan :



Tanggal : 18 Juni 2012

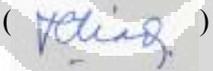


HALAMAN PENGESAHAN

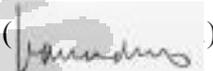
Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : Annisa Nurulianthy
NPM : 0806454613
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tesis : Pengembangan *Hybrid Solar Cell* dengan
Thermoelectric Generator

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Prof. Dr-Ing. Ir. Nandy Putra ()

Penguji : Prof. Dr. Ir. Raldi Artono Koestoer DEA ()

Penguji : Dr. Ir. R. Danardono Agus S DEA. PE ()

Penguji : Dr. Agus S. Pamitran, ST, M.Eng. ()

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 18 Juni 2012

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan atas kehadiran Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis berkesempatan untuk menyelesaikan penelitian berjudul “Pengembangan *Hybrid Solar Cell* dengan Termoelektrik Generator”. Terima kasih juga saya ucapkan kepada :

1. Orang tua, Hady, Aziz, Caca, Mba Dini, dan keluarga yang telah mendukung dan terus memberikan semangat kepada penulis.
2. Prof. Dr-Ing. Ir. Nandy Putra dosen pembimbing yang telah bersedia meluangkan waktu untuk memberikan banyak pengarahan, masukan, diskusi, dan bimbingannya sehingga skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik.
3. Ir. Warjito M.Sc, Ph.D selaku pembimbing akademis yang banyak memberikan arahan dan masukan selama proses perkuliahan penulis
4. Dr. Ir. Harinaldi selaku kepala Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia serta segenap dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia yang telah membagikan ilmu dan pengetahuannya kepada penulis.
5. Cemes-cemes 2008 Sonia Tzarina, Dea Adreanni, Ratna Purnamasari, Sri Lestari Maharani, Indah Puspitasari, Anisa Fitriyani, Ragil Tri Indrawati, Rachmi Satarsyah, dan Ade Gratia, cemes 2005-2011 yang telah mengisi hari-hari penulis dengan penuh kenangan.
6. Zein, Retsa Anugrah, Rio Wirawan, Ashar Okta, Bimo Sakti, Gerry Julian, Ary Maulana yang bersama-sama saling mendukung untuk penyelesaian skripsi ini dalam suka maupun duka.
7. Teman-teman penghuni Lab Applied Heat Transfer kak Ridho, kak Hedri, kak Iman, Ibu Yuyu, Ibu Dinni, Ibu Ayie, Mas Wayan Nata, Pak Bro Mulya, Pak Hadi, Mas Agung, Andy, dan Enggar yang telah membantu penulis melakukan penelitian ini.
8. Edwin, Ruska, Satrio, Elfan dan Rangga yang saling mengingatkan dalam mengerjakan skripsi ini.

9. Iwan, Pak Rully, dan Pak Idrus yang telah meminjamkan alat pembaca cuaca *weatherlink*.
10. Timi, Evrin, Anne, Dania, Widi, Dita, Dinda, dan Shodiq yang telah menemani penulis sehari-hari di kostan selama jauh dari rumah.
11. Rekan-rekan Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia angkatan 2008 yang telah bersama-sama menjalani kehidupan empat tahun yang tak terlupakan ini.

Akhir kata, penulis berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga thesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 12 Juni 2012

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS
AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Annisa Nurulianthy

NPM : 0806454613

Program Studi : Teknik Mesin

Departemen : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Skripsi

demikian demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

*PENGEMBANGAN HYBRID SOLAR CELL DENGAN
TERMOELEKTRIK GENERATOR*

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 12 Juni 2012

Yang menyatakan



(Annisa Nurulianthy)

ABSTRAK

Nama : Annisa Nurulianthy

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Pengembangan *Hybrid Solar Cell* dengan *Thermoelectric Generator*

Energi matahari dapat dimanfaatkan sebagai energi alternatif baik radiasi maupun termalnya untuk memenuhi kebutuhan energi sehari-hari. Salah satu alat yang dapat digunakan adalah *hybrid solar cell* yang mengonversikan radiasi matahari menjadi listrik menggunakan *solar cell* dan dikombinasikan dengan modul termoelektrik untuk mengonversikan kalor matahari menjadi daya listrik tambahan untuk meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi matahari. Pada penelitian ini dilakukan pengujian terhadap rangkaian seri, parallel, seri-paralel dari susunan modul termoelektrik yang akan memberikan hasil paling optimal dan jarak antara prototype *hybrid solar cell* terhadap sumber energi sebesar 20cm, 25cm, 30cm, 35 cm, dan 40cm dan kemudian membandingkan besarnya keluaran tegangan dan daya yang dihasilkan dari *hybrid solar cell* dengan *solar cell* biasa pada pengujian lapangan. Hasil pengujian menunjukkan bahwa rangkaian seri memberikan daya terbesar dengan jarak optimal 40cm. Pengujian ini juga menunjukkan bahwa *hybrid solar cell* dapat menghasilkan 8,75% kali lipat daya listrik yang lebih besar daripada *solar cell* biasa.

Kata Kunci :

Hybrid solar cell, modul termoelektrik, generator termoelektrik, *solar cell*.

ABSTRACT

Name : Annisa Nurulianthy

Study Program: Mechanical Engineering

Title : Hybrid Solar Cell Development with Thermoelectric Generator

Solar energy can be exploited as an alternative energy both the radiation and thermal to fulfill daily energy need. One device that can be used is hybrid solar cell that converts solar radiation into electricity using solar cell and combined with thermoelectric device to convert solar thermal into additional power in order to increase the efficiency of solar energy. This research is doing some tests to series, parallel, series-parallel circuit of thermoelectric devices array that will give the most optimal result and distance between the hybrid solar cell prototype and the energy sources as long as 20cm, 25cm, 30cm, 35cm, and 40 cm, and then compare the voltage and power output of hybrid solar cell with conventional solar cell in field experiment. The experiment result shows that series circuit will give the biggest power with the optimal distance of 40cm. This experiment also shows that hybrid solar cell can produce 8,75% times more of electric power than conventional solar cell.

Keywords :

Hybrid solar cell, Thermoelectric Device, Thermoelectric Generator, Solar Cell.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR.....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB 1 PENDAHULUAN.....	1
1.1 LATAR BELAKANG	1
1.2 PERUMUSAN MASALAH.....	4
1.3 TUJUAN	4
1.4 BATASAN MASALAH.....	5
1.5 METODOLOGI PENELITIAN	5
1.6 SISTEMATIKA PENULISAN	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	8
2.1 HYBRID SOLAR CELL	8
2.2 ELEMEN TERMOELEKTRIK.....	13
2.2.1 TEORI DASAR TERMOELEKTRIK.....	13
2.2.2 <i>THERMOELECTRIC GENERATOR</i> DENGAN ΔT RENDAH	15
2.2.3 PENDINGINAN MODUL TERMOELEKTRIK.....	18

2.2.3.1	<i>Heat Sink</i>	18
2.2.3.2	<i>Heat pipe</i>	19
2.2.3.3	Sistem Pendinginan Dengan Air	20
2.3	KARAKTERISTIK ENERGI MATAHARI TERHADAP BUMI	21
2.3.1	RADIASI MATAHARI	21
2.3.2	LOKASI BUMI TERHADAP MATAHARI DAN PENGARUHNYA.....	23
BAB 3	METODE PENELITIAN	25
3.1	PENELITIAN	25
3.2	INSTALASI ALAT UJI.....	27
3.3	SKEMA PENGUJIAN	31
3.4.1	Pengujian Laboratorium.....	32
3.4.2	Pengujian Lapangan.....	35
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	37
4.1	VARIASI RANGKAIAN.....	37
4.2	VARIASI JARAK	46
4.3	PENGUJIAN LAPANGAN	54
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN.....	63
5.1	KESIMPULAN.....	63
5.2	SARAN	64
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN	68

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Bagan konsumsi energi nasional tahun 2008 [1].....	1
Gambar 1.2 Skema pemanfaatan energi matahari (solar energy) [2]	2
Gambar 2. 1 <i>Hybrid</i> PV/T plat datar [4]	9
Gambar 2. 2 <i>Hybrid solar cell</i> dengan konzentrador parabola [2]	9
Gambar 2. 3 Tipe-tipe kolektor PV/T berdasarkan fluida yang mengalir [4]	10
Gambar 2. 4 <i>Solar air</i> PV/T [2].....	11
Gambar 2. 5 Tipe <i>hybrid solar cell</i> berdasarkan penutupnya [2]	12
Gambar 2. 6 Modul termoelektrik sebagai (a) pendingin atau TEC dan (b) generator termoelektrik [7].....	14
Gambar 2. 7 Pembangkit listrik termoelektrik [8].....	16
Gambar 2. 8 Skema pembangkit listrik kolektor surya termoelektrik pada atap [9]	18
Gambar 2. 9 <i>Heat sink</i>	19
Gambar 2. 10 <i>heat pipe</i> [2].....	20
Gambar 2. 11 <i>Water block</i> [10]	21
Gambar 2. 12 Bagian utama dari matahari [12]	22
Gambar 2. 13 Peta radiasi matahari yang diterima di bumi [14].....	23
Gambar 3. 1 Tahapan penelitian	25
Gambar 3. 2 <i>Solar cell</i>	28
Gambar 3. 3 Modul termoelektrik	29
Gambar 3. 4 <i>Heat sink</i>	30
Gambar 3. 5 Susunan prototipe hybrid solar cell.....	30
Gambar 3. 6 Prototipe Hybrid Solar Cell.....	31
Gambar 3. 7 Pengaturan pengujian berbasis laboratorium.....	33
Gambar 3. 8 Pengaturan pengujian berbasis lapangan.....	35
Gambar 4. 1 Grafik perbandingan hasil tegangan modul termoelektrik terhadap ΔT	38

Gambar 4. 2 Grafik Perbandingan Daya Termoelektrik terhadap ΔT pada pengujian dengan variabel rangkaian.....	39
Gambar 4. 3 Perbandingan tegangan (a) dan daya (b) yang dihasilkan dari termoelektrik dengan variabel rangkaian [16].....	40
Gambar 4. 4 Grafik perbandingan tegangan cell terhadap waktu pada pengujian dengan variabel rangkaian modul termoelektrik	41
Gambar 4. 5 Grafik perbandingan daya solar cell terhadap waktu pada pengujian dengan variabel rangkaian modul termoelektrik	43
Gambar 4. 6 Grafik perbandingan daya total terhadap waktu pada pengujian dengan variabel rangkaian modul termoelektrik	45
Gambar 4. 7 Grafik perbandingan hasil pengujian laboratorium variasi jarak tegangan modul termoelektrik terhadap ΔT	47
Gambar 4. 8 Grafik perbandingan daya termoelektrik vs ΔT pada pengujian dengan variabel jarak	49
Gambar 4. 9 Grafik perbandingan tegangan solar cell vs waktu pada pengujian dengan variabel jarak	50
Gambar 4. 10 Grafik perbandingan daya solar cell vs waktu pada pengujian dengan variabel jarak	52
Gambar 4. 11 Grafik perbandingan daya total vs waktu pada pengujian dengan variabel jarak	53
Gambar 4. 12 Grafik perbandingan hasil tegangan modul termoelektrik terhadap ΔT pada field experiment	56
Gambar 4. 13 Grafik perbandingan daya termoelektrik terhadap ΔT pada pengujian lapangan	57
Gambar 4. 14 Grafik perbandingan tegangan <i>solar cell</i> terhadap waktu pada pengujian lapangan	59
Gambar 4. 15 Grafik perbandingan daya <i>solar cell</i> terhadap waktu pada pengujian lapangan.....	60
Gambar 4. 16 Grafik perbandingan daya keseluruhan terhadap waktu pada pengujian lapangan	61

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Efisiensi pemanfaatan dari solar thermal, photovoltaic, dan gabungan atau hybrid (4).....	11
Tabel 3. 1 Matriks Eksperimen Hybrid Solar Cell	26

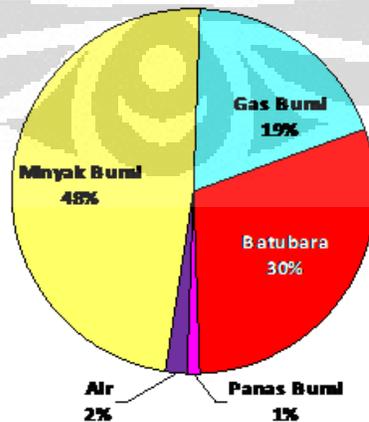


BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 LATAR BELAKANG

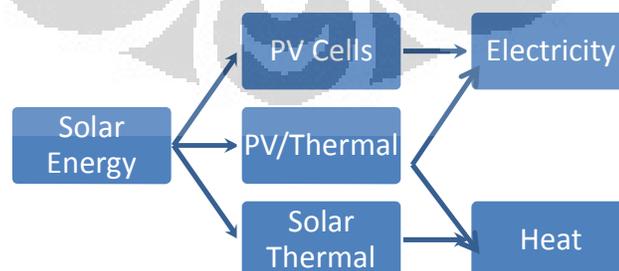
Energi tidak lepas dari kehidupan makhluk hidup dalam menjalankan aktivitas sehari-hari. Kebutuhan akan energi semakin meningkat seiring dengan berkembangnya teknologi. Akan tetapi, tidak semua sumber energi yang dimanfaatkan dapat diperbarui sehingga suatu saat sumber energi ini akan habis, seperti halnya energi fosil. Energi fosil merupakan energi yang berasal dari sumber daya fosil seperti batu bara dan minyak bumi yang terjadi akibat adanya penimbunan fosil selama berjuta tahun lamanya. Ironisnya, energi fosil inilah yang paling banyak digunakan [1]. Berdasarkan Gambar 1.1, terlihat bahwa energi fosil seperti minyak bumi, gas bumi, dan batu bara mendominasi konsumsi energi hingga mencapai total 97%, sedangkan pemakaian energi terbarukan yang terdiri atas air dan panas bumi hanya mencapai 3% pada tahun 2008. Selain itu, eksploitasi sumber daya alam yang berlebihan juga berdampak pada rusaknya lingkungan terutama membesarnya lubang pada lapisan ozon yang melindungi bumi dari panas dan bahaya radiasi matahari. Untuk itu, pengembangan energi alternatif yang terbarukan dan ramah lingkungan perlu dilakukan demi terpenuhinya kebutuhan energi dan kelangsungan hidup tumbuhan, hewan, dan manusia.



Gambar 1.1 Bagan konsumsi energi nasional tahun 2008 [1]

Salah satu sumber energi yang dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan tersebut adalah energi matahari. Matahari memancarkan energinya melalui radiasi setiap saat tanpa henti. Energi matahari merupakan energi yang cukup mudah didapat terutama di Indonesia yang merupakan negara tropis. Penggunaan energi ini dapat dilakukan dengan memanfaatkan radiasi cahaya dan panasnya. Saat ini cukup banyak *solar cell* dan *solar collector* yang telah ditemukan dan beredar di pasaran. Bahkan pada beberapa tahun terakhir, pemanfaatan *solar cell* dan *solar collector* digabung sehingga menghasilkan *hybrid solar cell* yang dapat memanfaatkan radiasi cahaya dan panas matahari sekaligus.

Pada *solar cell* biasa, hanya radiasi matahari saja yang dimanfaatkan melalui *photovoltaic* untuk menghasilkan listrik. Sayangnya, panas dari matahari tidak dimanfaatkan. Sedangkan pada pemanfaatan *solar thermal* biasa, hanya panas matahari saja yang diserap untuk kemudian dimanfaatkan sebagai sumber panas yang dapat digunakan untuk kebutuhan rumah tangga dan industri. Padahal matahari mengandung kedua unsur tersebut, yaitu radiasi cahaya dan panas, sehingga sayang sekali jika energi yang digunakan hanyalah salah satu unsur tersebut. Oleh karena itu, dilakukanlah penggabungan pemanfaatan kedua jenis energi ini yang biasa disebut dengan pemanfaatan melalui *PV/Thermal* (*Photo voltaic/Thermal*) seperti pada gambar 1.2, dimana *PV/Thermal* ini akan menghasilkan listrik dari pemanfaatan radiasi melalui *solar cell* dan panas yang dapat dibangkitkan dari *solar thermal*.



Gambar 1.2 Skema pemanfaatan energi matahari (solar energy) [2]

PV/*Thermal* ini juga dikenal dengan *hybrid solar cell* yang dapat menangkap radiasi matahari dan panasnya. Pada umumnya, *hybrid solar cell* yang telah muncul terdiri atas *photovoltaic* sebagai penyerap radiasi cahaya matahari dan fluida seperti air atau udara sebagai media penyerapan termal matahari. Biasanya fluida air atau udara digunakan pada pemanas air atau digunakan juga sebagai pemanas ruangan, sehingga hasil yang didapat dari *hybrid solar cell* adalah berupa listrik dan termal. Namun dengan semakin banyaknya produk elektronik yang bermunculan menandakan bahwa semakin banyak pula energi listrik yang dibutuhkan untuk menjalankannya. Oleh karena itu, studi ini mencoba melakukan penelitian terhadap hasil termal yang didapat dari energi matahari untuk dikonversikan menjadi energi listrik dengan menggunakan termoelektrik. Hal ini dimaksudkan agar daya keluaran listrik yang didapat dengan menggunakan *hybrid solar cell* menjadi lebih besar sehingga dapat mendukung pemenuhan kebutuhan listrik sehari-hari dengan pemanfaatan sumber energi yang optimal.

Termoelektrik terdiri atas dua logam konduktor yang berbeda. Jika metal konduktor dalam sebuah rangkaian dipanaskan pada salah satu sisinya maka sisi ini akan menjadi aktif dan memiliki kecepatan transfer elektron yang lebih tinggi dibandingkan dengan sisi yang satunya. Hal ini akan menyebabkan timbulnya perbedaan potensial yang kemudian akan menghasilkan arus listrik. Hal inilah yang menjadi prinsip kerja dari modul termoelektrik atau dikenal juga dengan efek termoelektrik [3]. Oleh karena itu, pada pengujian ini sisi panas termoelektrik akan diletakkan langsung di bawah plat *solar cell* sebagai sumber panas dan di bawah sisi dingin termoelektrik diletakkan *heat sink* sebagai sistem pendingin sehingga terdapat perbedaan temperatur di antara kedua sisi tersebut. Perbedaan temperatur ini akan menghasilkan perbedaan potensial sehingga menghasilkan arus listrik yang dapat menambah daya keluaran listrik yang dihasilkan oleh sistem *hybrid solar cell* ini.

1.2 PERUMUSAN MASALAH

Energi yang berasal dari matahari dapat dimanfaatkan untuk memenuhi kebutuhan energi sehari-hari. Dalam melakukan pemanfaatannya, digunakan *solar photovoltaic* untuk memanfaatkan radiasi cahaya matahari dan *solar collector* untuk memanfaatkan panas dari matahari. Untuk mengoptimalkan dan meningkatkan efisiensi dari pemanfaatan energi matahari, dilakukan penggabungan pemanfaatan kedua jenis alat tersebut yaitu pemanfaatan radiasi cahaya dan kalor dari matahari, yang disebut dengan *hybrid solar cell*. Pada penelitian ini, *hybrid solar cell* dikombinasikan dengan empat termoelektrik yang diletakkan di bawah *photovoltaic* yang berfungsi sebagai *thermoelectric generator*. *Thermoelectric generator* ini diharapkan dapat membantu meningkatkan keluaran daya listrik dari *hybrid solar cell* yang tadinya hanya dihasilkan oleh *photovoltaic* saja.

1.3 TUJUAN

Tujuan dari penelitian yang dilakukan pada kali ini adalah:

1. Membuktikan bahwa radiasi cahaya dan panas matahari dapat dimanfaatkan secara bersamaan sebagai sumber energi.
2. Menguji apakah penggunaan termoelektrik yang diletakkan di bawah plat *photovoltaic* dapat meningkatkan keluaran daya listrik dari *solar cell* biasa.
3. Membandingkan daya output yang dihasilkan antara *solar cell* biasa dengan *hybrid solar cell*.
4. Menguji rangkaian yang tepat dari termoelektrik agar dapat menghasilkan daya yang lebih besar.
5. Membandingkan hasil pemasangan sudut orientasi *hybrid solar cell* efektif digunakan di Indonesia terutama di gedung Engineering Center Universitas Indonesia, Depok.
6. Mendapatkan jarak pemasangan lampu halogen pada pengujian laboratorium yang memberikan hasil keluaran yang terbaik.

1.4 BATASAN MASALAH

Dalam penelitian ini, batasan masalah meliputi:

1. Perancangan *hybrid solar cell* yang menggabungkan kedua jenis pemanfaatan energi matahari yaitu radiasi matahari dan panas matahari dengan menggunakan satu plat *solar cell* dan empat buah modul *thermoelectric*.
2. Penggunaan lampu halogen sebagai sumber panas dan sumber cahaya pada pengujian laboratorium.
3. Perancangan difokuskan hanya pada perancangan termal.

1.5 METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam melakukan penelitian ini, yaitu:

1. Studi Literatur

Studi literatur merupakan pembelajaran mengenai materi yang berkaitan dengan penelitian yang dilakukan yang berasal dari buku, jurnal, artikel, internet, dan skripsi.

2. Persiapan Alat Uji

Alat uji berupa *prototype hybrid solar cell* disiapkan untuk melakukan pengujian agar mendapatkan data penelitian yang diinginkan.

3. Pengujian Prototype Hybrid Solar Cell

Pengujian *prototype hybrid solar cell* ini merupakan kegiatan pengambilan data berupa temperatur dan tegangan yang dihasilkan untuk melihat karakteristik dari alat tersebut. Pengujian dilakukan dengan bantuan termokopel, kabel, dan *Data Acquisition (DAQ)*.

4. Analisis dan Kesimpulan Hasil Pengujian

Data yang didapatkan dari hasil pengujian kemudian diolah dan dianalisis yang disajikan dalam bentuk grafik dan tabel untuk

mengetahui kinerja dari alat tersebut. Kemudian ditariklah suatu kesimpulan yang merupakan hasil dari penelitian ini.

1.6 SISTEMATIKA PENULISAN

Penulisan skripsi ini terdiri atas lima bab yang disusun berdasarkan sistematika sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini merupakan pendahuluan dari penulisan skripsi yang berisi latar belakang mengenai penelitian, tujuan, perumusan masalah, batasan masalah, dan metodologi penulisan, dan sistematika penulisan.

BAB II LANDASAN TEORI

Bab ini membahas mengenai dasar teori apa saja yang digunakan dalam melakukan penelitian hybrid solar cell ini seperti teori dasar mengenai *Hybrid Solar Cell* dan perkembangannya, teori dasar mengenai modul termoelektrik.

BAB III METODE PENELITIAN

Bab ini membahas mengenai bagaimana bentuk, bagian, dan skema alat pengujian. Pada bab ini juga dibahas mengenai bagaimana prosedur dan metode yang digunakan dalam melakukan pengujian dan pengambilan data terhadap *hybrid solar cell* untuk melihat bagaimana kinerja dan karakteristik dari *hybrid solar cell* tersebut.

BAB IV PENGOLAHAN DATA DAN ANALISIS

Bab ini membahas mengenai pengolahan data dan analisis dari hasil pengujian alat *hybrid solar cell* yang telah

dilakukan dan kemudian disajikan dalam bentuk grafik dan tabel.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi mengenai kesimpulan dari hasil yang didapat atas pengujian alat *hybrid solar cell* ini dan saran yang diberikan terhadap kekurangan atas pengujian ini baik berupa perancangan alat, prosedur, maupun metode pengujian.



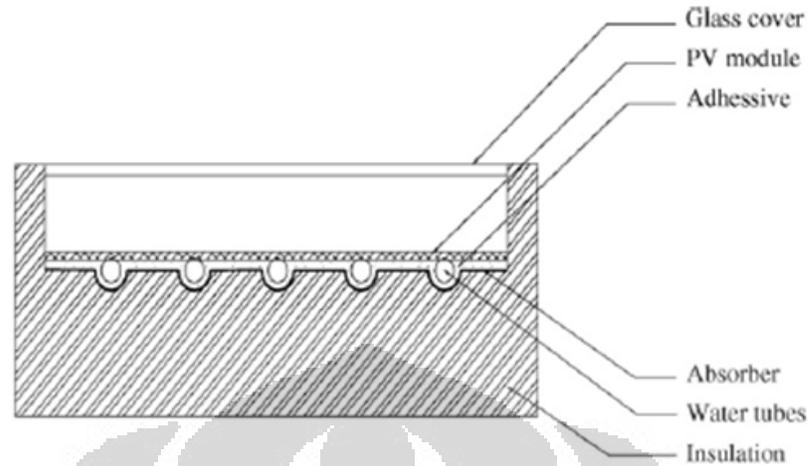
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

2.1 HYBRID SOLAR CELL

Hybrid solar cell dikenal juga sebagai *hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) collector* merupakan sebuah alat yang dapat mengonversikan energi matahari menjadi energi listrik dan kalor. *Hybrid solar cell* biasanya terdiri atas modul *photovoltaic* atau *solar cell* yang dibelakangnya diletakkan *absorber plate* atau plat penyerap panas sebagai alat untuk mengekstraksi kalor. *Solar cell* mengonversikan radiasi matahari menjadi listrik dengan puncak efisiensi yang mencapai 5-20% [4]. Plat penyerap di bawah *solar cell* memiliki dua fungsi pada sistem ini, yaitu untuk mendinginkan plat *solar cell* yang akan meningkatkan kinerja dari konversi listrik dan untuk mengumpulkan energi termal yang dihasilkan yang tadinya panas ini merupakan panas yang tidak terpakai dan terbuang ke lingkungan. Panas yang terkumpul ini dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan temperatur rendah seperti air panas yang digunakan untuk mandi atau mencuci.

Zondag et al. [5] menyatakan bahwa hasil konversi elektrik dan termal dari kombinasi PV/T ini lebih rendah daripada panel PV terpisah dan kolektor termal konvensional. Namun, kombinasi PV/T ini menghasilkan energi yang lebih banyak per satuan luas permukaan dibandingkan dengan satu panel surya dan satu solar kolektor yang bersebelahan.

Hybrid PV/T ini dapat berbentuk datar atau parabola (*concentrating*) yang kemudian diklasifikasikan berdasarkan tipe fluida yang bekerja, yaitu air atau udara. *Hybrid PV/T* plat datar bentuknya sama seperti kolektor plat datar biasa. Hanya saja pada *hybrid PV/T* plat datar ini terdapat *solar cell* yang diletakkan di atas plat penyerap metalik seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 1. Pada Gambar ini terlihat bahwa pada bagian penyerap terdapat pipa-pipa sebagai jalur untuk air yang mengalir. Dan terdapat insulasi yang bertujuan untuk mengisolasi termal.



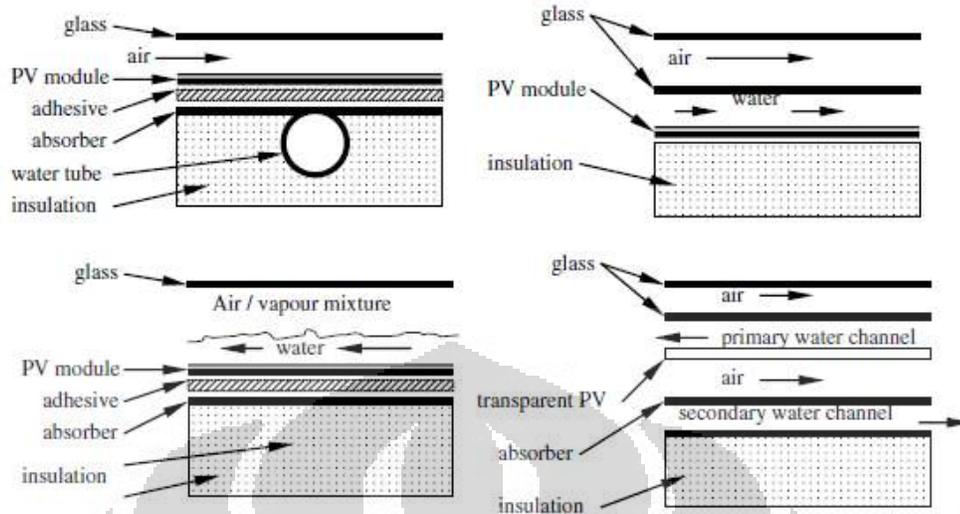
Gambar 2. 1 Hybrid PV/T plat datar [4]

Hybrid PV/T parabola merupakan PV/T yang memiliki konsentrator yang berbentuk parabola. Konsentrator ini bertujuan untuk meningkatkan tingkat radiasi matahari pada *solar cell* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 2. 2.



Gambar 2. 2 Hybrid solar cell dengan konsentrator parabola [2]

Berdasarkan fluida yang digunakan, ada beberapa jenis *hybrid solar cell*, yaitu air dan udara yang ditunjukkan pada Gambar 2. 3. Pada *solar cell* ini ada aliran fluida berupa udara atau gabungan antara air dan udara, di mana alirannya terletak di atas *absorber*.



Gambar 2.3 Tipe-tipe kolektor PV/T berdasarkan fluida yang mengalir [4]

Efisiensi termal (η_{th}) dari *solar cell* plat datar konvensional pada keadaan *steady* ditunjukkan oleh persamaan 2.1:

$$\eta_{th} = Q_u / G \quad (2.1)$$

Di mana, Q_u adalah kalor yang dikumpulkan oleh kolektor surya dan G adalah radiasi matahari.

Besarnya kalor yang dikumpulkan oleh kolektor surya merupakan perbedaan antara radiasi matahari yang terserap dan *heat loss* yang ditunjukkan oleh persamaan 2.2:

$$Q_u = \dot{m}C_p(T_o - T_i) = A_c[S - U_L(T_{p,m} - T_a)] \quad (2.2)$$

Di mana T_o merupakan temperatur outlet fluida dan T_i merupakan temperatur inlet fluida, $T_{p,m}$ merupakan temperatur rata-rata pada plat, dan T_a adalah temperatur ambient.

Sedangkan efisiensi elektrik (η_{el}) dari *solar cell* ditunjukkan oleh persamaan 2.3:

$$\eta_{el} = \frac{I_m V_m}{G A_c} \quad (2.3)$$

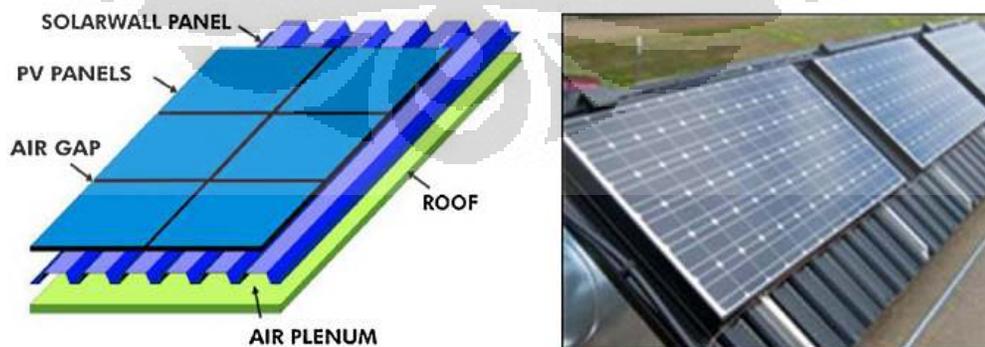
Di mana I_m merupakan arus maksimal dari *solar cell*, V_m merupakan tegangan maksimal *solar cell*, dan A_c merupakan luas dari *solar cell*.

Pada intinya, tujuan dari *hybrid solar cell* yaitu meningkatkan efisiensi dari modul *solar cell* biasa ataupun dari *solar collector* biasa tercapai, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. 1 berdasarkan Charalambous et al [4].

Tabel 2. 1 Efisiensi pemanfaatan dari solar thermal, photovoltaic, dan gabungan atau hybrid [4]

Efficiency	Single-pass	Double-pass
Thermal	24-28%	32-34%
PV	6-7%	8-9%
Combined	30-35%	40-45%

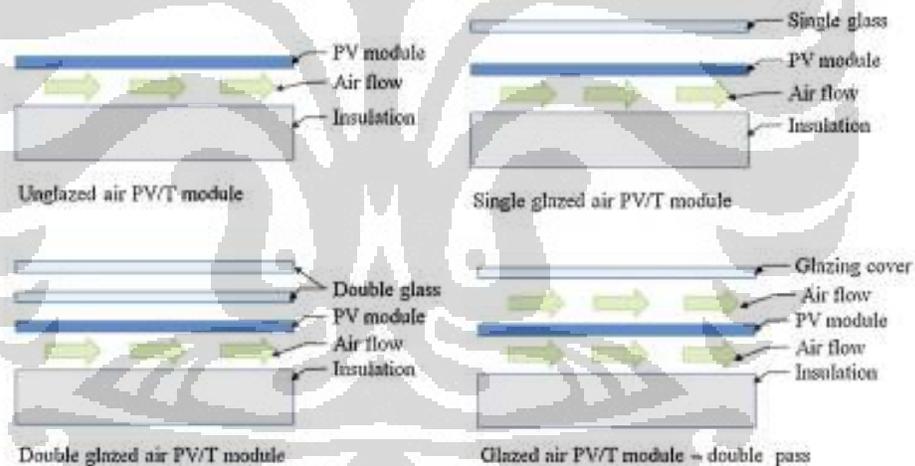
Saat ini penelitian dan pengembangan mengenai *hybrid solar cell* banyak dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan sumber energi alternative selain energi yang berasal dari fosil dan mengurangi kerusakan lingkungan karena energi matahari merupakan energi terbarukan yang hijau dan ramah lingkungan. Pada dasarnya, *hybrid solar cell* ini bertujuan untuk menggabungkan pemanfaatan radiasi dan panas dari matahari agar energi matahari yang dikonversikan bisa menjadi lebih besar. Salah satu contoh hybrid solar cell adalah *solar cell* yang dibawahnya juga diberikan jalur-jalur sebagai jalur untuk menghangatkan udara seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 4.



Gambar 2. 4 Solar air PV/T [2]

Keuntungan dari *hybrid solar cell* dengan fluida udara [6] adalah tidak akan terjadi pembekuan dan pendidihan dari fluida, serta tidak akan menyebabkan kerusakan jika terjadi kebocoran. Hanya saja udara memiliki kapasitas kalor dan konduktivitas kalor yang rendah sehingga tingkat perpindahan panasnya juga rendah. Selain itu, sistem ini juga memiliki tingkat *heat losses* yang cukup tinggi.

Tipe-tipe *hybrid solar cell* juga dapat dibedakan pada penutupnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 5. Terdapat modul *hybrid solar cell* dengan penutup atau yang lebih dikenal dengan *glazed covered* dan ada pula *hybrid solar cell* tanpa penutup yang dikenal dengan *unglazed covered*. Penggunaan penutup yang terbuat dari kaca biasanya bertujuan untuk mengurangi *heat losses* yang terjadi. Akan tetapi, keberadaan penutup kaca ini dapat mengurangi kinerja elektrik dari *hybrid solar cell* karena terdapat *losses* akibat refleksi yang dipantulkan oleh kaca [6].



Gambar 2. 5 Tipe *hybrid solar cell* berdasarkan penutupnya [2]

Namun pada akhirnya, yang pemilihan penggunaan atau tidaknya penutup kaca ini adalah menemukan kombinasi yang tepat dan seimbang antara peningkatan termal di satu sisi dan penurunan elektrikalnya di sisi lain.

2.2 ELEMEN TERMOELEKTRIK

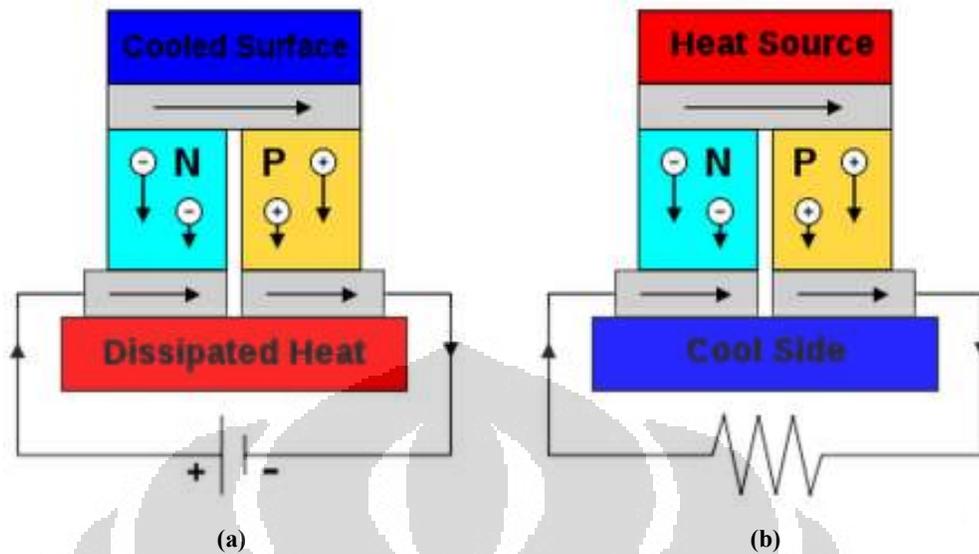
2.2.1 TEORI DASAR TERMOELEKTRIK

Pada tahun 1821, Thomas Johann Seebeck menemukan bahwa perbedaan atau gradient termal yang terbentuk di antara dua konduktor berbeda akan menghasilkan tegangan. Perbedaan temperatur pada sebuah material konduktor akan menyebabkan terjadinya aliran panas. Hal ini akan menyebabkan terjadinya perpindahan elektron juga. Jika suatu metal dalam sebuah rangkaian dipanaskan pada salah satu sisinya maka sisi ini akan menjadi aktif dan memiliki kecepatan transfer elektron yang lebih tinggi dibandingkan dengan sisi yang satunya. Hal ini akan menyebabkan timbulnya perbedaan potensial yang kemudian akan menghasilkan arus listrik. Fenomena inilah yang kemudian dikenal dengan efek Seebeck atau dikenal juga dengan efek termoelektrik [3].

Bila suatu semikonduktor tipe-p dan tipe-n terhubung dalam suatu rangkaian listrik dan terdapat beban dalam rangkaian tertutup tersebut, maka perbedaan suhu yang diterima pada kedua sisi *junction* dari dua semikonduktor tersebut, menyebabkan adanya arus listrik yang timbul sebagai akibat perpindahan electron dari sisi panas menuju sisi dingin jika dikenakan suatu beban dalam rangkaian listrik tersebut.

Lalu ada tahun 1834, Jean Charles Athanese Peltier menemukan hal yang berkebalikan dari penemuan Seebeck. Peltier menemukan bahwa jika arus listrik diberikan kepada rangkaian tertutup yang terdiri dari dua konduktor yang berbeda, maka pada rangkaian tersebut akan terjadi penyerapan kalor pada satu sisi dan pelepasan kalor pada sisi yang lainnya.

Termoelektrik merupakan salah satu teknologi *solid state* di mana pada termoelektrik ini tidak ada bagian yang bergerak ataupun fluida yang mengalir dan relative lebih ramah lingkungan. Saat ini modul termoelektrik telah banyak digunakan untuk berbagai aplikasi sebagai pendingin termoelektrik atau lebih dikenal dengan TEC dengan memanfaatkan efek Peltier dan sebagai generator termoelektrik atau biasa disebut sebagai TEG yang berfungsi sebagai pembangkit listrik dengan menerapkan efek Seebeck.



Gambar 2. 6 Modul termoelektrik sebagai (a) pendingin atau TEC dan (b) generator termoelektrik [7]

Kinerja termoelektrik dapat diukur melalui *figure of merit* atau Z yang merupakan kombinasi dari sifat-sifat material termoelektrik. Sifat-sifat yang menandakan bahwa material termoelektrik tersebut baik adalah konduktivitas elektrik yang tinggi, koefisien Seebeck yang besar, dan konduktivitas termoelektrik yang rendah. Konduktivitas elektrik tinggi ditujukan untuk mengurangi pemanasan Joule, maksudnya untuk mengurangi peningkatan temperatur yang diakibatkan dari tahanan listrik ketika arus mengalir melaluinya. Sedangkan koefisien Seebeck yang besar akan memberikan konversi maksimal dari kalor menjadi energi listrik atau dari energi listrik menjadi kinerja pendinginan. Konduktivitas termal yang rendah bertujuan untuk mencegah terjadinya konduksi termal di sepanjang material. Nilai *figure of merit* ini dicapai dengan persamaan 2.4.

$$Z = \alpha^2 \sigma / \lambda \quad (2.4)$$

Di mana Z merupakan *figure of merit*, α adalah koefisien Seebeck dari material tersebut, σ merupakan konduktivitas elektrik, dan λ merupakan konduktivitas termal.

Dalam pendinginan dengan termoelektrik (TEC), besarnya COP atau *Coefficient of Performance* merupakan jumlah untuk pengukuran efisiensi dari konversi. COP maksimal dari TEC dinyatakan pada persamaan 2.5(2. 5).

$$COP_{max} = \left[\frac{Q_c}{P} \right] = \left[\frac{T_c}{T_h - T_c} \right] \cdot \left[\frac{(1 + Z^* \bar{T})^{1/2} - \frac{T_h}{T_c}}{(1 + Z^* \bar{T})^{1/2} + 1} \right] \quad (2.5)$$

Q_c merupakan kapasitas pendinginan dan P adalah daya listrik.

Efisiensi maksimal dari modul termoelektrik sebagai pembangkit listrik (TEG) dapat dihitung dengan persamaan 2.6.

$$\eta_{max} = \left[\frac{T_h - T_c}{T_h} \right] \left[\frac{(1 - Z^* \bar{T})^{1/2} - 1}{(1 - Z^* \bar{T})^{1/2} + 1} \right] \quad (2.6)$$

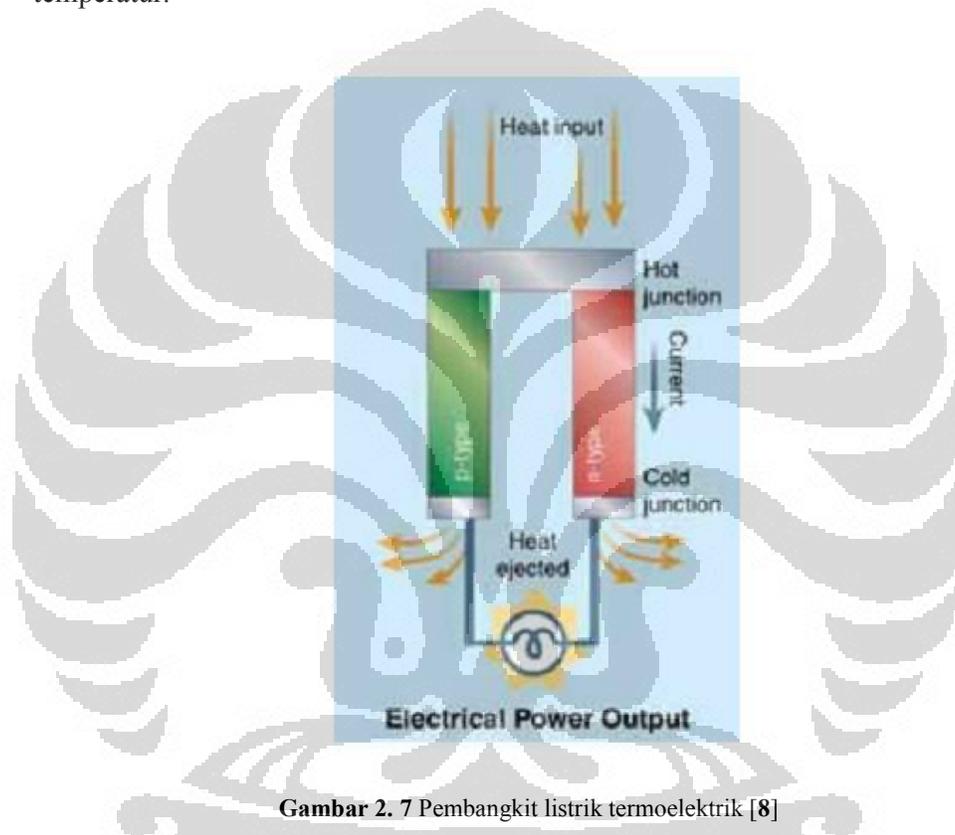
Di mana Z^* merupakan nilai optimal Z, T_h dan T_c merupakan temperatur sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik, sedangkan \bar{T} merupakan rata-rata dari T_h dan T_c .

2.2.2 THERMOELECTRIC GENERATOR DENGAN ΔT RENDAH

Pembangkit listrik termoelektrik didasarkan pada efek Seebeck yang menyatakan bahwa jika kalor diberikan kepada sebuah sirkuit pada *junction* atau penghubung dari dua konduktor berbeda, maka akan terjadi arus. [8] Thomas Johann Seebeck meneliti bahwa besarnya tegangan yang dihasilkan sebanding dengan perbedaan temperaturnya dan bergantung pada tipe dari material konduksinya, namun tidak terpengaruh oleh distribusi temperatur pada sepanjang konduktornya. Koefisien Seebeck adalah besarnya tegangan yang dihasilkan pada sirkuit terbuka di antara dua titik pada sebuah konduktor ketika diberikan perbedaan temperatur yang sama sebesar 1 K di antara kedua titik tersebut.

TEG sederhana terdiri atas termokopel yang tersusun dari elemen n-type dan p-type yang terhubung dengan susunan seri secara elektrik dan susunan

parallel secara termal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 7. Elemen n-type merupakan elemen yang terdiri dari material dengan kelebihan electron, sedangkan elemen p-type adalah elemen yang terdiri dari material yang kekurangan electron. Panas diberikan pada satu sisi dan kemudian dibuang pada sisi lainnya. Hal ini akan menghasilkan tegangan terhadap pasangan termoelektrik tersebut. Besarnya tegangan yang dihasilkan akan sebanding dengan gradient temperatur.



Gambar 2. 7 Pembangkit listrik termoelektrik [8]

Salah satu potensi dari pemanfaatan *thermoelectric generator* adalah mengonversikan kalor yang rendah menjadi listrik. Sebagai contoh misalnya perbedaan antara temperatur udara yang mengalir sehari-hari dengan temperatur tanah yang relative konstan. Perbedaan temperatur yang didapat biasanya hanya berkisar pada 1 – 10K. Karena pada kasus seperti ini efisiensi termodinamikanya rendah, maka yang perlu dilakukan dalam membangkitkan listrik adalah dengan memindahkan jumlah kalor yang besar agar menghasilkan daya listrik yang lebih besar.

Efisiensi termal yang terdapat pada modul termoelektrik dapat ditunjukkan melalui persamaan 2.7.

$$\eta_t = \frac{I^2 R_{e,o}}{K \Delta T_{TE} + \alpha T_H I - \frac{1}{2} I^2 R_e} \quad (2.7)$$

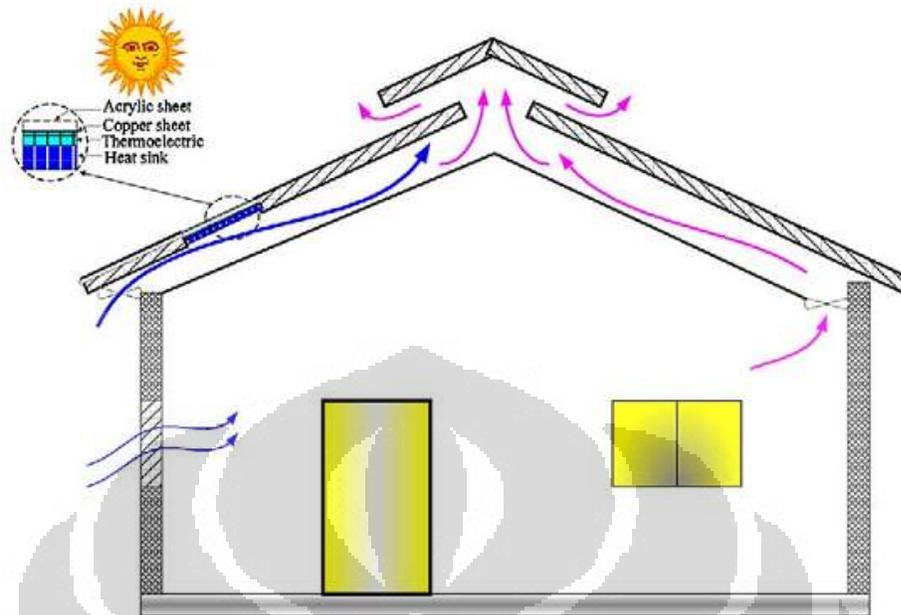
Dan efisiensi termal maksimum dapat dicapai dengan persamaan 2.8:

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_p} = \left(\frac{\rho_n k_p}{\rho_p k_n} \right)^{1/2} \quad (2.8)$$

Sedangkan daya maksimum ditunjukkan melalui persamaan 2.9.

$$\frac{\gamma_n}{\gamma_p} = \left(\frac{\rho_n}{\rho_p} \right)^{1/2} \quad (2.9)$$

Salah satu penelitian mengenai pemanfaatan termoelektrik ini dilakukan oleh Manewan et al. [9] yang memanfaatkan kalor dari matahari dengan menggunakan modul termoelektrik yang diletakkan di atap rumah. Pada penelitian Manewan et al. ini, di bagian atap rumah diletakkan termoelektrik yang berfungsi sebagai termoelektrik generator. Kemudian di bawah termoelektrik ini diletakkan *heat sink* sebagai pendingin modul termoelektrik. Modul termoelektrik digunakan untuk menghasilkan listrik yang dapat digunakan untuk menggerakkan kipas untuk mendinginkan modul termoelektrik dan membantu mengatur ventilasi di dalam ruangan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. 8. Selain itu, kelebihan energi listrik hasil konversi ini yang tidak terpakai dapat disimpan di dalam baterai untuk penggunaan pada malam hari.



Gambar 2. 8 Skema pembangkit listrik kolektor surya termoelektrik pada atap [9]

2.2.3 PENDINGINAN MODUL TERMOELEKTRIK

Modul termoelektrik akan menyerap kalor dari salah satu sisinya yang kemudian akan diteruskan ke sisi lainnya. Dalam hal pembangkit listrik, tujuan yang diinginkan adalah untuk mendapatkan tegangan dan daya yang sebesar-besarnya. Hal ini sangat bergantung kepada perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin dari modul termoelektrik tersebut. Untuk itu dilakukan usaha pendinginan agar sisi dingin dari termoelektrik mencapai temperatur yang lebih rendah sehingga perbedaan temperatur dengan sisi panasnya semakin tinggi. Ada beberapa metode yang dapat dilakukan untuk mendinginkan salah satu sisi modul termoelektrik, yaitu dengan *heat sink*, *heat pipe*, dan air.

2.2.3.1 Heat Sink

Heat sink bertujuan untuk menyerap panas dari sisi dingin modul termoelektrik agar temperaturnya menjadi lebih rendah. Oleh karena itu, *heat sink* sebaiknya memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan nilai hambatan termal yang rendah agar *heat sink* tersebut dapat mengalirkan kalor dari sisi dingin

modul termoelektrik dan mencegah agar tidak terjadi *overheat* pada penggunaan dengan temperatur tinggi. *Heat sink* ini merupakan sirip-sirip sebagai luasan tambahan atau lebih dikenal dengan *extended surface* yang dapat meningkatkan luas area perpindahan kalor sehingga perpindahan kalor yang dilakukan bisa lebih banyak dan lebih cepat. Penggunaan *heat sink* sebagai penyerap kalor dari sisi panas pendingin termoelektrik biasanya dikombinasikan dengan penggunaan kipas untuk mempercepat laju perpindahan kalor.

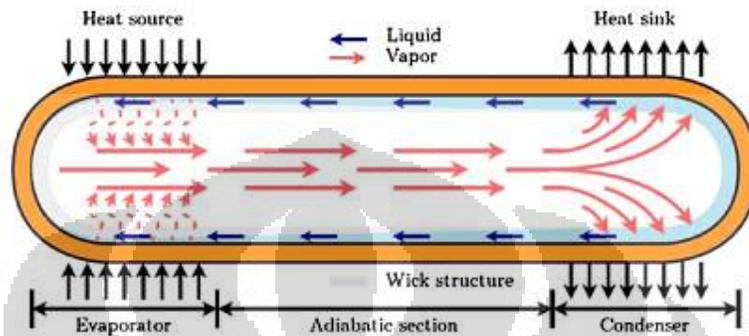


Gambar 2. 9 *Heat sink*

2.2.3.2 *Heat pipe*

Heat pipe merupakan salah satu dari alat penukar kalor yang bekerja berdasarkan perubahan fase yang dialami oleh fluida kerja yang digunakan pada *heat pipe* tersebut. Ada tiga komponen dasar pada *heat pipe*, yaitu *container*, *wick*, dan fluida kerja. *Container* merupakan wadah bagi fluida kerja dan menjadi isolator dari lingkungan luar. Fluida kerja yang bersifat mudah menguap akan menyerap kalor dari sumber panas pada bagian evaporator, perubahan temperatur yang dialami oleh fluida kerja mengakibatkan terjadinya peningkatan tekanan pada fluida kerja sehingga terjadi perubahan fase dari wujud cair menjadi uap. Uap yang terbentuk akan bergerak ke kondenser dan terjadi pelepasan kalor sehingga fluida kerja kembali ke wujud cair. Bagian yang menjadi ciri khas dari *heat pipe* adalah proses kembalinya fluida kerja dari kondenser ke evaporator. Untuk memungkinkan mekanisme aliran balik fluida kerja ini dibutuhkan *wick*

yang dirancang khusus. *Wick* merupakan struktur berongga yang terdapat pada bagian dalam dari *container* yang berfungsi untuk menghasilkan tekanan kapiler sebagai jalur bagi fluida kerja menuju evaporator. Cara kerja *heat pipe* tersebut ditunjukkan seperti pada Gambar 2. 10.



Gambar 2. 10 *Heat pipe* [2]

2.2.3.3 Sistem Pendinginan Dengan Air

Sistem berpendingin air ini merupakan sistem pendinginan dengan menggunakan *water block*. Sistem pendingin air ini merupakan salah satu metode untuk membuang panas dari suatu komponen dengan menggunakan air. Sistem pendinginan dengan air ini sudah umum digunakan untuk mendinginkan mesin pembakaran dalam pada kendaraan. Prinsip kerja sistem ini adalah penggunaan air untuk menyerap panas di *heat sink*. Prinsip kerjanya mirip dengan sistem radiator pada mobil. Pada sumber panas seperti misalnya prosesor dipasang blok air yang berisi banyak bilah tembaga/aluminium yang bertugas seperti *heat sink*, yaitu menyerap panas dari prosesor. Tetapi bedanya, bilah-bilah ini diletakkan dalam blok yang berisi air. Pada blok ini terdapat dua buah saluran, satu untuk masuk air dan yang lain untuk keluar air.



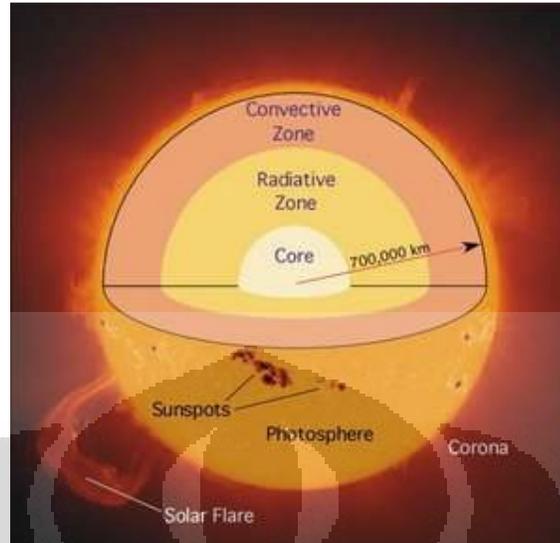
Gambar 2. 11 *Water block* [10]

Panas yang terdapat pada bilah-bilah tersebut diserap oleh air yang kemudian dibuang keluar dari blok air menuju reservoir atau penampung air melewati selang air. Air ini kemudian didinginkan dengan fan pendingin yang terdapat pada reservoir. Air dalam reservoir yang telah dingin kemudian dipompa oleh pompa air elektrik mini 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 fan.

2.3 KARAKTERISTIK ENERGI MATAHARI TERHADAP BUMI

2.3.1 RADIASI MATAHARI

Matahari menghasilkan energinya dari proses fusi pada inti matahari yang akan mengeluarkan energi yang sangat besar. Energi ini kemudian diteruskan ke *photosphere*, yang ditunjukkan pada Gambar 2. 12, atau permukaan radiasi matahari melalui zona konveksi. Pada *photosphere* ini energi dari matahari akan diradiasikan menuju luar angkasa. Radiasi matahari yang dikeluarkan pada umumnya adalah radiasi elektromagnetik meskipun terkadang dalam jumlah kecil juga dikeluarkan gelombang mikro, radio, dan X-ray [11].

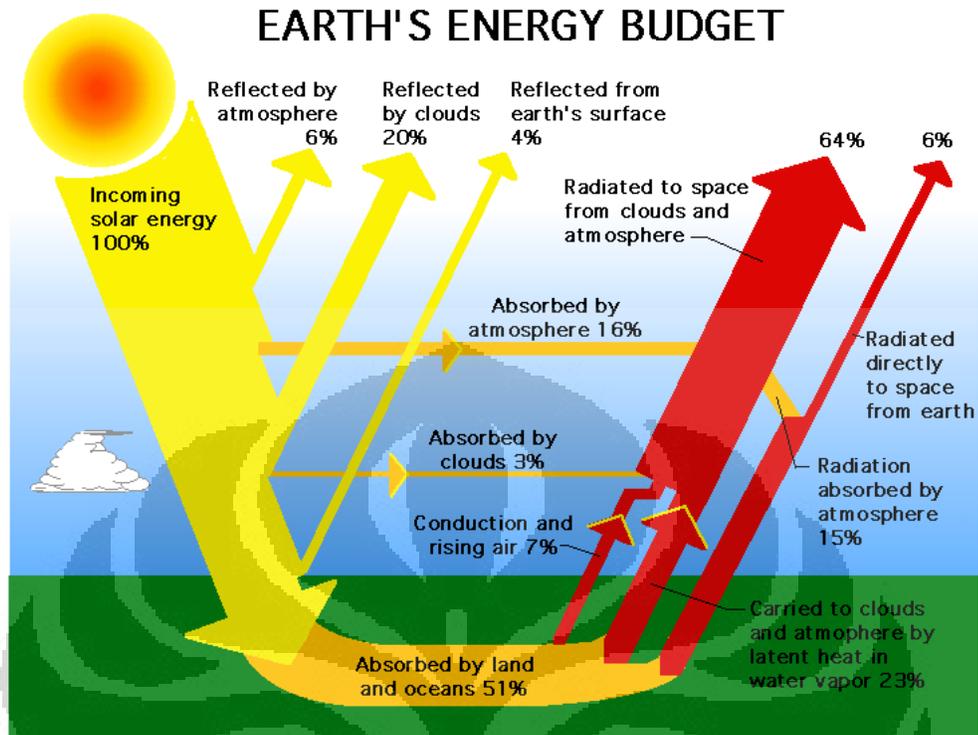


Gambar 2. 12 Bagian utama dari matahari [12]

Radiasi matahari terjadi akibat adanya gelombang elektromagnetik dengan karakteristik yang serupa. Namun, panjang gelombang masing-masing cahaya matahari berbeda-beda sehingga pengaruhnya pun berbeda. Panjang gelombang pada daerah infra merah, daerah mendekati infra merah, cahaya yang terlihat, dan sinar *ultraviolet* merupakan daerah panjang gelombang yang menghasilkan efek yang memanaskan. Oleh karena itu, panjang gelombang pada daerah ini didiferensiasikan sebagai radiasi panas yang terjadi pada $0,1 \times 10^{-6}$ m sampai dengan 100×10^{-6} m.

Pada dasarnya radiasi matahari besarnya konstan, hanya saja radiasi ini banyak mengalami reduksi saat memasuki atmosfer permukaan bumi. Intensitas radiasi matahari yang diterima oleh bumi di suatu tempat dipengaruhi oleh garis lintang lokasi (latitude), tanggal pengukuran pada kalender matahari, dan waktu pengukuran [13].

Secara umum, radiasi matahari yang jatuh pada suatu bidang permukaan terdiri dari dua jenis, yaitu radiasi langsung dan radiasi baur. Radiasi langsung merupakan radiasi matahari yang jatuh pada permukaan tanpa melalui permukaan yang lain. Sedangkan radiasi baur merupakan radiasi matahari yang jatuh pada suatu permukaan secara tidak langsung akibat pantulan terhadap bidang lain.



Gambar 2. 13 Peta radiasi matahari yang diterima di bumi [14]

Energi matahari tidak 100% diterima semua oleh bumi, ada beberapa persen energi yang direfleksikan dan terserap oleh atmosfer dan awan seperti yang ditunjukkan Gambar 2. 13. 6% energi matahari direfleksikan ke atmosfer, 20% direfleksikan oleh awan, 4% direfleksikan oleh permukaan bumi. Selain itu, 16% dari energi matahari yang datang diserap oleh atmosfer, 3%-nya diserap oleh awan, dan 51% sampai di permukaan dan kemudian diserap oleh daratan dan lautan di bumi.

2.3.2 LOKASI BUMI TERHADAP MATAHARI DAN PENGARUHNYA

Bumi bergerak mengelilingi matahari dengan orbit yang bentuknya menyerupai elips. Pergerakan bumi ini dikenal sebagai revolusi. Waktu yang dibutuhkan oleh bumi untuk satu kali revolusi adalah sekitar $365 \frac{1}{4}$ hari. Jarak rata-rata pusat bumi menuju matahari berkisar $1,5 \times 10^8$ km. Namun akibat kegiatan revolusi bumi ini, maka ada kalanya jarak bumi menjadi lebih dekat dan lebih jauh daripada jarak rata-rata ini. Jarak terdekat bumi dengan matahari atau

disebut juga dengan jarak perihelion memiliki jarak 98,3% dari jarak rata-rata bumi dengan matahari. Jarak perihelion ini terjadi di sekitar tanggal 4 Januari. Jarak terjauh bumi dengan matahari yang dikenal dengan jarak aphelion memiliki jarak 101,7% dari jarak rata-rata bumi dengan matahari. Jarak aphelion ini terjadi di sekitar tanggal 5 Juli. Karena kegiatan revolusi inilah, maka radiasi total matahari yang diterima oleh bumi pada bulan-bulan lain mencapai 7% lebih banyak dibandingkan jumlah radiasi yang diterima pada bulan Juli.

Selain mengelilingi matahari, bumi juga bergerak berputar pada sumbunya yang dikenal dengan rotasi. Sumbu rotasi bumi memiliki kemiringan sebesar $23,5^\circ$ terhadap orbit revolusinya. Hal ini menyebabkan posisi matahari terlihat berbeda-beda di setiap lokasi di bumi pada setiap waktu. Untuk menyederhanakannya, pengamat menganggap bahwa matahari merupakan sebuah titik sebagai sumber radiasi. Rotasi bumi memerlukan waktu selama 24 jam untuk memenuhi satu kali putarannya.

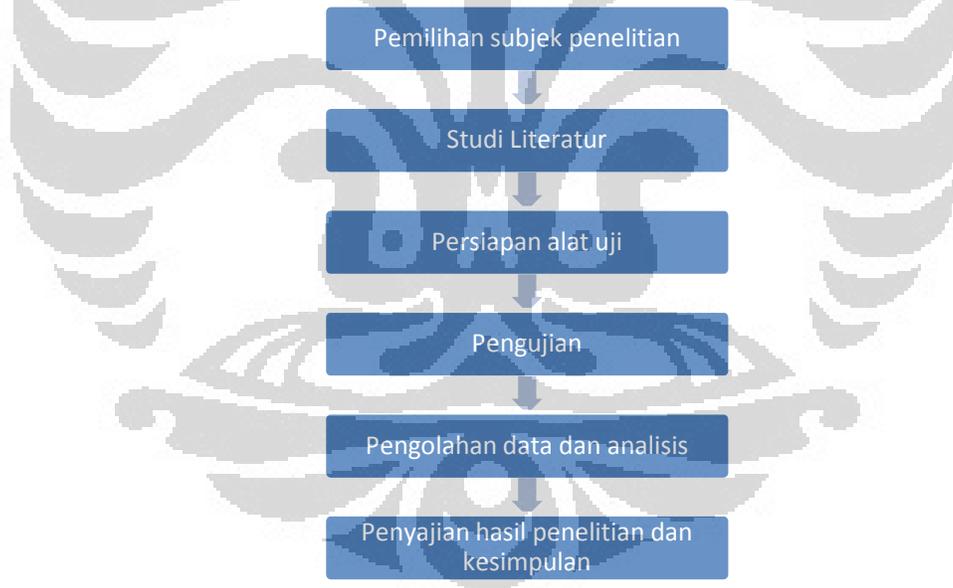
Lintasan bumi mengelilingi matahari atau orbit berbeda-beda tergantung dari lokasi pengamat. Garis yang tercipta antara bumi dan matahari ini disebut dengan latitude. Indonesia berlokasi di benua Asia di antara Samudra Pasifik dan Samudra Hindia yang terlentang di 6°LU hingga 11°LS dan 94° hingga 141° bujur timur.

Kota Depok berada pada garis lintang $6,3^\circ\text{LS}$. Hal ini berpengaruh terhadap sudut orientasi atau *tilt angle* yang digunakan untuk mengaplikasikan *solar cell*. Pada kondisi latitude optimum, sudut orientasinya adalah latitude lokasi ditambah 23° . Sedangkan daerah Indonesia, khususnya Jakarta relative mendapatkan jumlah energi radiasi yang konstan dalam setahun, sehingga sudut orientasi atau *tilt angle* dapat dicapai dengan latitude $+ 15^\circ$ [13].

BAB 3 METODE PENELITIAN

3.1 PENELITIAN

Metode yang dilakukan pada penelitian ini adalah eksperimental yang dilakukan dengan beberapa tahapan langkah seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.1. Penelitian ini dimulai dengan memilih subyek penelitian yang akan dilakukan. Setelah menentukan subyek penelitian, tahap selanjutnya adalah melakukan studi literature untuk mendapatkan pengetahuan mengenai subyek penelitian dan perkembangannya. Subyek penelitian yang dilakukan adalah mengenai *hybrid solar cell*. Dari hasil studi literature, kemudian diputuskan bahwa penelitian yang akan dilakukan adalah *hybrid solar cell* menggunakan modul termoelektrik sebagai generator untuk menghasilkan daya listrik tambahan.



Gambar 3. 1 Tahapan penelitian

Untuk melakukan pengujian, alat uji harus disiapkan terlebih dahulu. Alat uji yang akan digunakan untuk pengujian merupakan prototype dari *hybrid solar cell*. Pada dasarnya, prototype *hybrid solar cell* ini adalah penggabungan antara plat *solar cell* biasa dengan modul termoelektrik. Penggabungan ini membutuhkan *bracket* atau penjepit agar plat *solar cell* dan modul termoelektrik tidak terlepas.

Untuk itu, pembuatan *bracket* merupakan tahap selanjutnya pada persiapan alat uji. Setelah semua komponen dari alat uji siap digunakan, komponen tersebut kemudian diinstalasi sehingga menjadi sebuah prototype *hybrid solar cell*.

Setelah alat uji siap untuk digunakan, tahap selanjutnya merupakan proses pengambilan data. Pengujian yang dilakukan terdiri dari dua jenis eksperimen, yaitu eksperimen laboratorium dan eksperimen lapangan dengan variasi yang berbeda sesuai dengan yang ditunjukkan Tabel 3. 1. Kedua jenis eksperimen ini berbeda pada sumber energinya. Pada eksperimen lapangan, sumber cahaya dan panas yang digunakan langsung diambil dari matahari. Sedangkan pada eksperimen laboratorium, sumber cahaya dan panas yang digunakan diambil dari lampu halogen.

Tabel 3. 1 Matriks Eksperimen Hybrid Solar Cell

		Laboratorium Exp		Field Experiment
		20 W	50 W	
Rangkaian	Seri			
	paralel			
	Seri-paralel			
Jarak	20 cm			
	25 cm			
	30 cm			
	35 cm			
	40 cm			
sudut	0°			
	22°			

Pengujian yang dilakukan pertama-tama adalah pengujian laboratorium dengan variabel rangkaian modul termoelektrik. Pengujian ini merupakan pengujian terhadap keluaran daya dari hybrid solar cell dengan variabel rangkaian modul termoelektrik yang disusun secara seri, paralel, atau seri-paralel pada pengujian laboratorium. Pada pengujian ini digunakan lampu halogen 20 W dan 50 W sebagai sumber panas dan sumber cahaya dengan jarak 40 cm dari prototype dengan jarak 40 cm dari prototype *hybrid solar cell*. Setelah melakukan eksperimen ini, maka akan didapat data pada rangkain apa modul termoelektrik

akan menghasilkan daya yang paling besar untuk kemudian digunakan pada pengujian selanjutnya, yaitu pengujian lapangan.

Pengujian lapangan merupakan pengujian terhadap keluaran daya dari *hybrid solar cell* dengan sumber cahaya dan sumber panas yang berasal dari matahari. Pada pengujian ini rangkaian termoelektrik yang digunakan merupakan jenis rangkaian yang menghasilkan daya paling besar dari hasil pengujian laboratorium pertama. Pengujian lapangan dilakukan dengan dua jenis sudut orientasi *hybrid solar cell*, yaitu 0° dan 22° . Hal ini dimaksudkan untuk melihat apakah sudut orientasi akan mempengaruhi hasil keluaran daya dari prototype ini.

Setelah melakukan eksperimen lapangan, pengujian dilanjutkan kembali pada eksperimen laboratorium dengan variasi jarak untuk menentukan pada jarak berapa antara lampu halogen dan *hybrid solar cell* yang akan memberikan hasil terbaik dan mendekati kondisi seperti yang diberikan oleh keadaan lapangan. Pengujian dilakukan dengan membandingkan keluaran daya dari *hybrid solar cell* dengan sumber cahaya yang berasal dari lampu halogen 50 Watt pada jarak bervariasi yaitu 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, dan 40 cm. Jenis rangkaian modul termoelektrik yang digunakan merupakan rangkaian yang sama yang digunakan pada pengujian lapangan, yaitu berdasarkan hasil pengujian rangkaian terbaik yang didapat pada pengujian laboratorium yang pertama.

Setelah pengujian selesai dilakukan, data yang telah dikumpulkan kemudian diolah. Hasil dari pengolahan data ini kemudian dipresentasikan dalam bentuk grafik-grafik yang kemudian akan dianalisis. Setelah melakukan berbagai tahapan di atas, langkah terakhir yang dilakukan adalah penarikan kesimpulan mengenai hal-hal penting dari proses dan hasil pengujian ini.

3.2 INSTALASI ALAT UJI

Alat uji berupa prototype *hybrid solar cell* merupakan susunan dari beberapa komponen utama, yaitu satu plat *solar cell* atau *photovoltaic*, empat buah modul termoelektrik, *heat sink*, *bracket*, mur dan baut sebagai penguat rangkaian prototype, serta isolator termal berupa karet.

Solar cell yang digunakan, seperti ditunjukkan oleh Gambar 3.2, merupakan plat *photovoltaic* dengan tipe ETM500-3V berukuran 13,5 cm x 12 cm. *Solar cell* ini mampu memberikan perbedaan potensial yang dapat mencapai tegangan sekitar 3 Volt. *Solar cell* ini berfungsi untuk menghasilkan listrik akibat diberikannya cahaya terhadap plat *photovoltaic* tersebut.



Gambar 3. 2 *Solar cell*

Di bawah plat *solar cell* diletakkan modul termoelektrik agar panas matahari yang diterima oleh plat dapat memberikan kalor pada sisi panas termoelektrik sehingga sisi panasnya memiliki temperatur yang lebih tinggi. Modul termoelektrik ini berfungsi sebagai generator atau penghasil listrik akibat terjadinya perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik tersebut. Modul termoelektrik yang digunakan pada penelitian ini berukuran 40 x 40 x 3,5 mm, sesuai dengan yang ditunjukkan oleh Gambar 3.3, dengan jumlah empat buah modul agar sesuai dengan ukuran plat *solar cell*. Modul termoelektrik ini akan menghasilkan arus listrik searah atau DC yang besarnya sesuai dengan perbedaan temperatur antara kedua sisinya dan bergantung pada nilai Seebeck yang dimiliki oleh modul termoelektrik tersebut.

Modul-modul termoelektrik ini dihubungkan dengan menggunakan terminal kabel agar tersusun sesuai dengan rangkaian yang diinginkan, yaitu seri, paralel, dan seri-paralel. Rangkaian seri disusun dengan menghubungkan kabel negatif termoelektrik satu ke kabel positif termoelektrik dua dan seterusnya. Sedangkan rangkaian paralel disusun dengan menggabungkan masing-masing kabel-kabel positif dan kabel-kabel negative modul termoelektrik lalu dipasang ke

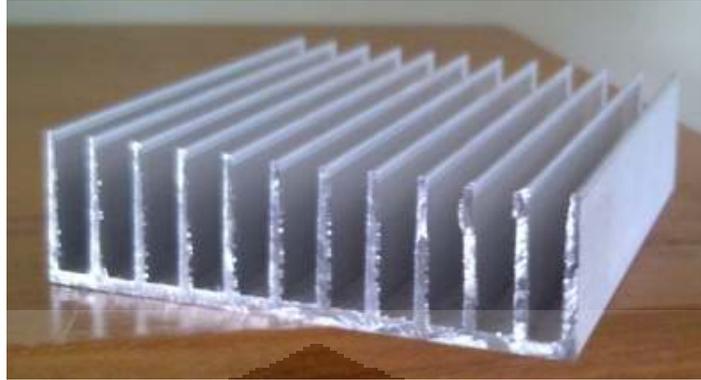
DAQ. Sedangkan rangkaian seri-paralel disusun dengan merangkai masing-masing dua modul termoelektrik secara paralel yang kemudian kedua rangkaian ini disusun secara seri baru dihubungkan dengan DAQ.



Gambar 3. 3 Modul termoelektrik

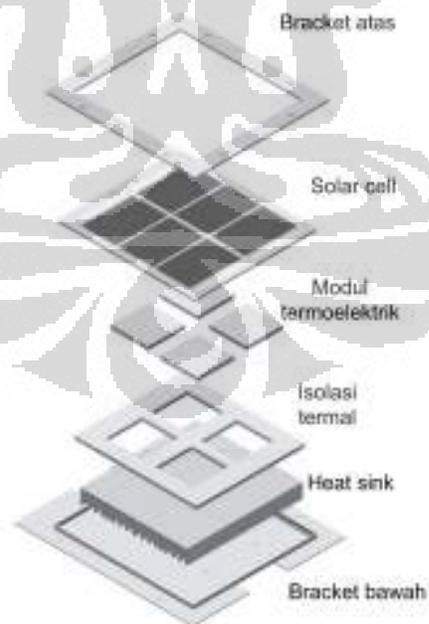
Di bawah plat *solar cell* juga diletakkan isolator termal di antara modul termoelektrik. Isolator ini bertujuan untuk menjaga agar panas dari plat *solar cell* tetap terpusat pada modul termoelektrik, mengurangi *heat loss* terhadap lingkungan, dan mengisi ruang kosong pada bagian bawah *solar cell* sehingga modul termoelektrik tidak goyang atau lepas. Isolator termal pada prototype ini terbuat dari karet yang dipotong hingga berukuran sebesar plat *solar cell* dengan lubang berbentuk kotak yang berukuran sesuai dengan modul termoelektrik di tengahnya sebagai tempat untuk modul termoelektrik.

Komponen selanjutnya adalah *heat sink* yang diletakkan di bawah sisi dingin modul termoelektrik. *Heat sink* yang digunakan terbuat dari aluminium berukuran 135 x 120 x 50 mm, dengan jarak *pitch* 10 mm seperti yang terlihat pada Gambar 3.4. *Heat sink* ini digunakan sebagai *fin* untuk membuang panas dari sisi dingin modul termoelektrik.



Gambar 3. 4 Heat sink

Setelah disusun, komponen-komponen di atas kemudian digabungkan dengan menggunakan *bracket*, mur, dan baut. *Bracket* digunakan untuk menjepit keseluruhan prototipe *hybrid solar cell* sehingga tersusun sesuai urutannya. Bracket terbuat dari acrylic yang dipotong sesuai ukuran dengan menggunakan *laser cutting*. *Bracket* dibuat menjadi dua bagian, yaitu *bracket* atas dan *bracket* bawah. Pada *bracket* ini, sisi-sisinya dilubangi sebagai lubang untuk mur dan baut. Mur dan baut digunakan sebagai pengencang agar *bracket* tidak lepas. Mur dan baut yang digunakan berjumlah empat pasang.



Gambar 3. 5 Susunan prototipe hybrid solar cell

Komponen-komponen di atas dirakit sesuai dengan susunan pada Gambar 3. 5 kemudian dikecangkan oleh mur dan baut hingga menjadi prototype *hybrid solar cell* yang ditunjukkan pada Gambar 3. 6.



Gambar 3. 6 Prototipe Hybrid Solar Cell

3.3 SKEMA PENGUJIAN

Pengujian yang dilakukan merupakan pengambilan data berupa data temperatur dan tegangan dari alat uji. Untuk pengambilan data temperatur pada prototype *hybrid solar cell* ini digunakan termokopel tipe K. Termokopel tipe K terdiri atas dua logam yaitu Chromel, Ni-Cr alloy dan dapat digunakan pada temperatur dengan rentang -200°C - 1200°C . Termokopel tipe K ini merupakan termokopel yang paling sering digunakan sehingga mudah untuk dicari. Kedua ujung kawat termokopel dililit satu-sama lain dan diletakkan di tempat yang diinginkan. Pengukuran dilakukan pada 11 titik pengukuran utama, yaitu sisi panas termoelektrik 1, 2, 3, dan 4 ($T_{\text{hot } 1}$, $T_{\text{hot } 2}$, $T_{\text{hot } 3}$, dan $T_{\text{hot } 4}$), sisi dingin termoelektrik ($T_{\text{cold } 1}$, $T_{\text{cold } 2}$, $T_{\text{cold } 3}$, dan $T_{\text{cold } 4}$), daerah di sekitar *fin* pada *heat sink* ($T_{\text{heat sink}}$), bagian bawah plat *solar cell* (T_{bp}), dan temperatur lingkungan (T_{ambient}). Karena di antara bagian bawah plat *solar cell*, kedua sisi termoelektrik, dan bagian atas *heat sink* diletakkan termokopel, maka terdapat sedikit rongga pada susunan prototype ini. Oleh karena itu, digunakan *thermal paste* yang berupa pasta silicon untuk menutup rongga dan mengurangi *heat loss*. Kemudian, ujung-

ujung kawat termokopel yang lain kemudian dihubungkan dengan modul temperatur NI-DAQ tipe 9101. Modul DAQ ini dipasang pada chasis yang kemudian dihubungkan ke komputer dengan koneksi USB.

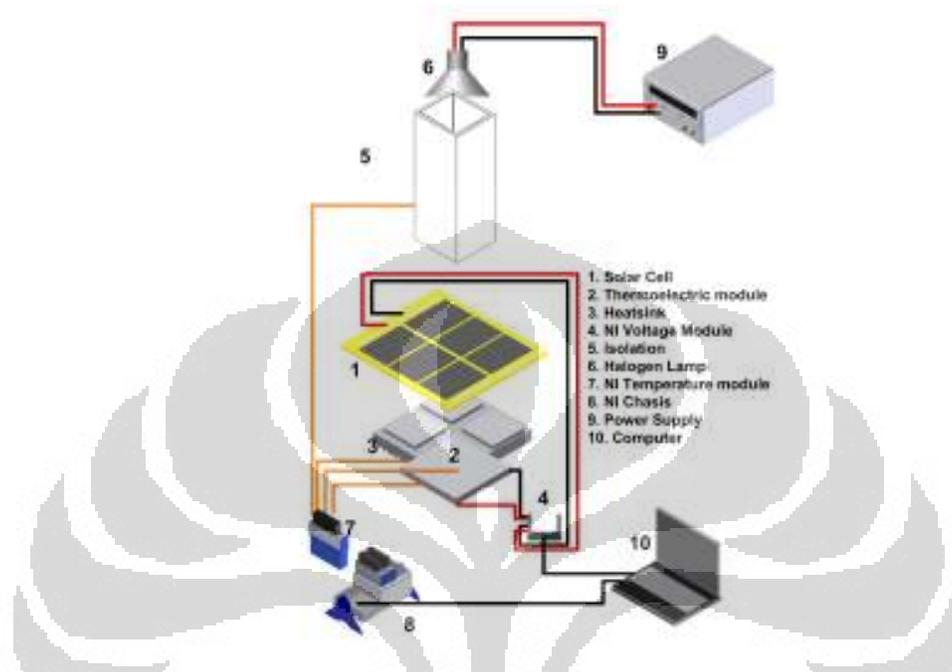
Sedangkan data beda potensial yang dibutuhkan adalah beda potensial yang dihasilkan dari *solar cell*, dan beda potensial yang dihasilkan dari rangkaian modul termoelektrik. Pengambilan data beda potensial menggunakan modul NI-DAQ tipe USB 6008 yang merupakan modul khusus untuk pengambilan data tegangan. Modul ini langsung dihubungkan ke komputer dengan koneksi USB tanpa harus dipasang pada chasis DAQ. Untuk itu, diperlukan kabel yang digunakan untuk menghubungkan *solar cell* dan rangkaian modul termoelektrik dengan DAQ. Kabel yang digunakan adalah AWG-16. Selain kabel, pengambilan data juga menggunakan terminal kabel untuk menghubungkan modul termoelektrik menjadi jenis rangkaian yang diinginkan. Pada masing-masing rangkaian, diberi resistor sebagai beban dengan hambatan 100 Ohm yang diletakkan pada ujung koneksi kabel ke DAQ. Karena pada prototype ini terdapat dua rangkaian terpisah, yaitu rangkaian modul termoelektrik dan *solar cell*, maka resistor yang digunakan berjumlah dua buah. Resistor digunakan untuk memudahkan pengolahan data dalam perhitungan arus yang dihasilkan dari prototype ini.

Pengujian yang dilakukan terbagi menjadi dua kategori, yaitu pengujian laboratorium dan pengujian lapangan. Oleh karena itu, terdapat dua metode dalam pengambilan data. Kedua metode ini pada dasarnya serupa, namun terdapat perbedaan pada sumber panas dan cahaya, sehingga terdapat beberapa komponen yang berbeda yang diperlukan dalam proses pengambilan data.

3.4.1 Pengujian Laboratorium

Pengujian laboratorium merupakan pengujian yang dilakukan di laboratorium dengan keadaan buatan yang mengadaptasi keadaan sebenarnya yang terjadi di lapangan. Oleh karena itu, pada pengujian laboratorium, perlu digunakan lampu halogen sebagai sumber cahaya dan panas, dan Styrofoam

sebagai isolasi sistem. Selain itu, pada pengujian laboratorium juga digunakan kipas sebagai bantuan untuk pendinginan modul termoelektrik.



Gambar 3. 7 Pengaturan pengujian berbasis laboratorium

Lampu halogen yang digunakan terdiri dari dua jenis daya, yaitu 20 Watt dan 50 Watt. Lampu ini dapat bekerja sesuai spesifikasi dengan tegangan 12 V. Lampu halogen memiliki sudut 26° , dengan tipe *closed dichroic*. Karena pada percobaan ini menggunakan lampu halogen, maka dibutuhkan pula *halogen lamp holder* yang dasarnya terbuat dari keramik sebagai isolator. Semakin lama lampu dinyalakan, maka temperaturnya pun akan semakin meningkat. Oleh karena itu, dibuat dudukan yang terbuat dari *polyurethane* karena kemampuannya yang tahan terhadap temperatur tinggi.

Selain lampu halogen, komponen tambahan yang diperlukan adalah isolator yang terbuat dari Styrofoam dengan tebal 1 cm yang dilapisi dengan Alumunium pada bagian dalamnya. Isolator ini bertujuan untuk mengurangi *losses* yang terjadi dan cahaya serta panas yang dihasilkan oleh lampu halogen terpusat pada prototype *hybrid solar cell* saja. Isolasi ini perlu digunakan karena ukuran lampu halogen jauh lebih kecil daripada matahari sehingga jangkauan cahaya dan panasnya tidak seberapa dibandingkan dengan energi yang dihasilkan

oleh matahari. Oleh karena itu, pada pengujian laboratorium, ditambahkan satu titik pengukuran yaitu temperatur pada bagian dalam isolasi Styrofoam (T_{isolasi}) sehingga pengukuran menjadi 12 titik.

Karena pengujian ini juga dilakukan di dalam laboratorium, maka dibutuhkan kipas yang digunakan sebagai bagian dari sistem pendinginan modul termoelektrik yang berfungsi untuk mengalirkan udara agar terjadi konveksi di sekitar *heat sink* sehingga terjadi perpindahan panas dari *heat sink* ke udara yang mengalir.

Komponen tambahan terakhir yang dibutuhkan pada penelitian ini adalah *power supply*. *Power supply* digunakan sebagai sumber listrik untuk menyalakan lampu halogen yang berperan sebagai sumber cahaya dan sumber panas pada prototype *hybrid solar cell*, dan menggerakkan kipas yang termasuk dalam sistem pendinginan modul termoelektrik.

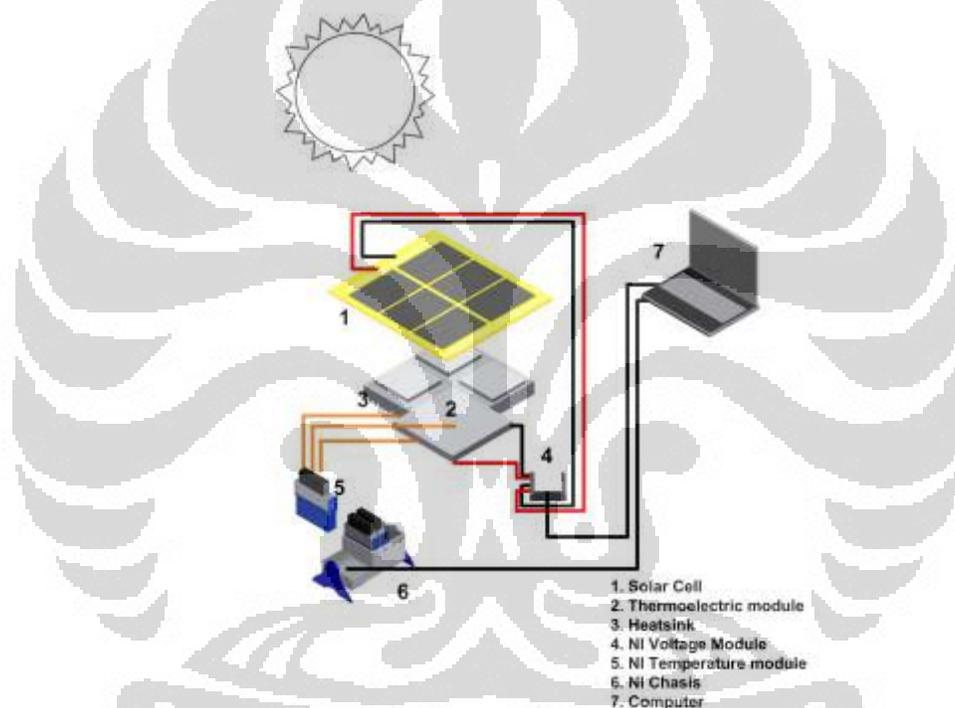
Komponen-komponen ini disusun berdasarkan Gambar 3.7. Pemasangan termokopel dilakukan pada bagian atas dan bagian bawah masing-masing modul termoelektrik, daerah sekitar heatsink, bagian dalam kotak isolasi, di bawah plat *photovoltaic*, dan lingkungan untuk temperatur ambient. Rangkaian termoelektrik disusun sesuai dengan variabel pengujian yang ingin dilakukan.

Sebelum dilakukan pengambilan data, termokopel dan kabel termoelektrik dipasang terlebih dahulu ke NI-DAQ yang kemudian dihubungkan dengan komputer. Lalu menyiapkan lampu halogen dan kipas agar terpasang dengan *power supply*. Setelah itu, isolasi Styrofoam diletakkan di atas prototype *hybrid solar cell* dan kemudian dipasang lampu halogen beserta dudukannya. Sedangkan kipas diletakkan di samping *heat sink*.

Setelah komponen-komponen terpasang dengan baik, maka pengujian siap untuk dilakukan. Pertama-tama, software LabView 8.5 dijalankan untuk proses perekaman data. Kemudian *power supply* dinyalakan dan diatur pada tegangan 12 Volt hingga temperatur dan tegangan modul termoelektrik mencapai nilai yang stabil. Setelah *power supply* dimatikan, perekaman data masih terus dilakukan hingga temperatur yang tercatat sudah kembali seperti semula.

3.4.2 Pengujian Lapangan

Pengujian lapangan merupakan pengujian yang dilakukan di area terbuka, dalam hal ini dilakukan di balkon paling atas gedung Engineering Center FTUI, Depok, sehingga kondisi pengujian merupakan kondisi alami. Pada kondisi lapangan, terdapat matahari sebagai sumber cahaya dan panas sehingga tidak diperlukan lampu halogen. Pada kondisi lapangan juga, sudah terdapat angin yang bertiup secara natural sehingga tidak perlu menggunakan kipas lagi.

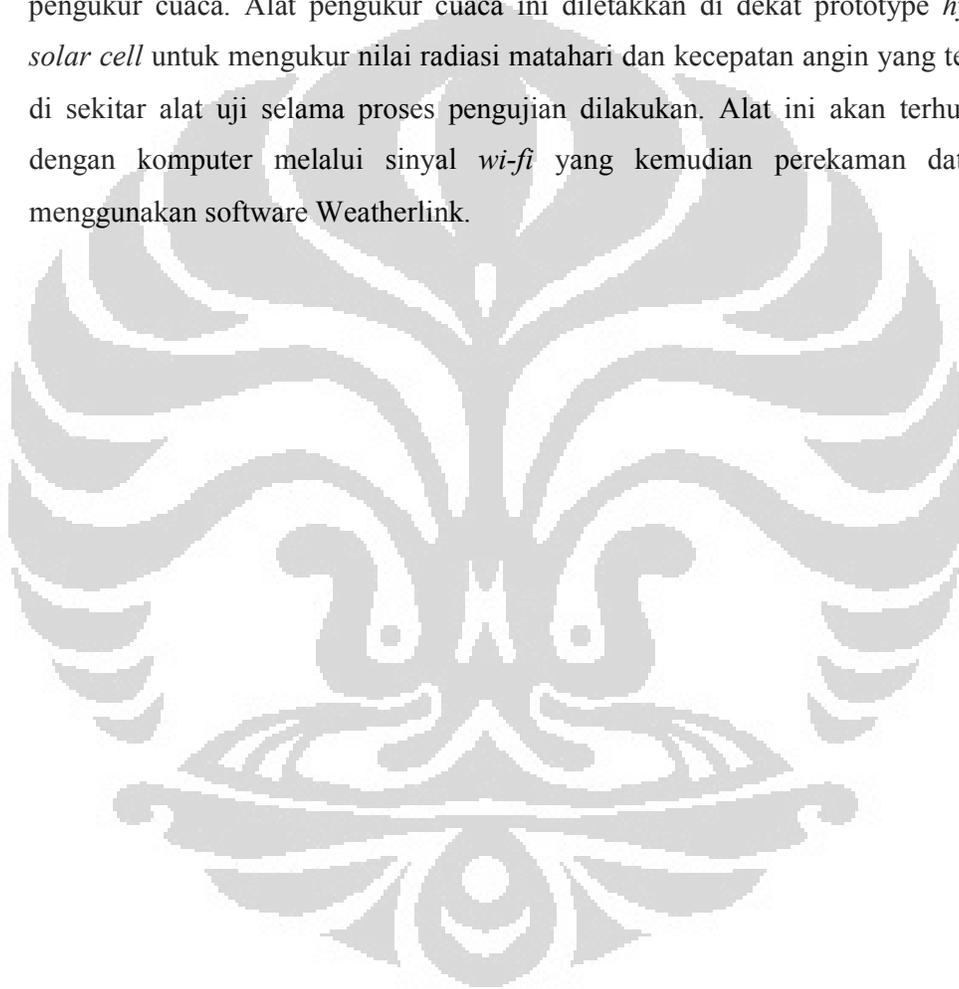


Gambar 3. 8 Pengaturan pengujian berbasis lapangan

Pada dasarnya, prosedur pengambilan data pada pengujian lapangan serupa dengan pengujian laboratorium. Hanya saja pada pengujian lapangan komponen yang digunakan lebih sedikit karena tidak membutuhkan sumber panas dan sumber cahaya buatan. Sehingga pada pengujian lapangan, rangkaian prototype *hybrid solar cell* beserta termoelektrik dan NI-DAQ langsung diletakkan saja di ruangan terbuka yang terkena sinar matahari.

Setelah komponen siap dan disusun berdasarkan Gambar 3.8, maka pengujian dapat dilakukan. Seperti pada pengujian laboratorium proses perekaman data dilakukan dengan menggunakan software LabView 8.5. Pengujian dilakukan sejak matahari mulai terasa cukup terik yaitu pada pukul 10.00 hingga pukul 15.00.

Pada pengujian lapangan, dibutuhkan alat tambahan yang berupa alat pengukur cuaca. Alat pengukur cuaca ini diletakkan di dekat prototype *hybrid solar cell* untuk mengukur nilai radiasi matahari dan kecepatan angin yang terjadi di sekitar alat uji selama proses pengujian dilakukan. Alat ini akan terhubung dengan komputer melalui sinyal *wi-fi* yang kemudian perekaman datanya menggunakan software Weatherlink.



BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

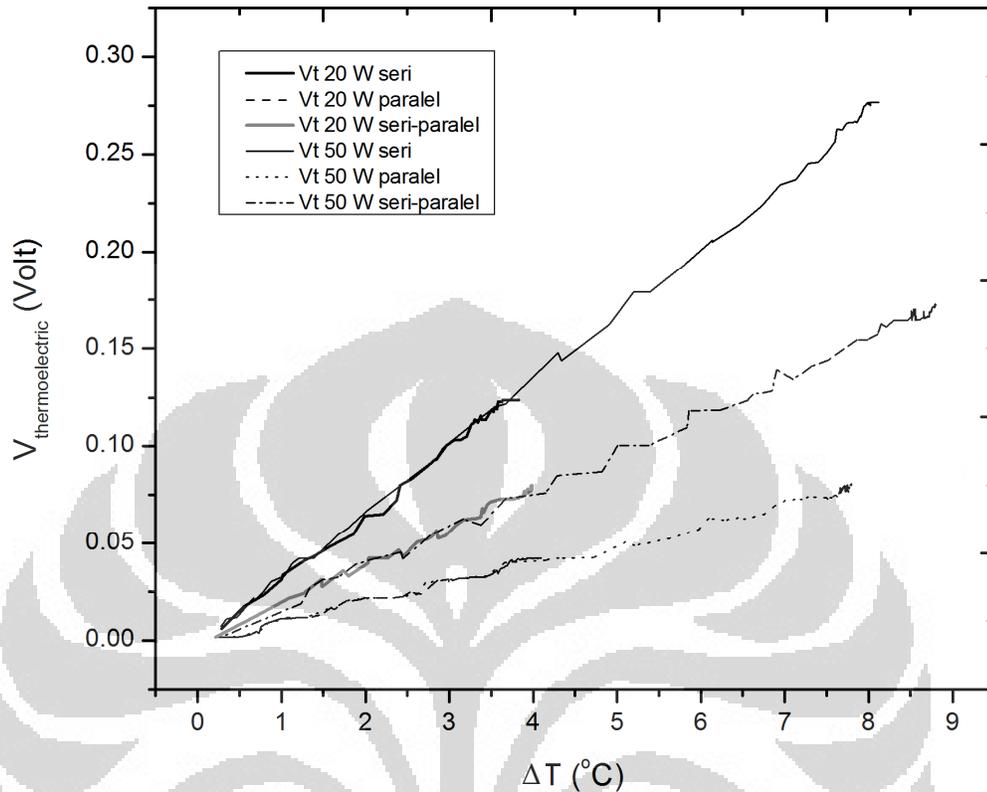
4.1 VARIASI RANGKAIAN

Pengujian yang pertama kali dilakukan adalah pengujian laboratorium dengan variasi susunan rangkaian modul termoelektrik. Susunan rangkaian yang diuji adalah rangkaian seri, parallel, dan seri-paralel. Rangkaian penyusunan modul termoelektrik dengan keluaran daya yang paling tinggi berdasarkan hasil pengujian ini kemudian akan digunakan untuk pengujian-pengujian berikutnya.

Masing-masing rangkaian dicoba dengan menggunakan lampu halogen 20 W dan 50 W. Pemakaian dua jenis lampu ini bertujuan untuk melihat bagaimana pengaruhnya terhadap temperatur dan tegangan yang dihasilkan serta membandingkannya dengan hasil pengujian lapangan yang dilakukan berikutnya. Hal ini dimaksudkan untuk memilih daya lampu yang dapat memberikan hasil yang mendekati kondisi lapangan untuk kemudian digunakan pada pengujian laboratorium berikutnya.

Pada pengujian ini digunakan kipas yang berfungsi untuk membantu proses konveksi antara panas buang dari *heat sink* ke udara. Kipas digunakan sebagai bentuk simulasi dari angin yang terdapat pada kondisi nyata di lapangan. Kecepatan kipas yang digunakan adalah 1,7 m/s sesuai dengan karakteristik kecepatan angin rata-rata yang bertiup di sekitar daerah Kota Depok [15].

Yang dilakukan pada eksperimen pertama ini adalah mendapatkan data utama berupa temperatur sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik serta berapa tegangan yang terbaca pada saat itu. Dari data temperatur, maka akan didapatkan berapa perbedaan temperatur kedua sisi modul termoelektrik. Perbedaan temperatur inilah yang akan memberikan nilai Seebeck jika dibandingkan dengan keluaran beda potensial yang dihasilkan. Dari nilai beda potensial ini kemudian akan diplot berapa daya yang dapat dihasilkan oleh rangkaian empat modul termoelektrik ini.

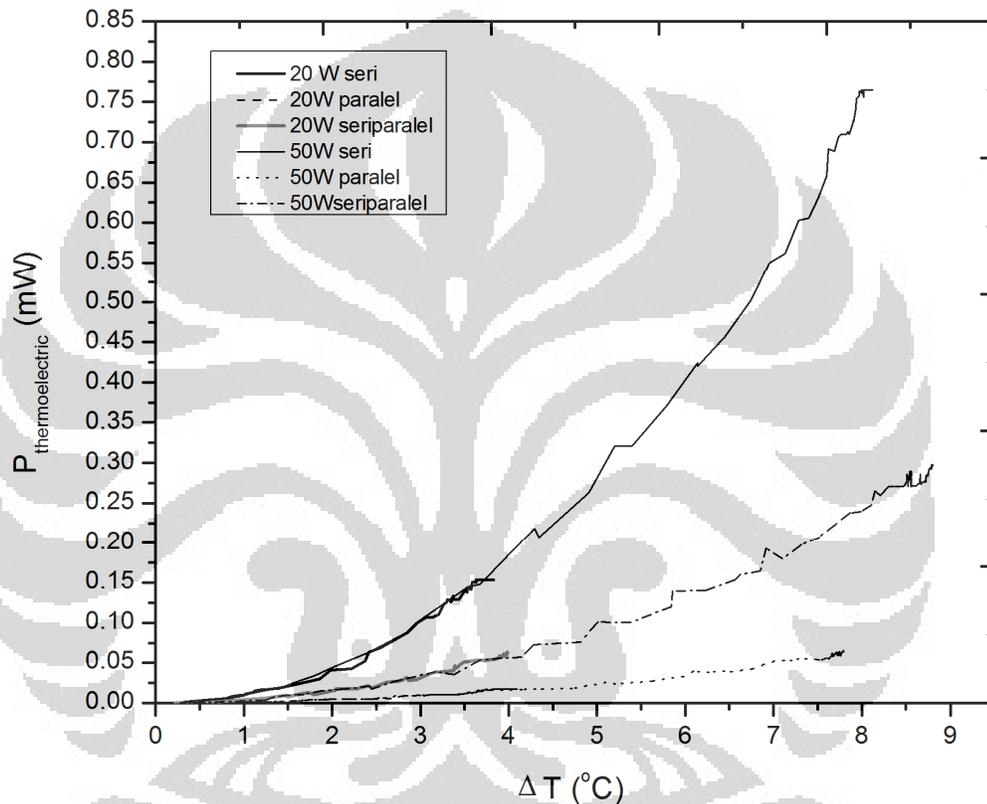


Gambar 4.1 Grafik perbandingan hasil tegangan modul termoelektrik terhadap ΔT

Dari Gambar 4.1 di atas, terlihat bahwa lampu halogen 20 Watt dan 50 Watt menghasilkan karakteristik yang sama. Hanya saja lampu halogen 50 Watt menghasilkan selisih perbedaan temperatur yang lebih tinggi antara sisi panas dan sisi dingin termoelektrik daripada perbedaan temperatur yang dihasilkan oleh lampu halogen 20 Watt. Hal ini terwujud karena energy yang diberikan oleh lampu halogen 50 Watt lebih besar, sehingga temperatur sisi panas termoelektrik juga akan semakin tinggi. Namun, pendinginan pada bagian bawah termoelektrik tetap dilakukan sehingga temperatur sisi dingin termoelektrik tidak setinggi temperatur sisi panas dan membuat perbedaan temperatur semakin tinggi. Oleh karena itu, tegangan termoelektrik yang dihasilkan dari lampu halogen 50 Watt juga lebih besar daripada lampu halogen 20 Watt.

Dilihat dari rangkaian susunan modul termoelektrik berdasarkan grafik pada Gambar 4.1, tegangan termoelektrik yang paling tinggi adalah tegangan yang dihasilkan dari rangkaian seri. Tegangan termoelektrik dengan rangkaian seri

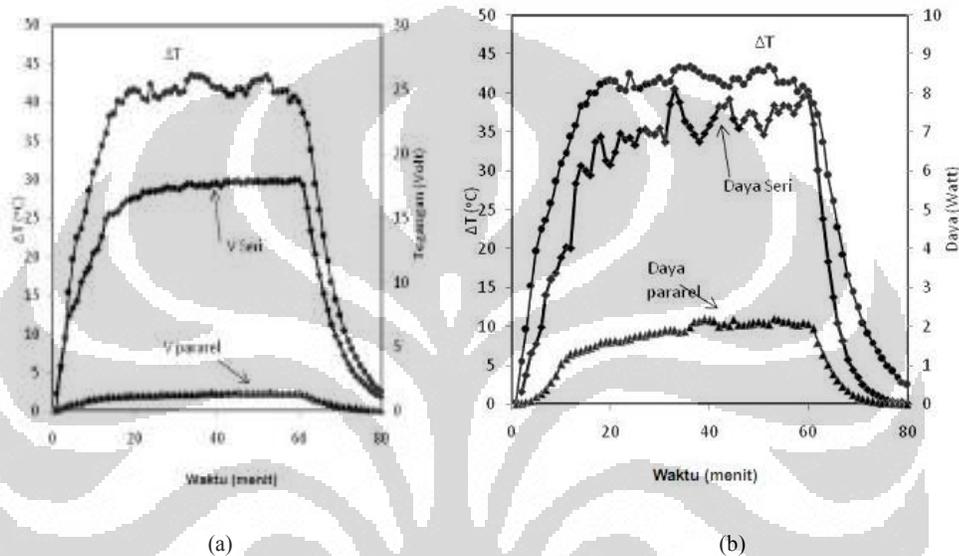
paling tinggi yang dicapai dengan lampu halogen 50 Watt pada pengujian ini adalah 0,2766 Volt atau 276,6 miliVolt. Sedangkan hasil tegangan yang dihasilkan oleh rangkaian paralel merupakan tegangan yang paling rendah, dengan nilai maksimal adalah 0,081 Volt atau 81 miliVolt. Nilai ini hanyalah mencapai 30% dari tegangan termoelektrik maksimal yang dihasilkan oleh rangkaian seri.



Gambar 4. 2 Grafik Perbandingan Daya Termoelektrik terhadap ΔT pada pengujian dengan variabel rangkaian

Nilai daya yang dihasilkan dari modul termoelektrik pun menunjukkan karakteristik yang sama dengan tegangannya. Hanya saja, pada Gambar 4.2 di atas, terlihat bahwa nilai daya yang dihasilkan bentuknya memiliki hubungan kuadratik, sedangkan dari Gambar 4.1, hubungan yang terlihat adalah hubungan linear. Dengan rangkaian seri, daya termoelektrik yang dihasilkan pun mencapai nilai yang paling tinggi. Pada pengujian ini, besarnya daya termoelektrik yang dihasilkan dengan rangkaian seri oleh lampu halogen 50 W mencapai 0,765 mW. Hasil ini merupakan hasil tertinggi dibandingkan dengan hasil rangkaian paralel

dan seri-paralel dari modul termoelektrik menggunakan lampu halogen 50 W. Daya maksimal yang dihasilkan dari rangkaian parallel dengan lampu 50 W mencapai 0,066 mW di mana nilai ini hanya 8,58% dari besarnya daya maksimal yang dihasilkan dari rangkaian seri. Sedangkan rangkaian seri-paralel menghasilkan daya tengah dengan nilai maksimal 0,298 mW atau sekitar 39% dari daya maksimal yang dihasilkan oleh rangkaian seri.



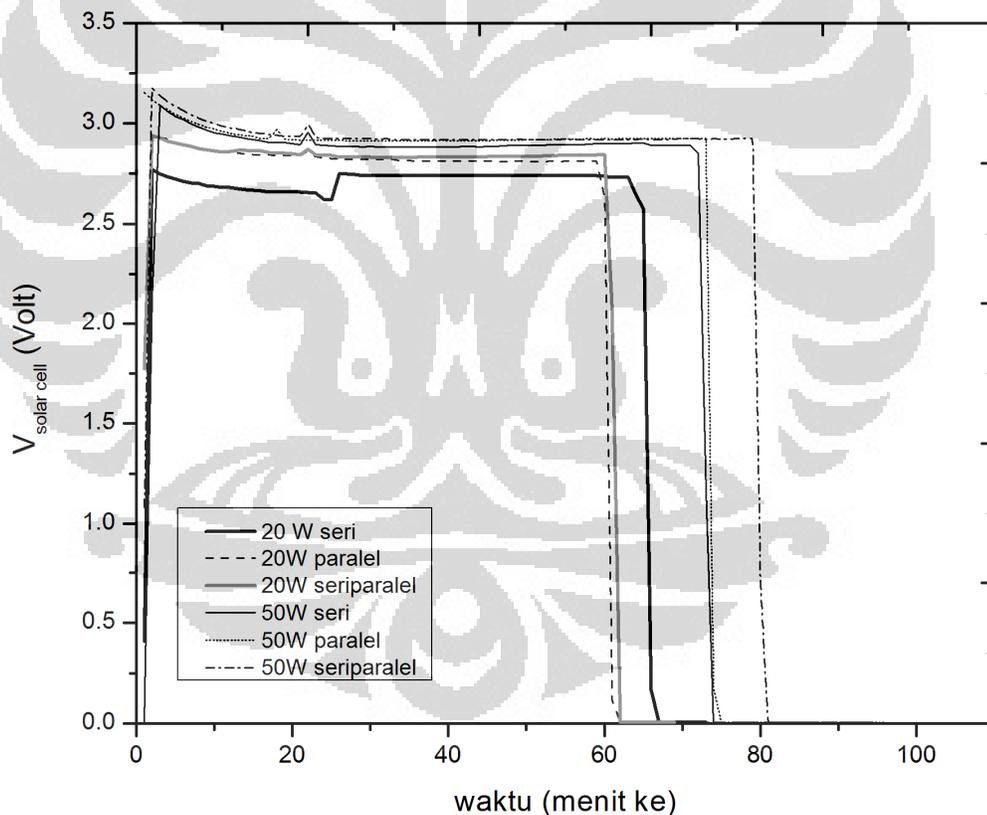
Gambar 4. 3 Perbandingan tegangan (a) dan daya (b) yang dihasilkan dari termolektrik dengan variabel rangkaian [16]

Pada Gambar 4.3 yang merupakan hasil pengujian yang dilakukan oleh Putra et al. [16], terlihat bahwa tegangan yang dihasilkan dari rangkaian seri dapat mencapai sekitar delapan belas kali lipat tegangan yang dihasilkan oleh rangkaian parallel. Sedangkan daya maksimal yang dapat dihasilkan oleh rangkaian seri mencapai empat kali lipat daya yang dicapai oleh tegangan rangkaian parallel. Hasil yang terdapat pada Gambar 4.3 ini sesuai dengan hasil pengujian yang telah dilakukan, di mana grafik pada gambar tersebut menyatakan bahwa rangkaian seri juga akan memberikan hasil tegangan dan daya yang paling besar pada beban yang sama dan begitu pula halnya dengan hasil pengujian ini.

Hasil pengujian yang kemudian diperkuat oleh hasil literature yang didapat menyatakan bahwa rangkaian seri akan memberikan daya yang paling besar. Oleh

karena itu, rangkaian modul termoelektrik yang akan digunakan untuk pengujian-pengujian selanjutnya adalah rangkaian seri.

Selain data temperatur dan tegangan yang dihasilkan dari rangkaian termoelektrik, pengujian ini juga bertujuan untuk mendapatkan tegangan yang dihasilkan oleh *solar cell*. Hal yang paling mempengaruhi besarnya tegangan yang dihasilkan dari plat *solar cell* adalah jumlah energy dari cahaya yang diberikan oleh sumber energy. Kemampuan tegangan maksimal yang dapat dihasilkan dari *solar cell* berkisar pada nilai 3V berdasarkan spesifikasi *solar cell* yang digunakan. Oleh karena itu, sebesar apapun energy yang diberikan, nilai tegangan yang dihasilkan oleh plat *solar cell* ini tidak akan mencapai nilai yang jauh lebih besar dari 3V.



Gambar 4. 4 Grafik perbandingan tegangan cell terhadap waktu pada pengujian dengan variabel rangkain modul termoelektrik

Grafik tegangan yang dihasilkan dari plat *solar cell* pada Gambar 4.4 menunjukkan bahwa besarnya tegangan yang dihasilkan oleh *solar cell* memiliki

nilai yang tidak jauh berbeda pada masing-masing variasi. Yang paling berpengaruh dalam pengujian ini adalah besarnya daya lampu halogen yang digunakan. Berdasarkan Gambar 4.4, tegangan *solar cell* yang dihasilkan oleh lampu halogen 50 W besarnya lebih tinggi daripada tegangan *solar cell* yang dihasilkan oleh lampu halogen 20 W. Pada masing-masing daya lampu, tegangan *solar cell* yang dihasilkan dari rangkaian seri merupakan hasil yang paling kecil di antara rangkaian-rangkaian lainnya. Hanya saja, perbedaan yang dihasilkan hanya sedikit dan tidak memiliki selisih yang jauh.

Tegangan tertinggi yang terekam dicapai oleh pengujian lampu halogen 50 Watt dengan tegangan maksimal 3,17 Volt pada rangkaian seri-paralel dan stabil di sekitar 2,89 Volt. Pada rangkaian seri, tegangan maksimal *solar cell* yang terekam adalah 3,09 Volt dan stabil pada 2,87 Volt. Sedangkan pada rangkaian paralel tegangan maksimal *solar cell*-nya adalah 3,15 Volt dan stabil pada nilai yang berkisar 2,91 Volt. Lalu tegangan *solar cell* yang paling tinggi pada lampu halogen 20 Watt dicapai oleh pengujian dengan rangkaian paralel dan seri-paralel yang sama-sama mencapai nilai 2,94 Volt pada nilai puncaknya. Kemudian hasil pengujian rangkaian paralel stabil di sekitar 2,76 Volt, dan pengujian rangkaian seri-paralel yang terekam stabil pada 2,82 Volt. Sedangkan hasil puncak tegangan terendah didapat dari pengujian dengan lampu halogen 20 Watt pada rangkaian seri, di mana nilai tertinggi pada pengujian ini didapat sebesar 2,81 Volt lalu kemudian stabil di sekitar 2,73 Volt.

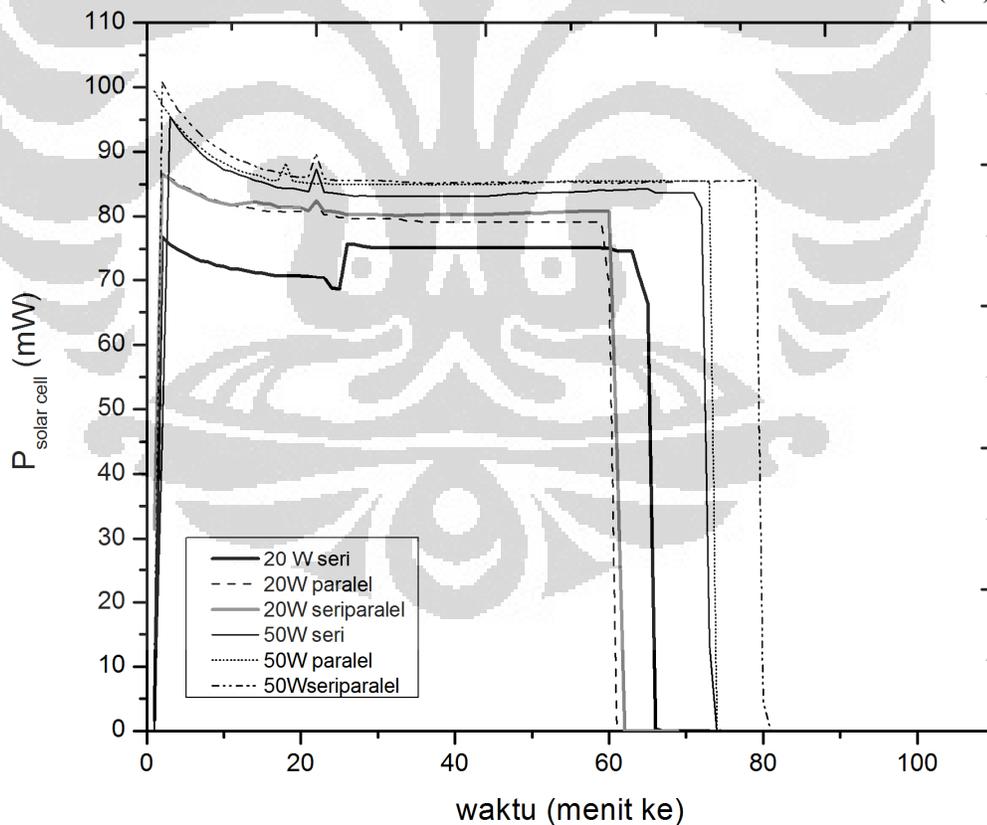
Yang terlihat jelas pada grafik pengujian ini adalah pada semua hasil pengujian, setelah mencapai puncak, tegangan *solar cell* yang didapat sedikit menurun dan kemudian mencapai stabil sebelum akhirnya lampu halogen dimatikan. Penurunan ini terjadi karena seiring berjalannya waktu setelah lampu halogen dinyalakan, temperatur pada plat *solar cell* meningkat sehingga hambatan termal dan elektrik pada plat *solar cell* meningkat. Peningkatan hambatan inilah yang membuat tegangan yang dihasilkan menjadi menurun. Namun, seiring temperatur di dalam ruang isolasi mencapai kestabilan, maka hambatan pada plat *solar cell* dan besarnya tegangan yang dihasilkan pun menjadi stabil. Lalu, setelah temperatur dan tegangan yang didapat mencapai kestabilan, maka lampu halogen

dimatikan. Karena plat *solar cell* tertutup oleh isolasi, maka ketika lampu halogen dimatikan, di dalam ruang isolasi menjadi gelap. Oleh karena itu, terdapat penurunan tegangan *solar cell* yang drastis pada masing-masing pengujian setelah lampu halogen dimatikan.

Pola seperti ini juga ditunjukkan oleh grafik daya yang dihasilkan dari *solar cell* pada Gambar 4. 5. Pada awal lampu halogen dinyalakan, tegangan dan daya yang dihasilkan langsung menanjak dan mencapai puncak. Namun, setelah itu, *trend* dari tegangan dan daya *solar cell* menurun dan kemudian stabil setelah beberapa waktu. Pola grafik daya baik yang dihasilkan oleh modul termoelektrik maupun *solar cell* serupa dengan tegangannya karena daya dan tegangan besarnya sebanding dan memiliki hubungan kuadratik. Sesuai dengan rumus:

$$P = V \cdot I = V \cdot \frac{V}{R} = \frac{V^2}{R}$$

(4.1)



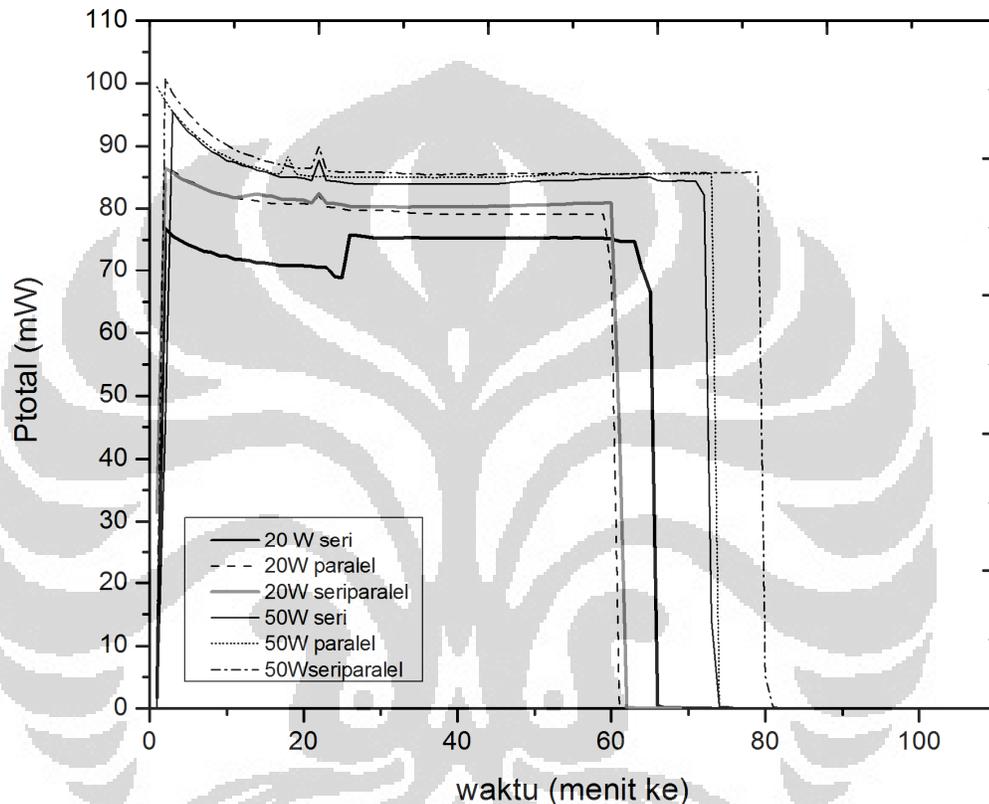
Gambar 4. 5 Grafik perbandingan daya solar cell terhadap waktu pada pengujian dengan variabel rangkaian modul termoelektrik

Sesuai dengan tegangan *solar cell* yang dihasilkan, puncak tegangan tertinggi didapat dari pengujian dengan lampu halogen 50 Watt pada rangkaian seri-paralel sebesar 100,88 mW. Setelah mencapai puncak, nilainya menurun dan stabil pada 85,35 mW. Kemudian puncak yang didapat dari pengujian dengan rangkaian seri adalah 95,46 mW dan stabil pada 83,68 mW. Pengujian rangkaian paralel menghasilkan daya maksimal sebesar 99,43 mW dan stabil di sekitar nilai 85,26 mW.

Kemudian dari hasil pengujian dengan lampu halogen 20 Watt, daya puncak dari pengujian rangkaian seri-paralel mencapai 86,52 mW dan stabil pada 80,74 mW. Dari rangkaian paralel, daya puncak yang terekam adalah 86,90 mW dan kemudian stabil di sekitar 79,19 mW. Hasil yang paling berbeda ditunjukkan dari pengujian 20 Watt. Selisih tegangan dan daya yang didapat pada pengujian ini paling jauh dibandingkan dengan pengujian rangkaian paralel dan seri-paralel. Besarnya daya stabil yang didapat dari pengujian rangkaian seri dengan lampu halogen 20 Watt adalah 74,86 mW. Pada pengujian ini, besarnya daya dan tegangan yang terekam mengalami peningkatan di tengah pengujian kemudian stabil. Hal ini disebabkan karena pada saat pengujian dilakukan, besarnya tegangan yang diatur pada *power supply* untuk menyalakan lampu halogen sebesar 12 Watt mengalami penurunan di awal kemudian naik lagi di tengah pengujian. Hal ini bisa saja terjadi akibat lampu halogen mengalami lonjakan listrik dan sebagainya sehingga arus pada *power supply* menurun. Meskipun demikian, hasil yang didapat besarnya tidak begitu jauh.

Baik grafik tegangan *solar cell* pada Gambar 4. 4 dan daya *solar cell* Gambar 4. 5 menunjukkan perbedaan yang signifikan antara hasil pengujian dengan lampu halogen 20 Watt dan lampu halogen 50 Watt. Hasil pengujian lampu halogen 50 Watt cenderung sama meskipun pengujian dilakukan dengan rangkaian seri, paralel, maupun seri-paralel. Selisih nilainya hanya memiliki sedikit perbedaan. Begitu pula dengan yang ditunjukkan oleh hasil pengujian dengan lampu halogen 20 Watt. Kedua lampu ini jelas memiliki daya yang berbeda sehingga intensitas yang dihasilkannya pun berbeda. Akan tetapi, sedikit perbedaan tegangan dan daya yang dihasilkan dari masing-masing pengujian

disebabkan karena setiap dilakukan pengujian hasilnya tidak akan menunjukkan nilai yang identik. Tentu saja ada sedikit perbedaan seperti misalnya keadaan laboratorium pada saat pengujian. Pada siang hari dan malam hari temperatur ambient, cahaya lingkungan, dan sebagainya memiliki perbedaan. Hal inilah yang dapat mempengaruhi hasil yang didapat.



Gambar 4. 6 Grafik perbandingan daya total terhadap waktu pada pengujian dengan variabel rangkaian modul termoelektrik

Sesuai dengan fungsinya, *hybrid solar cell* dengan modul termoelektrik ini bertujuan untuk menambah daya keluaran dari *solar cell* biasa. Oleh karena itu, daya yang didapat dari modul termoelektrik dan *solar cell* dijumlahkan sehingga menghasilkan daya total seperti pada Gambar 4. 6. Berdasarkan Gambar 4. 6 daya total yang dihasilkan oleh pengujian dengan lampu halogen 50 Watt nilainya lebih besar dibandingkan dengan pengujian dengan lampu halogen 20 Watt. Hal ini disebabkan karena besarnya energi dan intensitas yang dihasilkan dari lampu halogen 50 Watt lebih besar daripada lampu halogen 20 Watt. Daya total yang terbesar memang berasal dari pengujian pada rangkaian seri-paralel dengan lampu halogen 50 Watt, namun ini disebabkan karena pada pengujian ini daya

*solar cell*nya lebih besar daripada pengujian lainnya. Akan tetapi, perbedaan itu tidaklah dipengaruhi oleh rangkaian termoelektrik melainkan pada keadaan pengujian yang sedang terjadi ketika pengujian dilakukan. Meskipun demikian, modul termoelektrik juga memberikan peranan dalam meningkatkan besarnya daya total yang dihasilkan, meskipun besarnya tidak begitu signifikan.

Pada dasarnya, bentuk grafik daya total yang dihasilkan sangat dipengaruhi oleh besarnya tegangan dan daya yang dihasilkan dari *solar cell*, karena hasil tegangan dan daya dari modul termoelektrik yang dihasilkan jauh lebih kecil dibandingkan dengan yang dihasilkan oleh *solar cell*. Namun besarnya daya dari *solar cell* tidaklah dipengaruhi oleh jenis rangkaian modul termoelektrik yang digunakan. Jenis rangkaian hanya akan mempengaruhi keluaran tegangan dan daya dari modul termoelektrik, di mana rangkaian seri akan menghasilkan tegangan dan daya yang terbesar. Oleh karena itu, rangkaian modul termoelektrik yang akan digunakan untuk pengujian-pengujian berikutnya adalah rangkaian seri.

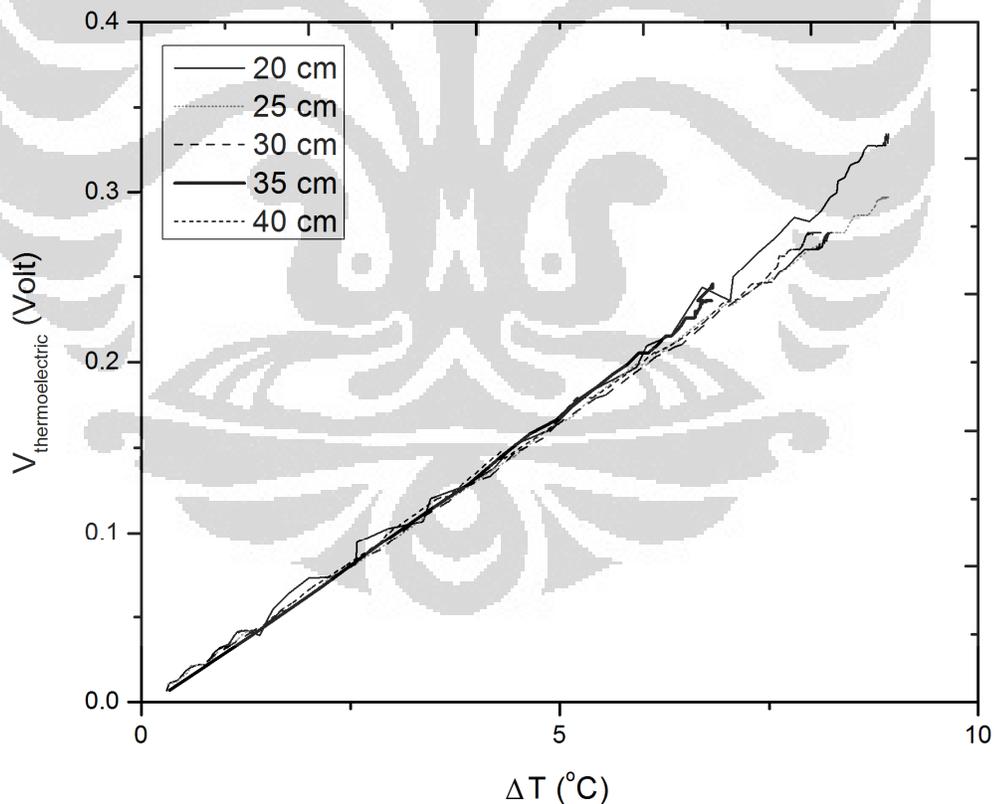
4.2 VARIASI JARAK

Pengujian laboratorium dengan variasi jarak dilakukan untuk melihat pengaruh jarak antara lampu halogen dengan permukaan prototype *hybrid solar cell* terhadap pengaruh keluaran tegangan dan daya yang dihasilkan. Pengujian ini dilakukan pada jarak 20 cm, 25 cm, 30 cm, 35 cm, dan 40 cm. Masing-masing pengujian dilakukan dengan menggunakan isolasi yang terdiri atas Styrofoam yang dilapisi oleh lembaran aluminium di dalamnya. Ukuran tinggi Styrofoam disesuaikan dengan jarak pengujian yang dilakukan. Pengujian dilakukan dengan susunan modul termoelektrik seri, sesuai dengan hasil pengujian dengan variabel rangkaian dan studi literature yang telah dilakukan sebelumnya yang menyatakan bahwa rangkaian seri akan memberikan hasil tegangan dan daya yang paling besar dari keluaran modul termoelektrik.

Lampu halogen sebagai sumber panas dan sumber cahaya yang digunakan adalah lampu halogen dengan daya 50 Watt. Pemilihan lampu ini dilakukan berdasarkan hasil pengujian yang didapat pada kondisi lapangan. Pada kondisi

lapangan, perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin termoelektrik dapat mencapai 8°C hingga 9°C. Selisih ini sesuai dengan perbedaan temperatur kedua sisi modul termoelektrik yang dihasilkan oleh lampu halogen 50 Watt berdasarkan pada pengujian laboratorium sebelumnya, yaitu pengujian laboratorium dengan variasi rangkaian. Selain itu, lampu halogen 50 Watt dapat memberikan energi yang lebih besar sehingga hasil tegangan dari *hybrid solar cell* juga lebih besar dibandingkan dengan lampu halogen 20 Watt. Oleh karena itu, pengujian variasi jarak ini dilakukan dengan lampu halogen 50 Watt.

Seperti pada pengujian laboratorium sebelumnya, sistem pendinginan termoelektrik pada pengujian ini juga menggunakan kipas yang kecepatannya dapat diatur menggunakan *power supply*. Kecepatan kipas yang digunakan sama dengan pengujian laboratorium sebelumnya yaitu 1,7 m/s sesuai dengan kondisi kecepatan angin rata-rata Kota Depok [15].

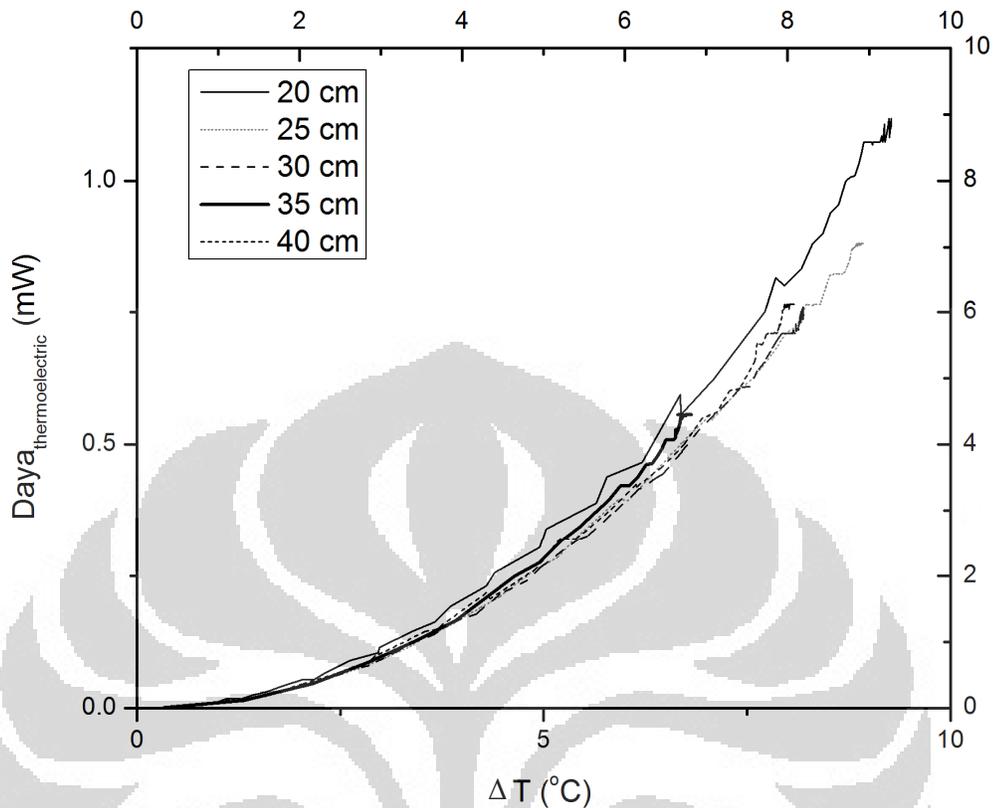


Gambar 4. 7 Grafik perbandingan hasil pengujian laboratorium variasi jarak tegangan modul termoelektrik terhadap ΔT

Berdasarkan Gambar 4. 7, tegangan modul termoelektrik yang paling tinggi dihasilkan dari pengujian pada jarak 20 cm. Meskipun demikian, besarnya tegangan yang dihasilkan oleh kelima variasi jarak ini memberikan keluaran yang nilainya saling mendekati. Pada jarak 20 cm, tegangan modul termoelektrik paling tinggi yang dihasilkan mencapai 0,334 Volt pada perbedaan temperatur 9,27°C. Nilai ini kemudian disusul oleh tegangan modul termoelektrik dari pengujian pada jarak 25 cm dengan besar 0,297 Volt pada dT sebesar 8,92°C. Besarnya tegangan maksimal yang dihasilkan dari pengujian pada jarak 40 cm dan 30 cm memiliki nilai yang sama, yaitu 0,276 Volt. Hanya saja, pada jarak 40 cm, 0,276 Volt dihasilkan pada perbedaan temperatur 8,12°C, sedangkan pada jarak 30 cm, tegangan maksimal tersebut dihasilkan pada jarak 8,25°C. Tegangan terkecil dihasilkan oleh pengujian dengan jarak 35 cm. Tegangan modul termoelektrik yang dihasilkan pada pengujian ini adalah sebesar 0,245 Volt dengan perbedaan temperatur sebesar 6,8°C.

Grafik tegangan modul termoelektrik ini menunjukkan bahwa semakin dekat jarak antara prototype *hybrid solar cell* dengan lampu halogen, maka tegangan yang dihasilkannya juga semakin besar. Hanya saja hal ini tidak ditunjukkan oleh tegangan yang dihasilkan pada jarak 35 cm. Hal ini disebabkan karena pada saat pengujian jarak 35 cm, perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik lebih rendah dibandingkan pengujian lainnya.

Semakin besarnya tegangan yang dihasilkan seiring dengan berkurangnya jarak pengujian diakibatkan karena tegangan yang dihasilkan sebanding dengan perbedaan temperatur yang dicapai. Semakin dekat jaraknya, maka temperatur di dalam ruang isolasi yang kemudian memberikan kalor ke *prototype hybrid solar cell* juga meningkat. Oleh karena itu, temperatur plat *solar cell* dan sisi panas modul termoelektrik yang diletakkan di bawahnya juga meningkat. Sedangkan sisi dingin termoelektrik berada dalam keadaan ambient dan pendinginan yang sama. Oleh karena itu, perbedaan temperatur antara sisi dingin dan sisi panas termoelektrik meningkat sehingga tegangannya juga meningkat.

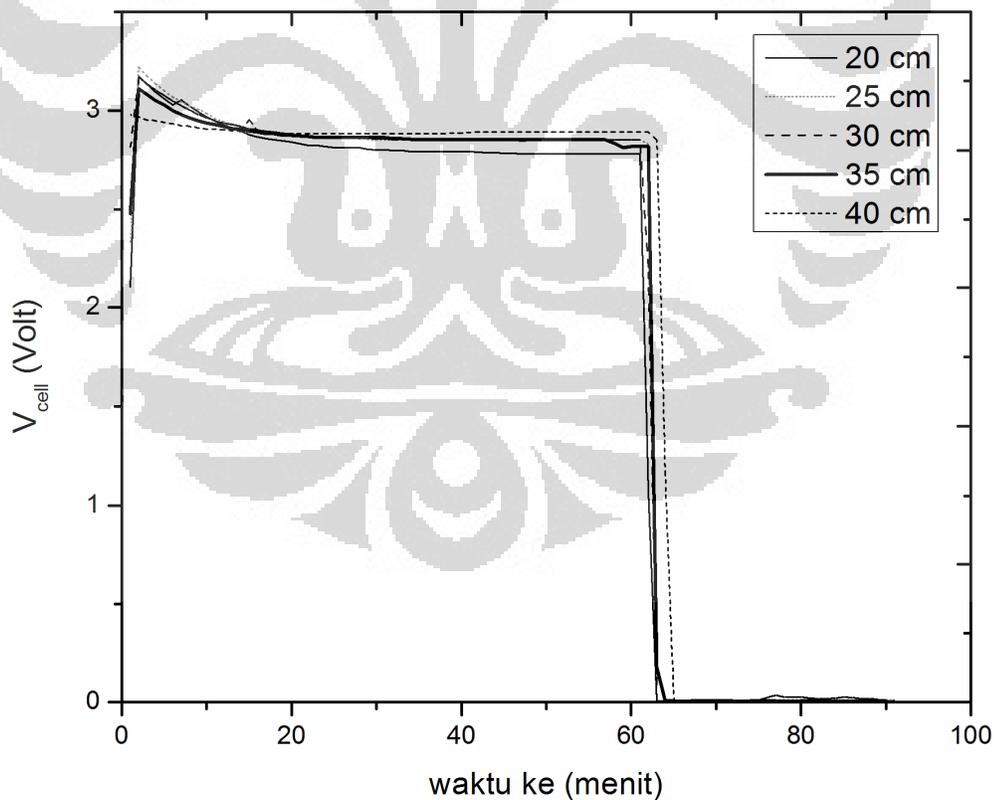


Gambar 4. 8 Grafik perbandingan daya termoelektrik vs ΔT pada pengujian dengan variabel jarak

Seperti hasil pengujian sebelumnya, besarnya daya modul termoelektrik yang dihasilkan memiliki hubungan kuadratik dengan tegangannya. Oleh karena itu, grafik daya modul termoelektrik sesuai dengan Gambar 4. 8 menunjukkan bentuk kuadratik dari grafik tegangan pada Gambar 4. 7. Dari grafik ini juga terlihat bahwa daya modul termoelektrik paling besar dihasilkan dari pengujian dengan jarak 20 cm, yaitu sebesar 1,118 mW. Daya maksimal kedua adalah daya yang dihasilkan dari pengujian pada jarak 25 cm yaitu sebesar 0,88 mW. Daya yang dihasilkan dari pengujian dengan jarak 30 cm dan 40 cm menunjukkan hasil yang sama, yaitu sebesar 0,765 mW. Daya terkecil dihasilkan dari pengujian dengan jarak 35 cm, yaitu sebesar 0,602 mW. Dari Gambar 4. 8 memang terlihat bahwa daya terbesar dihasilkan oleh pengujian dengan jarak yang terdekat, yaitu 20 cm. Daya ini memiliki selisih 0,238 mW dengan daya yang dihasilkan oleh jarak 25 cm. Karena daya yang dihasilkan sangat bergantung pada tegangan yang dihasilkan, maka daya juga dipengaruhi oleh temperatur yang terjadi terutama pada sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik. Semakin dekat jarak

pengujian, maka *heat loss* yang terjadi semakin berkurang. *Heat loss* dapat terjadi karena kalor terbang ke lingkungan atau terserap oleh isolasi termal yang dibuat. Isolasi termal ini penting, karena jika tidak diberikan isolasi termal maka kalor yang terbang ke lingkungan jumlahnya akan lebih besar.

Semakin dekat jarak pengujian, maka akan semakin pendek pula isolasi termalnya sehingga kalor yang terserap oleh isolasi termal yang terbuat dari Styrofoam dan dilapisi oleh aluminium ini juga berkurang dan intensitas yang diterima menjadi semakin besar. Oleh karena itu, seiring dengan bertambah dekatnya jarak pengujian, maka temperatur yang diberikan oleh lampu halogen dan yang terjadi di dalam ruang isolasi semakin tinggi. Temperatur ini lalu diterima oleh plat *solar cell* dan diteruskan ke sisi panas termoelektrik yang akan mengakibatkan peningkatan perbedaan temperatur sisi panas dan sisi dingin termoelektrik. Hal inilah yang menyebabkan terjadinya peningkatan tegangan dan daya modul termoelektrik seiring dengan berkurangnya jarak pengujian.



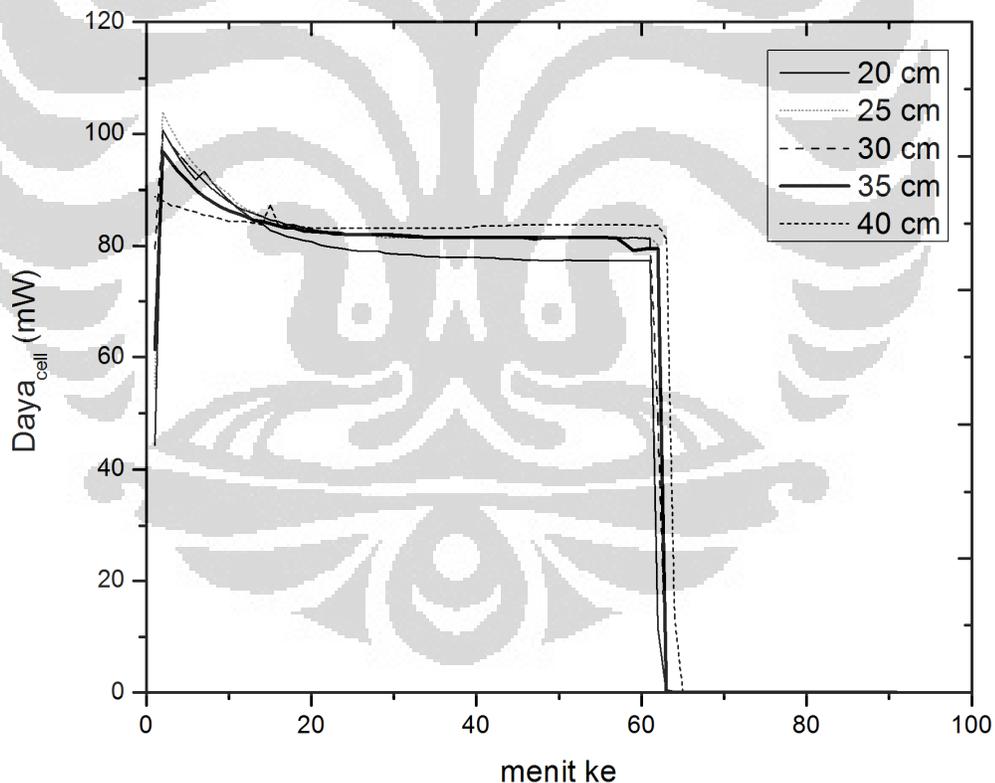
Gambar 4.9 Grafik perbandingan tegangan solar cell vs waktu pada pengujian dengan variabel jarak

Berdasarkan Gambar 4. 9 besarnya tegangan yang dihasilkan dari *solar cell* pada masing-masing jarak memiliki nilai yang hampir sama. Pada awalnya, tegangan yang dihasilkan meningkat dengan nilai maksimal 3,17 Volt yang dihasilkan oleh pengujian dengan jarak 25 cm. Tegangan puncak yang dihasilkan oleh pengujian ini besarnya hampir sama dengan tegangan puncak yang dihasilkan dari pengujian 20 cm yang mencapai 3,16 Volt. Namun, setelah mencapai tegangan puncak, tegangan yang dihasilkan cenderung menurun hingga stabil pada nilai yang berkisar antara 2,7 hingga 2,8 Volt. Penurunan besarnya tegangan yang dihasilkan ini dapat diakibatkan oleh bertambahnya hambatan pada plat *solar cell* akibat meningkatnya temperatur yang terjadi. Seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. 7 dan Gambar 4. 8, pengujian dengan jarak 20 cm menghasilkan perbedaan temperatur yang paling tinggi yang disertai dengan pencapaian temperatur plat *solar cell* yang juga tinggi. Oleh karena itu, pengujian dengan jarak 20 cm memiliki pertambahan hambatan akibat panas yang paling tinggi pula sehingga seiring berjalannya waktu, tegangan yang dihasilkan oleh pengujian dengan jarak 20 cm ini juga menurun bahkan memiliki nilai stabil di posisi yang paling rendah di antara pengujian-pengujian dengan jarak yang lebih besar.

Pola yang sama juga ditunjukkan oleh hasil pengujian yang didapat dari jarak 25 cm, 30 cm, dan 35 cm. Pada menit awal tegangannya naik seiring dengan dinyalakannya lampu halogen yang diatur hingga mencapai tegangan 12 Volt. Kemudian, setelah mencapai puncak, besar tegangannya turun dan stabil di nilai yang berkisar pada 2,8 hingga 2,9 Volt. Penurunan ini juga disebabkan karena kenaikan hambatan akibat panas yang terjadi. Namun, pada jarak 25 cm, 30 cm, dan 35 cm besarnya temperatur yang dicapai tidak sebesar temperatur yang dicapai oleh pengujian pada jarak 20 cm, sehingga hambatan yang diakibatkan oleh panasnya lebih sedikit. Oleh karena itu, tegangan *solar cell* yang dapat dihasilkan pun lebih besar daripada yang dihasilkan oleh 20 cm.

Pengujian dengan jarak 40 cm menghasilkan tegangan yang lebih stabil dan berkisar pada tegangan 2,9 Volt. Meskipun nilai puncak tegangannya hanya berada pada 3 Volt, namun tegangan stabil yang dihasilkan oleh pengujian pada

jarak 40 cm ini nilainya lebih tinggi daripada pengujian pada jarak 20 cm, 25 cm, 30 cm, dan 35 cm. Hal ini disebabkan karena pengujian pada jarak 40 cm memiliki jarak yang paling jauh dibandingkan dengan variasi jarak lainnya, sehingga panas pada plat *solar cell* yang diakibatkan oleh lampu halogen jumlahnya lebih sedikit. Semakin jauh jarak lampu halogen ke plat *solar cell* pada prototype *hybrid solar cell* ini akan mengakibatkan *heat losses* yang lebih besar. *Heat losses* ini dapat disebabkan karena panasnya terserap oleh dinding isolasi dan terbuang ke lingkungan. Selain itu, semakin besar jaraknya, maka intensitas lampu halogen yang diterima oleh prototype *hybrid solar cell* ini menjadi semakin kecil. Oleh karena itu, jarak 40 cm akan memberikan besarnya kalor yang lebih kecil dibandingkan pada pengujian jarak lainnya. Hal inilah yang mengakibatkan hambatan pada *solar cell* pada pengujian jarak 40 cm paling kecil sehingga tegangan yang dihasilkan nilainya paling besar.



Gambar 4. 10 Grafik perbandingan daya solar cell vs waktu pada pengujian dengan variabel jarak

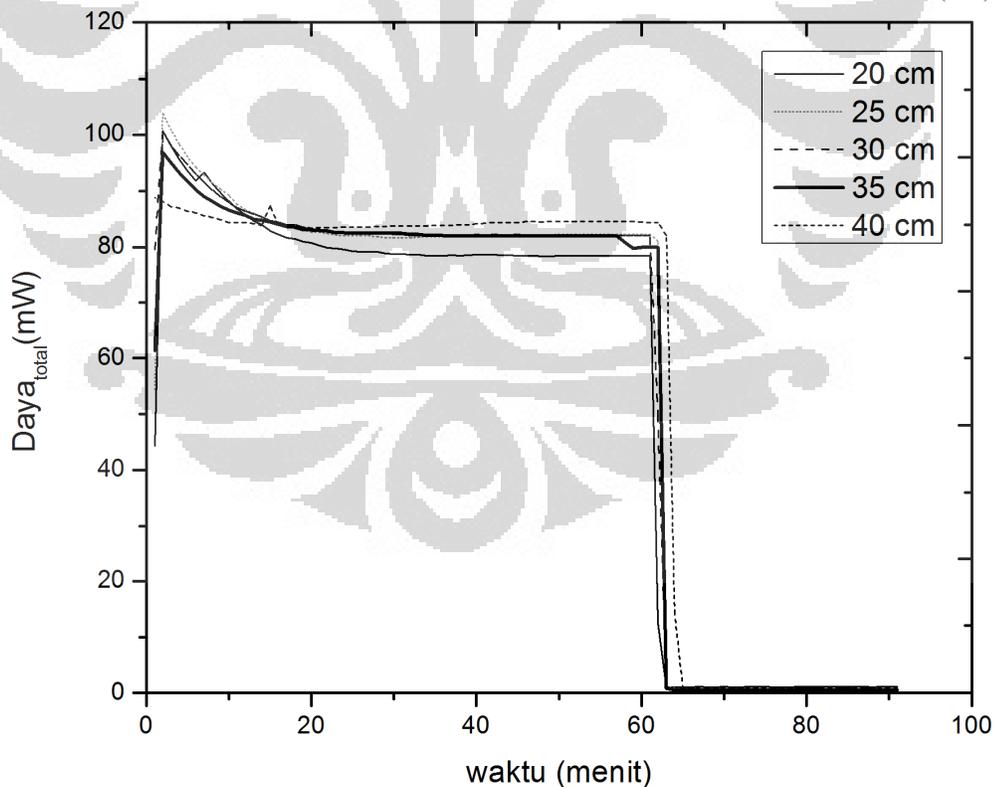
Grafik besarnya daya yang dihasilkan oleh *solar cell* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. 10 juga menunjukkan *trend* yang sama seperti hasil tegangan yang ditunjukkan pada Gambar 4. 9. Daya terbesar yang stabil

dihasilkan oleh pengujian dengan jarak 40 cm dengan nilai yang berkisar pada 84 mW meskipun puncak daya yang dicapainya merupakan puncak daya terendah. Begitu pula besarnya daya yang dihasilkan dari *hybrid solar cell* pada pengujian dengan jarak 20 cm yang mencapai puncak pada nilai 100 mW namun kemudian turun dan menjadi pengujian yang menghasilkan daya terendah pada keadaan stabil di nilai yang berkisar 77 mW. Sedangkan pengujian dengan jarak 25 cm memiliki nilai puncak yang paling tinggi namun kemudian turun dan nilainya serupa dengan besarnya daya yang dihasilkan pada jarak 30 cm dan 35 cm.

Keserupaan bentuk pola yang dihasilkan antara grafik tegangan yang ditunjukkan oleh Gambar 4. 9 dan grafik daya yang ditunjukkan oleh Gambar 4. 10 disebabkan karena daya dan tegangan memiliki hubungan kuadratik. Hubungan kuadratik ini juga berlaku pada tegangan dan daya yang dihasilkan oleh modul termoelektrik. hubungan ini ditunjukkan oleh persamaan 4.1 [17]:

$$P = V \cdot I = V \cdot \frac{V}{R} = V^2/R$$

(4. 2)



Gambar 4. 11 Grafik perbandingan daya total vs waktu pada pengujian dengan variabel jarak

Seperti pengujian-pengujian sebelumnya, daya yang dihasilkan dari modul termoelektrik dan plat *solar cell* sehingga menjadi daya total. Karena daya yang dihasilkan dari modul termoelektrik sangat rendah jika dibandingkan dengan daya yang dihasilkan oleh *solar cell*, maka besarnya daya total ini sangat dipengaruhi oleh daya yang dihasilkan dari *solar cell*. Oleh karena itu, plot grafik daya total seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. 11 bentuknya serupa dengan grafik daya *solar cell* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. 10. Grafik pada Gambar 4. 11 juga menunjukkan bahwa pengujian dengan jarak 40 cm lah yang akan memberikan hasil keluaran daya yang paling besar setelah keadaannya stabil. Sementara pengujian dengan jarak 20 cm akan memberikan keluaran daya yang paling rendah pada keadaan stabil. Sedangkan pengujian pada jarak 25 cm, 30 cm, dan 35 cm akan memberikan hasil keluaran daya yang menengah pada keadaan stabil. Kelima variasi pengujian ini memberikan grafik daya total dengan pola yang sama, yaitu menanjak di menit awal hingga mencapai puncak, dan kemudian sedikit menurun hingga mencapai keadaan yang stabil. Penurunan ini disebabkan karena hambatan pada plat *solar cell* meningkat akibat terjadinya peningkatan temperatur yang dialami oleh plat tersebut.

4.3 PENGUJIAN LAPANGAN

Pengujian lapangan merupakan pengujian prototype yang dilakukan di area terbuka sehingga mendapatkan panas dan cahaya dari sinar matahari secara langsung. Pengujian lapangan ini dilakukan dengan dua variabel, yaitu pengujian dengan sudut 0° dan 22° . Pengujian dengan sudut 0° ditujukan untuk mendapatkan data awal jika prototype diletakkan dalam kondisi lingkungan yang sebenarnya dan sebagai perbandingan apakah sudut orientasi *hybrid solar cell* akan mempengaruhi keluaran daya. Pengujian dengan sudut 25° dengan orientasi menghadap ke utara dilakukan untuk mendapat radiasi dan termal matahari yang lebih baik berdasarkan latitude lokasi pengujian. Sudut orientasi ini didapat dari rumus tilt angle yang menyatakan bahwa tilt angle atau sudut orientasi optimum dapat dicapai dengan [13]

$$\text{Latitude} + 15^\circ$$

(4. 3)

untuk daerah Jakarta dan sekitarnya karena daerah ini relative mendapatkan energi radiasi yang konstan selama setahun. Lokasi kota Depok berada pada $6,23^\circ$, sehingga sudut orientasi yang digunakan untuk pengujian adalah $6,23^\circ + 15^\circ = 21,23^\circ \sim 22^\circ$. [13]

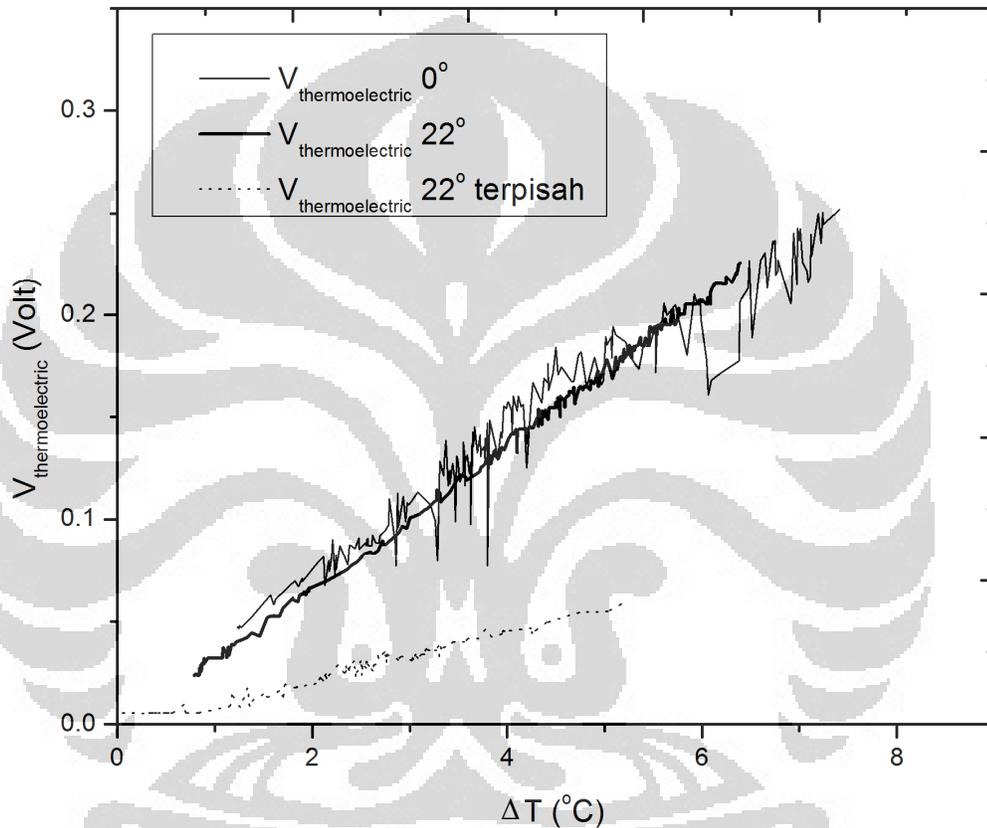
Pada pengujian ini tidak digunakan kipas sebagai bagian dari pendinginan termoelektrik agar data yang didapat merupakan data alami yang didapat sesuai dengan keadaan lingkungan yang sebenarnya tanpa perlu pengaturan kondisi buatan. Selain itu, angin yang terjadi di atap gedung lokasi pengujian kecepatannya sama bahkan dapat mencapai kecepatan yang lebih tinggi daripada kipas angin. Oleh karena itu, pendinginan modul termoelektrik terjadi secara alami hanya dengan konveksi natural.

Berdasarkan hasil yang didapat dari pengujian laboratorium dengan variabel rangkaian yang telah dilakukan sebelumnya dan kemudian dibuktikan dengan hasil dari studi literatur, rangkaian modul termoelektrik yang akan menghasilkan daya terbesar adalah rangkaian seri. Oleh karena itu, pada pengujian lapangan dan seterusnya, rangkaian modul termoelektrik yang digunakan adalah rangkaian seri.

Hasil yang didapat pada pengujian lapangan ini sangat bergantung pada kondisi cuaca ketika pengambilan data dilakukan. Kondisi cuaca yang terjadi ketika pengujian dilakukan tidaklah stabil sehingga data radiasi matahari, temperatur, dan kecepatan angin yang didapat sering berubah-ubah selama pengambilan data. Hal ini mengakibatkan nilai temperatur dan tegangan yang didapat dari hasil pengujian menunjukkan nilai yang fluktuatif dan tidak teratur pada setiap waktunya.

Pengujian dilakukan pada tanggal 14 Maret 2012 untuk pengujian dengan sudut 0° , 12 April untuk pengujian terpisah antara modul termoelektrik dengan *solar cell*, dan 25 April 2012 untuk pengujian dengan sudut 22° . Pada tanggal 14 maret 2012 kondisi cuaca yang terjadi cukup cerah dengan udara ambient rata-rata $34,9^\circ\text{C}$ disertai dengan angin yang cukup kencang dengan rata-rata 1,67 m/s. Pada tanggal 12 April 2012 [18], cuaca di sekitar area pengujian cukup cerah berawan.

Kecepatan angin yang terjadi ketika pengambilan data dilakukan cerah berawan dengan temperatur ambient $34,24^{\circ}\text{C}$. Pada tanggal 25 April 2012 ini cuaca pun cukup cerah berawan dengan temperatur ambient rata-rata $34,81^{\circ}\text{C}$ dan kecepatan angin $0,86\text{ m/s}$. Sedangkan radiasi matahari pada saat pengujian ini dilakukan rata-rata sebesar $635,78\text{ W/m}^2$. Bahkan, tidak lama setelah pengujian pada tanggal 25 April ini dilakukan, terjadi hujan rintik.

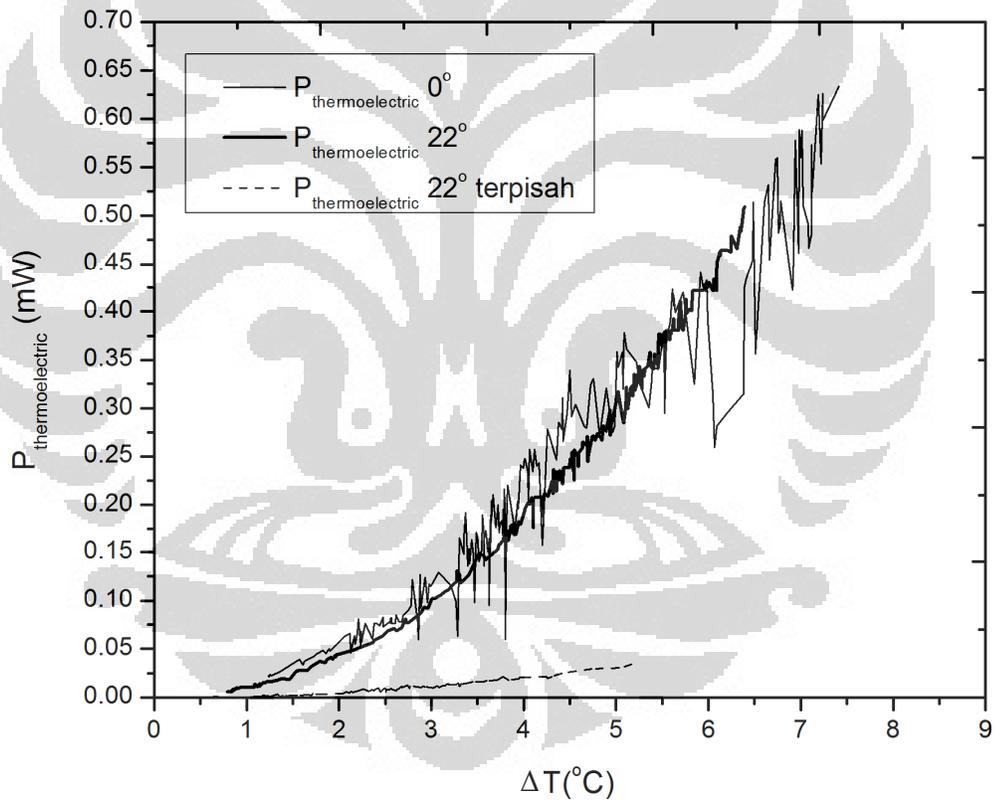


Gambar 4. 12 Grafik perbandingan hasil tegangan modul termoelektrik terhadap ΔT pada field experiment

Grafik tegangan modul termoelektrik yang dihasilkan dari pengujian ini seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. 12 memperlihatkan bahwa tegangan termoelektrik yang dihasilkan oleh pengujian dengan sudut 0° lebih tinggi daripada tegangan yang dihasilkan oleh sudut 22° . Hal ini disebabkan karena perbedaan temperatur pada saat pengujian 0° yang terekam lebih tinggi daripada pengujian sudut 22° . Meskipun demikian, hasil yang didapat dari pengujian sudut 0° nilainya lebih fluktuatif dibandingkan dengan sudut 22° . Sedangkan tegangan

yang dihasilkan dari modul termoelektrik terpisah, bukan merupakan bagian dari sistem *hybrid solar cell*, hasilnya jauh lebih rendah dibandingkan dengan kedua pengujian lapangan *hybrid solar cell*. Ini disebabkan karena jumlah kalor yang tertangkap oleh plat alumunium yang menutupi modul termoelektrik lebih kecil daripada plat *solar cell*, karena plat alumunium ini berwarna silver sedangkan *solar cell* berwarna hitam sehingga kalor yang diserap lebih banyak.

Begitu pula halnya dengan daya yang dihasilkan oleh modul termoelektrik pada pengujian lapangan ini. Karena perbedaan temperatur yang dicapai oleh pengujian dengan sudut 0° lebih tinggi, maka daya yang dihasilkannya juga lebih tinggi seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. 13.



Gambar 4. 13 Grafik perbandingan daya termoelektrik terhadap ΔT pada pengujian lapangan

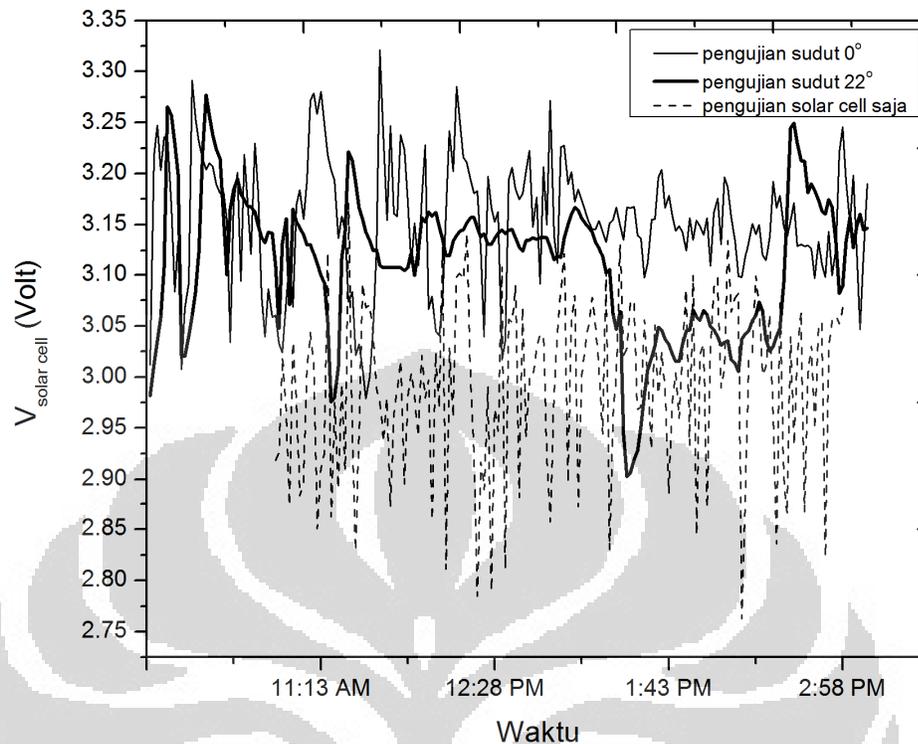
Perbedaan temperatur antara sisi panas dan sisi dingin modul termoelektrik dapat dipengaruhi oleh banyak faktor terutama faktor lingkungan karena pengujian ini dilakukan pada kondisi sebenarnya. Faktor-faktor utama yang

mempengaruhinya adalah panas dari matahari, temperatur ambient, dan kecepatan angin yang terjadi.

Panas dari matahari akan mempengaruhi temperatur ambient. Panas ini pulalah yang memberikan kalor untuk kemudian diterima oleh prototype *hybrid solar cell*. Panas ini kemudian diteruskan ke sisi panas modul termoelektrik. Meskipun pada kedua hari pengujian ini temperatur rata-rata ambient nya saling mendekati, persebaran temperatur ambient terhadap waktunya berbeda. Tidak hanya panas matahari, kecepatan angin pun sangat mempengaruhi. Jika angin yang bertiup cukup kencang, maka pendinginan sisi dingin termoelektrik dapat dilakukan dengan lebih baik.

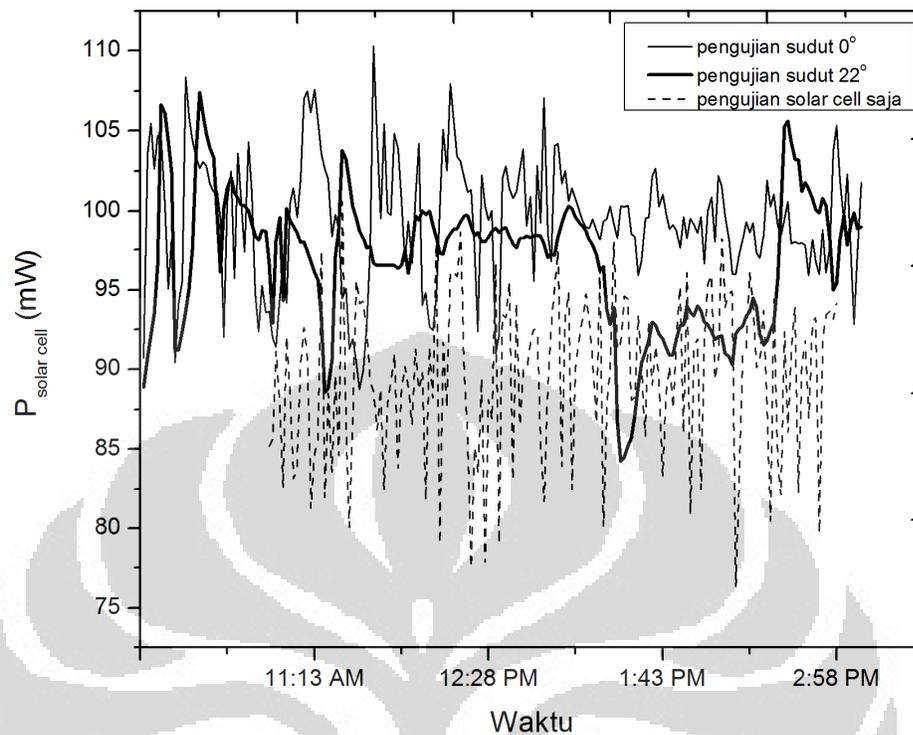
Kecepatan angin pun dapat mempengaruhi temperatur ambient karena dapat membantu proses perpindahan panas secara konveksi yang terjadi selama pengambilan data. Oleh karena itu, perbedaan temperatur yang tercapai antara sisi panas dan sisi dingin termoelektrik bisa lebih tinggi jika kecepatan angin yang terjadi juga lebih tinggi.

Ketika pengujian sudut 0° dilakukan, kecepatan anginnya lebih tinggi dibandingkan ketika pengujian sudut 22° dilakukan. Oleh karena itu, perbedaan temperatur yang didapat pada sudut 0° juga lebih tinggi. Namun, nilainya lebih fluktuatif dibandingkan dengan sudut 22° . Hal ini dapat disebabkan oleh pengaruh panas yang tertangkap lebih stabil. Oleh karena itu, hasil tegangan dan daya keluaran dari modul termoelektrik pada pengujian 0° lebih tinggi, namun hasil yang didapat dari pengujian 22° menunjukkan nilai yang lebih stabil baik sistem tersebut merupakan *hybrid solar cell* atau modul termoelektrik saja.



Gambar 4. 14 Grafik perbandingan tegangan *solar cell* terhadap waktu pada pengujian lapangan

Tidak hanya keluaran tegangan dan daya yang dihasilkan dari modul termoelektrik saja yang dipengaruhi oleh lingkungan, akan tetapi keluaran dari *solar cell* juga sangat dipengaruhi oleh lingkungan. Apalagi, *solar cell* ini sangat bergantung kepada intensitas radiasi matahari yang terjadi selama pengujian dilakukan. Dari grafik tegangan dan daya yang dihasilkan oleh *solar cell* seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. 14 dan Gambar 4. 15 terlihat bahwa keluaran dari pengujian 0° lebih besar dibandingkan dengan keluaran dari pengujian 22° menghadap utara. Namun dari grafik tersebut terlihat pula bahwa besar tegangan dan daya yang dihasilkan oleh *solar cell* tanpa menggunakan TEG hasilnya lebih kecil dibandingkan dengan *hybrid solar cell* yang menggunakan TEG.



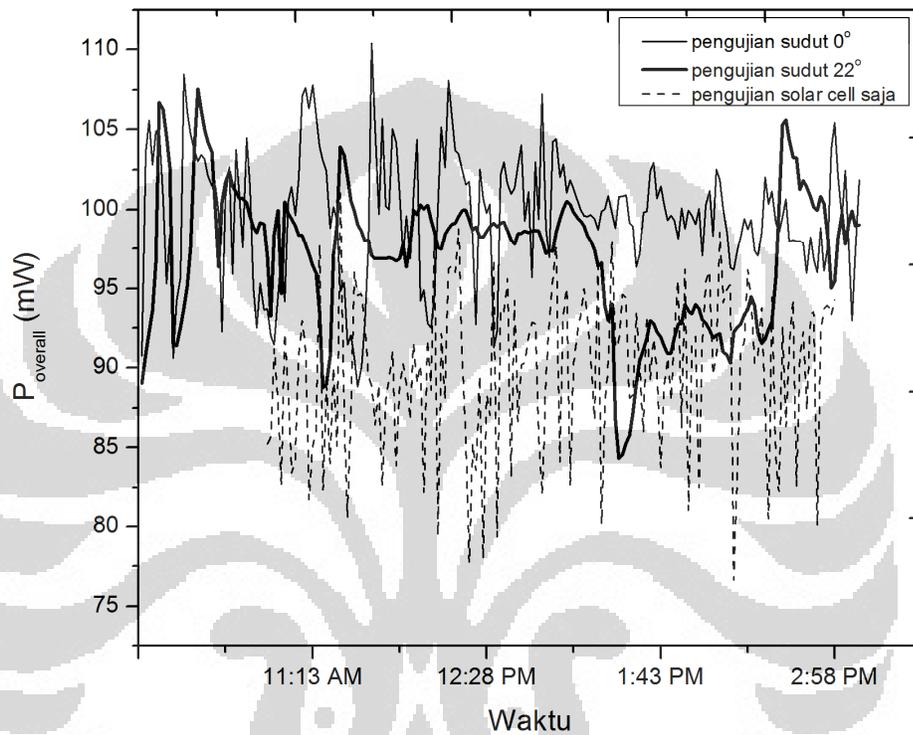
Gambar 4. 15 Grafik perbandingan daya *solar cell* terhadap waktu pada pengujian lapangan

Pada saat pengujian dilakukan, angin yang bertiup di area pengujian pada tanggal 14 Maret 2012 lebih tinggi kecepatannya dibandingkan pada tanggal 25 April 2012. Pada tanggal 14 Maret 2012 lalu, cuaca Indonesia memang sedang mengalami angin kencang. Angin kencang ini berpuncak pada tanggal 12 Maret 2012 [18]. Sedangkan ketika pengujian dilakukan pada tanggal 12 dan 25 April 2012, kondisi cuaca di Indonesia sudah kembali normal sehingga angin yang bertiup di sekitar area pengambilan data juga menurun.

Akan tetapi, rentang waktu pengambilan data 22° dilakukan ketika area pengambilan data sedang berawan atau hujan. Bahkan pengambilan data dengan sudut 22° ini dilakukan ulang karena pernah berhenti akibat hujan yang terjadi. Pada tanggal 25 April 2012 sekitar pukul 13.45 hingga 14.30, sinar matahari terhalang oleh awan sehingga intensitas radiasi matahari juga menurun. Oleh karena itu, pada grafik tegangan dan daya *solar cell* pada Gambar 4. 14 dan Gambar 4. 15 mengalami penurunan yang drastis pada waktu itu.

Sedangkan pengujian yang dilakukan pada tanggal 12 April 2012, yaitu pengujian modul terpisah antara termoelektrik dan *solar cell*, kondisi lingkungan

di sekitar area pengujian cukup stabil. Hanya saja, data yang didapat nilainya lebih kecil daripada *hybrid solar cell*. Hal ini dapat disebabkan karena hambatan *solar cell* meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur. Pada *hybrid solar cell*, kalor ini diserap oleh termoelektrik yang terletak di bawahnya sehingga tegangan yang dihasilkan oleh *solar cell* pada *hybrid solar cell* lebih tinggi.



Gambar 4. 16 Grafik perbandingan daya keseluruhan terhadap waktu pada pengujian lapangan

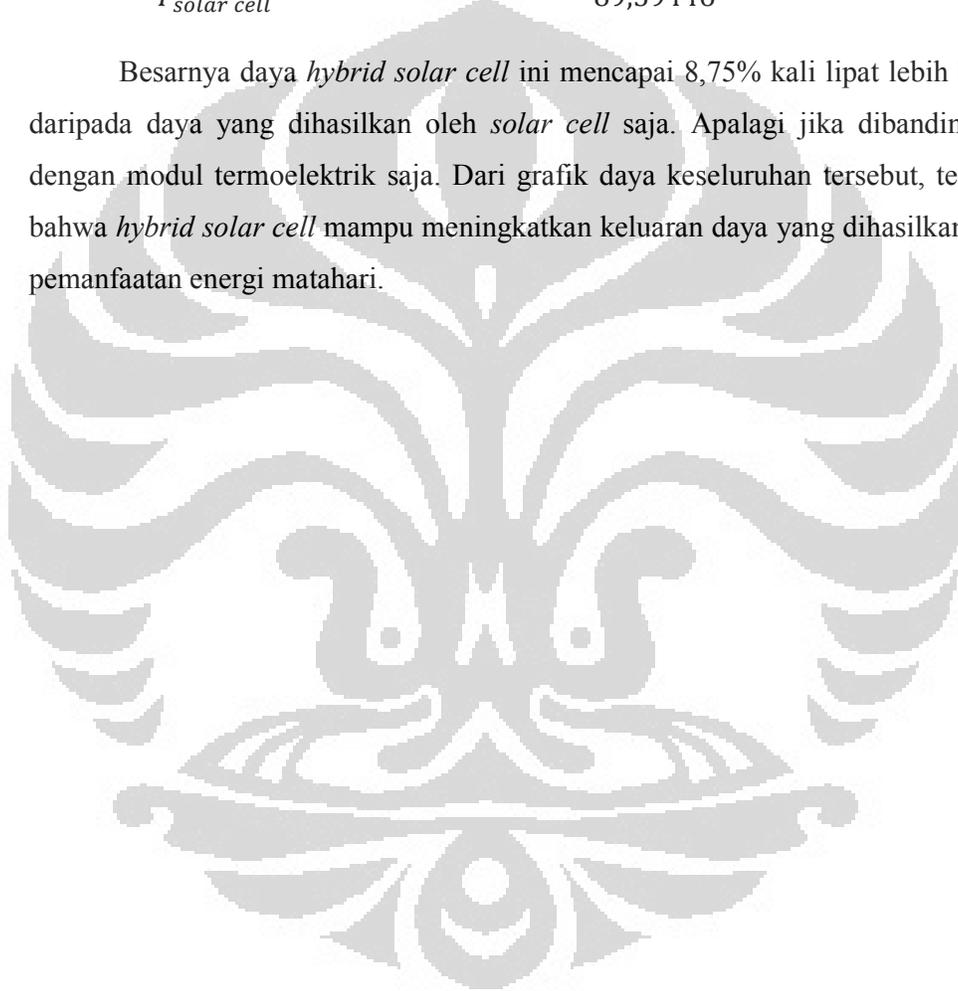
Berdasarkan data daya modul termoelektrik dan *solar cell* yang didapat dari hasil pengujian lapangan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 4. 16 memang menunjukkan bahwa data yang didapat sangat fluktuatif dan tidak teratur. Daya terbesar yang terekam dihasilkan dari pengujian sudut 0° sebesar 117,08 mW dan daya terkecil dari pengujian ini adalah sebesar 93,72 mW. Sedangkan daya terbesar yang berhasil direkam dari pengujian lapangan dengan sudut 22° adalah sebesar 109,64 mW dan daya terkecilnya adalah 83,88 mW. Meskipun pengujian lapangan dengan sudut 0° lebih tinggi, namun nilainya lebih fluktuatif dibandingkan dengan pengujian lapangan dengan sudut 22° .

Sedangkan besarnya daya hasil pengujian *solar cell* tanpa adanya modul termoelektrik jelas terlihat berada di bawah daya pengujian *hybrid solar cell*.

Besarnya daya *solar cell* saja ditunjukkan oleh garis putus-putus pada Gambar 4.16. Apalagi daya yang dihasilkan oleh modul termoelektrik saja. Angkanya jauh di bawah besarnya daya yang dihasilkan dari pengujian lainnya. Daya rata-rata yang didapat dari pengujian *hybrid solar cell* dengan sudut 22° adalah 97,44 mW. Sedangkan daya rata-rata dari *solar cell* saja mencapai 89,59 mW.

$$\frac{P_{\text{hybrid solar cell}} - P_{\text{solar cell}}}{P_{\text{solar cell}}} \times 100\% = \frac{97,4403 - 89,59446}{89,59446} \times 100\% = 8,75\%$$

Besarnya daya *hybrid solar cell* ini mencapai 8,75% kali lipat lebih besar daripada daya yang dihasilkan oleh *solar cell* saja. Apalagi jika dibandingkan dengan modul termoelektrik saja. Dari grafik daya keseluruhan tersebut, terlihat bahwa *hybrid solar cell* mampu meningkatkan keluaran daya yang dihasilkan dari pemanfaatan energi matahari.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Berdasarkan proses yang telah dilakukan dan hasil pengujian yang telah didapat, ada beberapa hal penting yang perlu diperhatikan mengenai *hybrid solar cell*, yaitu:

- a. Rangkaian seri akan memberikan hasil yang tegangan dan daya yang terbaik dari penyusunan modul termoelektrik. Pada pengujian ini, tegangan terbesar yang dihasilkan oleh modul termoelektrik adalah sebesar 0,2766 Volt dan daya sebesar 0,765 mW yang merupakan hasil pengujian dengan lampu halogen 50 Watt. Tegangan rangkaian seri ini lebih besar 241% kali lipat dari tegangan yang dihasilkan oleh rangkaian paralel, dan 60% kali lipat lebih besar dibandingkan dengan rangkaian seri-paralel.
- b. Daya terbesar yang dihasilkan merupakan daya dari rangkaian seri pada pengujian dengan lampu halogen 50 Watt adalah 0,765 mW. Daya terbesar yang dihasilkan dari rangkaian paralel hanya mencapai 8,5% dari rangkaian seri. Sedangkan daya terbesar yang dihasilkan dari rangkaian seri-paralel mencapai 38,9% dari rangkaian seri.
- c. Besarnya daya dan tegangan yang dihasilkan dari *solar cell* pada prototype *hybrid solar cell* ini tidak dipengaruhi oleh rangkaian modul termoelektrik, tetapi dipengaruhi oleh besarnya daya lampu halogen yang digunakan.
- d. Pengujian dengan lampu halogen 50 Watt memberikan hasil tegangan dan daya *solar cell* serta modul termoelektrik yang lebih besar karena energi yang diberikan dari lampu halogen ini juga lebih besar dibandingkan dengan lampu halogen 20 Watt.
- e. Semakin dekat sumber energi, maka temperatur prototype semakin tinggi sehingga menghasilkan tegangan dan daya yang lebih besar. Akan tetapi, kenaikan temperatur ini akan menurunkan kinerja dari *solar cell* karena hambatannya meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur.

- f. Pengujian dengan jarak terdekat, yaitu 20 cm, menghasilkan tegangan dan daya modul termoelektrik yang terbesar, namun tegangan dan daya yang dihasilkan oleh *solar cell*-nya merupakan hasil terkecil. Jarak efektif pengujian adalah 40 cm berdasarkan keluaran daya total yang dihasilkan dari jumlah daya modul termoelektrik dan *solar cell*-nya yang merupakan hasil yang terbesar.
- g. Pengujian lapangan sangat bergantung kepada kondisi lingkungan sekitar. Faktor-faktor yang mempengaruhi kinerja *hybrid solar cell* ini adalah besarnya radiasi matahari, kecepatan angin, kondisi cuaca dan atmosfer di sekitar area pengujian, temperatur ambient, sudut orientasi *hybrid solar cell*.
- h. Berdasarkan hasil pengujian yang telah dilakukan, sudut orientasi solar cell 0° berhasil mencapai tegangan dan daya tertinggi namun nilainya sangat fluktuatif. Sedangkan pengujian dengan sudut 22° nilainya lebih stabil. Namun, nilai ini sangatlah bergantung pula kepada kondisi lingkungan pada saat pengujian dilakukan.
- i. Jika dibandingkan dengan hasil pengujian pada *hybrid solar cell*, *solar cell* saja, dan modul TEG saja, maka terlihat bahwa *hybrid solar cell* menghasilkan tegangan dan daya yang lebih besar.
- j. Daya rata-rata yang didapat dari pengujian *hybrid solar cell* dengan sudut 22° adalah 97,44 mW. Sedangkan daya terbesar dari *solar cell* saja mencapai 89,59 mW. Daya *hybrid solar cell* ini lebih besar 8,75% kali lipat dari daya yang dihasilkan oleh *solar cell* saja.

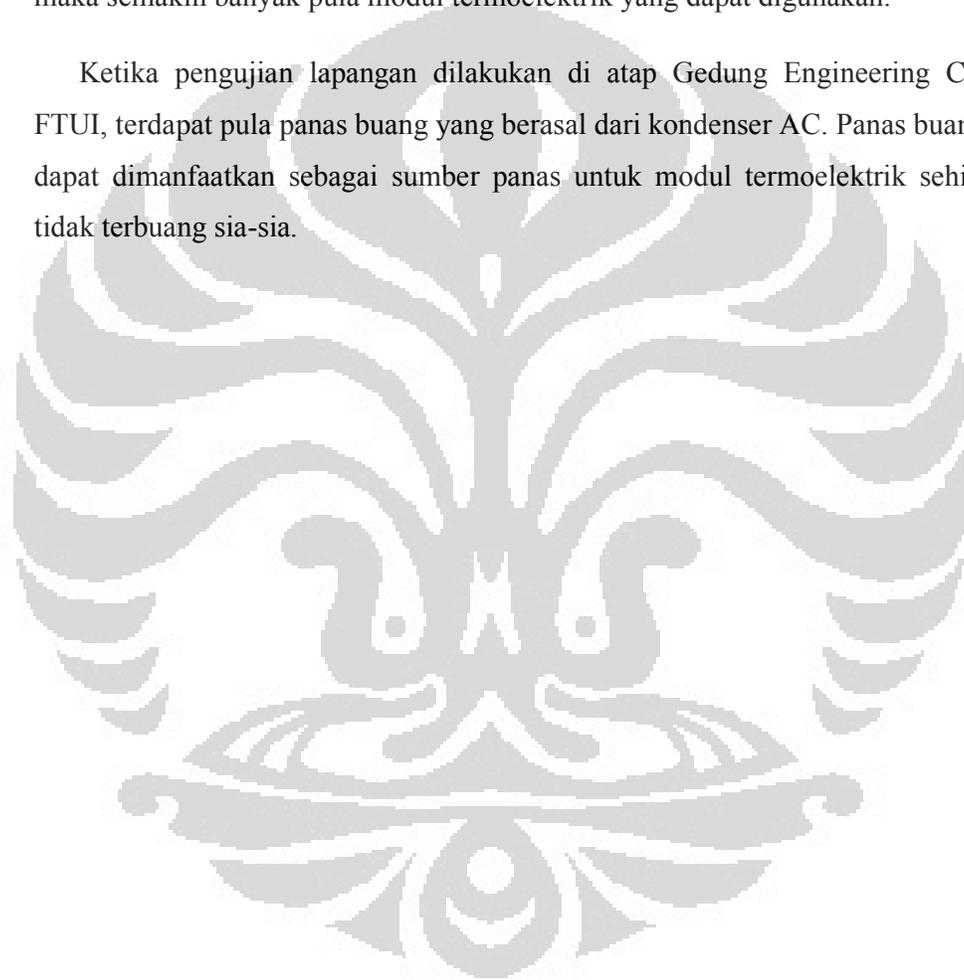
5.2 SARAN

Setelah melakukan pengujian ini, ada beberapa hal yang sebaiknya perlu dicoba untuk meningkatkan kinerja dari *hybrid solar cell*. Sebaiknya untuk pengembangan selanjutnya digunakan air sebagai fluida pendingin sisi dingin modul termoelektrik. Selain membantu meningkatkan perbedaan temperatur di kedua sisi modul termoelektrik, air yang disirkulasikan ini juga dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan air hangat. Selain itu, dalam melakukan pengujian,

sebaiknya digunakan beberapa modul *hybrid solar cell* dan *solar cell* agar variabel pengujian yang ingin diuji dapat dilakukan pada hari yang sama dengan kondisi cuaca yang sama sehingga perbandingannya akan lebih mudah.

Untuk mendapatkan hasil pengujian yang lebih nyata, pengujian selanjutnya mungkin bisa dilakukan dengan ukuran *hybrid solar cell* yang sebenarnya, bukan hanya dalam skala prototype. Karena semakin besar *solar cell* yang digunakan maka semakin banyak pula modul termoelektrik yang dapat digunakan.

Ketika pengujian lapangan dilakukan di atap Gedung Engineering Center FTUI, terdapat pula panas buang yang berasal dari kondenser AC. Panas buang ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber panas untuk modul termoelektrik sehingga tidak terbuang sia-sia.

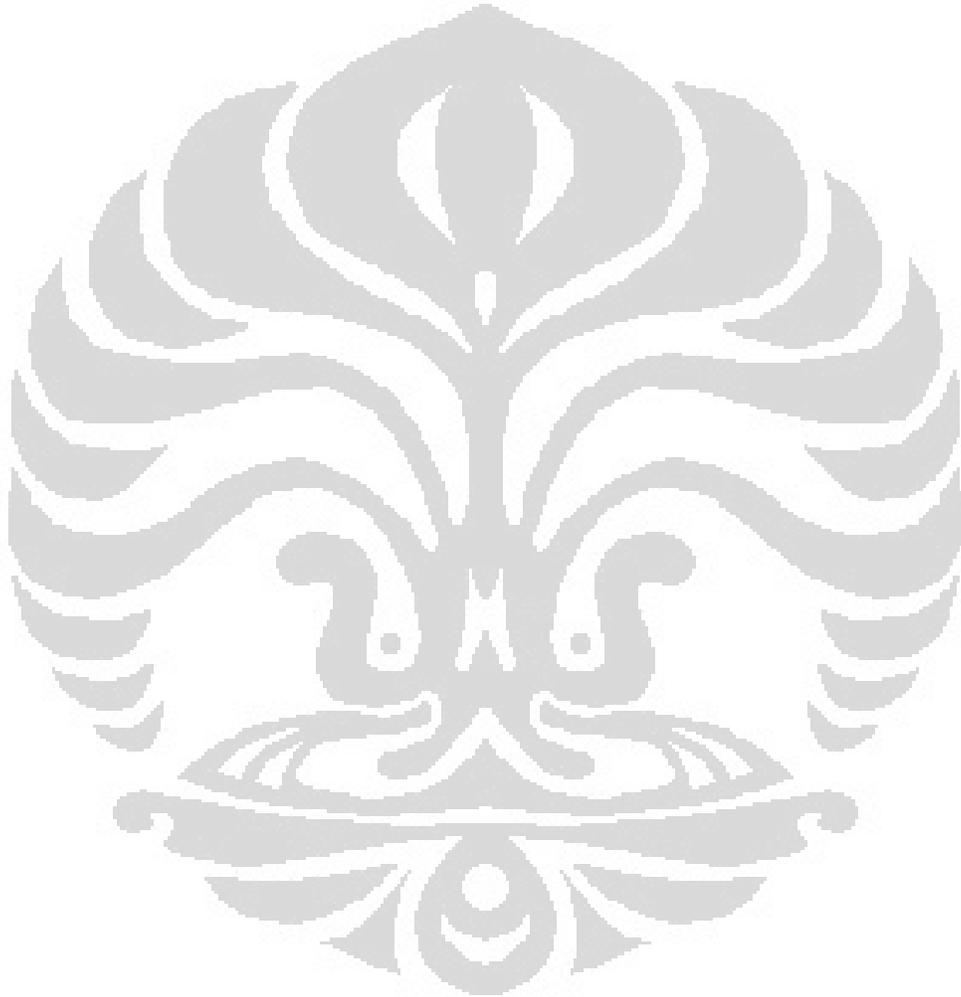


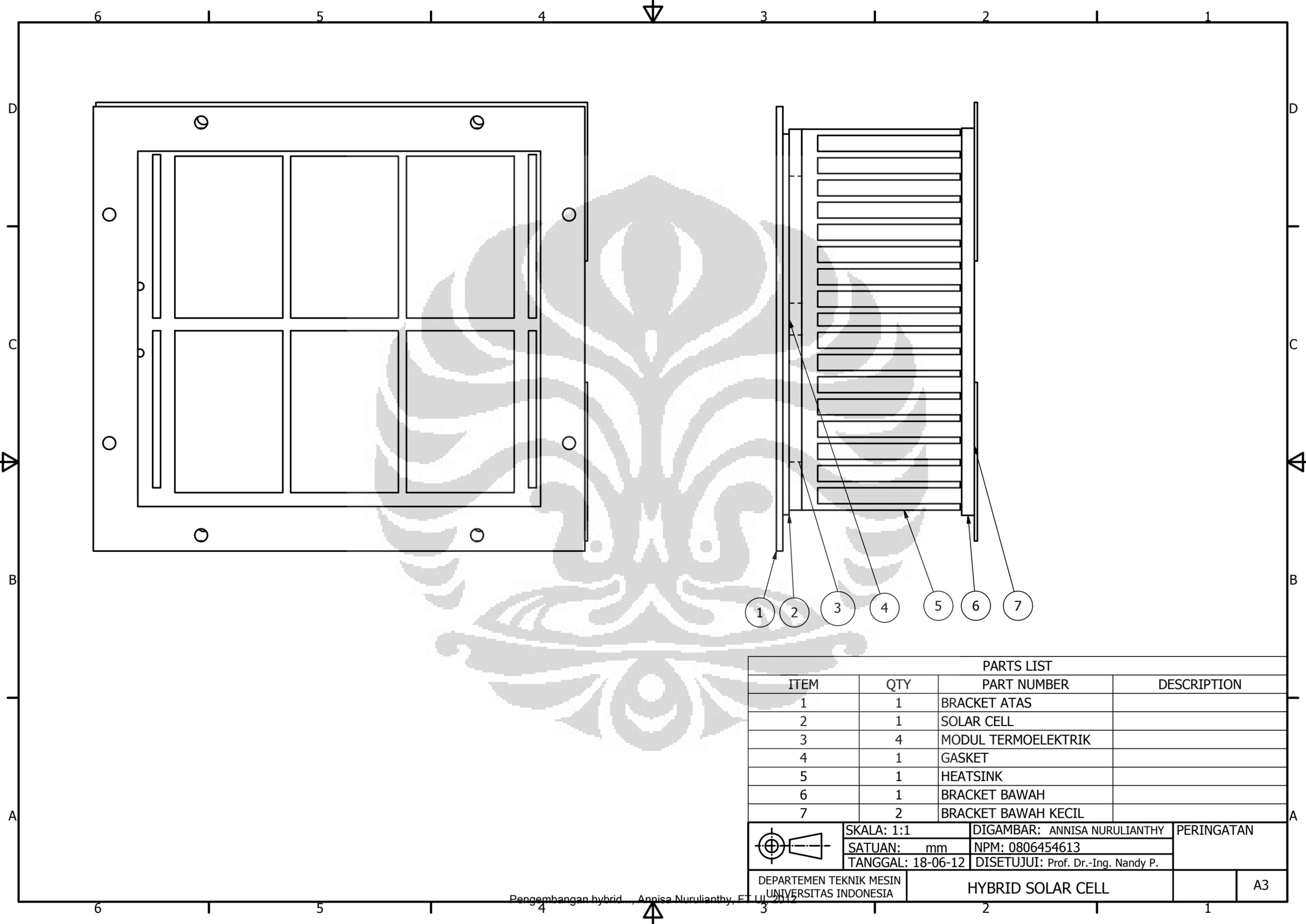
DAFTAR PUSTAKA

- [1] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, "Strategi Pengelolaan Energi Nasional dalam Menjamin Keamanan Ketersediaan Energi," , 2010.
- [2] Xudong Zhao, Stefan Smith, Jihuan Xu, Xiaotong Yu Xingxing Zhanga, "Review of R&D progress and practical application of the solar photovoltaic/thermal (PV/T) technologies," , 2011.
- [3] [Online]. <http://yudhipri.wordpress.com/2010/07/05/termoelektrik-energi-panas-menjadi-listrik/>
- [4] G.G. Maidment, S.A. Kalogirou, K. Yiakoumetti P.G. Charalambous, "Photovoltaic Thermal (PV/T) Collectors: A Review".
- [5] D.W. Vries, W.G.J. and A.A. Van Steenhoven H.A. Zondag, "Thermal and electrical yield of aq combi panel," 1999.
- [6] K. Sumathy M. Arif Hasan, "Photovoltaic Thermal Module Concepts and Their Performance Analysis: A Review," 2010.
- [7] Scribd. [Online]. <http://www.scribd.com/doc/69850880/Efek-Termoelektrik-Dennis-War-A-Sibit-10209016>
- [8] William T Choate Dr. Terry Hendricks, "Engineering Scoping Study of Thermoelectric Generator Systems for Industrial Waste Heat Recovery," 2006.
- [9] J. Khedari, B. Zeghmami, J. Hirunlabh, J. Eakburanawat S. Maneewan, "Investigation on generated power of thermoelectric roof solar collector," 2003.
- [10] [Online]. <http://www.obengware.com/uji/corsairnautilus500.htm>
- [11] Planet Facts. [Online]. <http://planetfacts.org/what-is-solar-radiation/>

- [12] Michael Pidwirny. (2010, January) The Encyclopedia of Earth. [Online].
http://www.eoearth.org/article/Solar_radiation
- [13] Karlina Rosmalindah, "Optimasi Kinerja Panel Surya dengan Pengaturan Panel Sebagai Sun Shading Untuk Menekan Biaya Listrik Bangunan," 2008.
- [14] NASA. [Online].
<http://education.gsfc.nasa.gov/experimental/all98invproject.site/pages/trl/inv2-1.abstract.html>
- [15] Serba-serbi Depok. [Online]. <http://serbaserbidepok.wordpress.com/sejarah-kota-depok/>
- [16] Raldi Artono Koestoer, M. Adhitya, Ardian Roekettino, Bayu Trianto Nandy Putra, "Potensi Pembangkit Daya Termoelektrik Untuk Kendaraan Hibrid," 2009.
- [17] Robert Resnick, Jearl Walker David Halliday, *Fundamentals of Physics*.: Wiley, 2008.
- [18] Cuaca. [Online]. <http://www.antaranews.com/berita/305486/tiga-hari-ke-depan-jakarta-selatan-berpotensi-hujan-angin>
- [19] Yu.V. Vorobiev, L.P. Bulat E.A. Chavez Urbiola, "Solar Hybrid Systems With Thermoelectric Generator," 2011.
- [20] Evelyn N. Wang Nenad Miljkovic, "Modeling and Optimization of Hybrid Solar Thermoelectric Systems With Thermosyphons," 2011.

LAMPIRAN

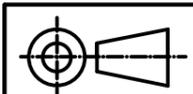
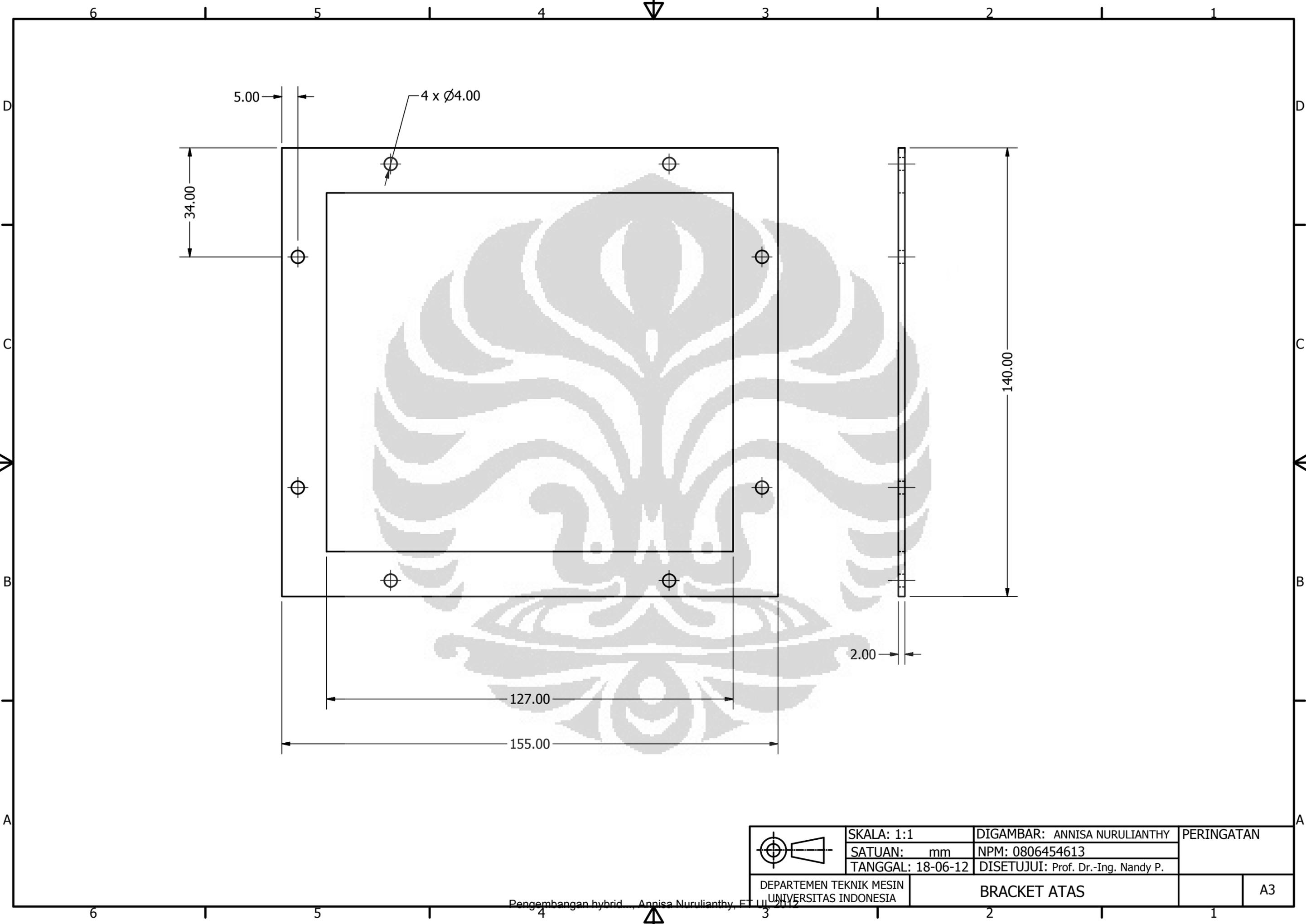




- 1
- 2
- 3
- 4
- 5
- 6
- 7

PARTS LIST			
ITEM	QTY	PART NUMBER	DESCRIPTION
1	1	BRACKET ATAS	
2	1	SOLAR CELL	
3	4	MODUL TERMoeLEKTRIK	
4	1	GASKET	
5	1	HEATSINK	
6	1	BRACKET BAWAH	
7	2	BRACKET BAWAH KECIL	

	SKALA: 1:1	DIGAMBAR: ANNISA NURULIANTHY	PERINGATAN
	SATUAN: mm	NPM: 0806454613	
	TANGGAL: 18-06-12	DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.	
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN UNIVERSITAS INDONESIA	HYBRID SOLAR CELL		A3



SKALA: 1:1
 SATUAN: mm
 TANGGAL: 18-06-12

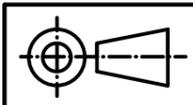
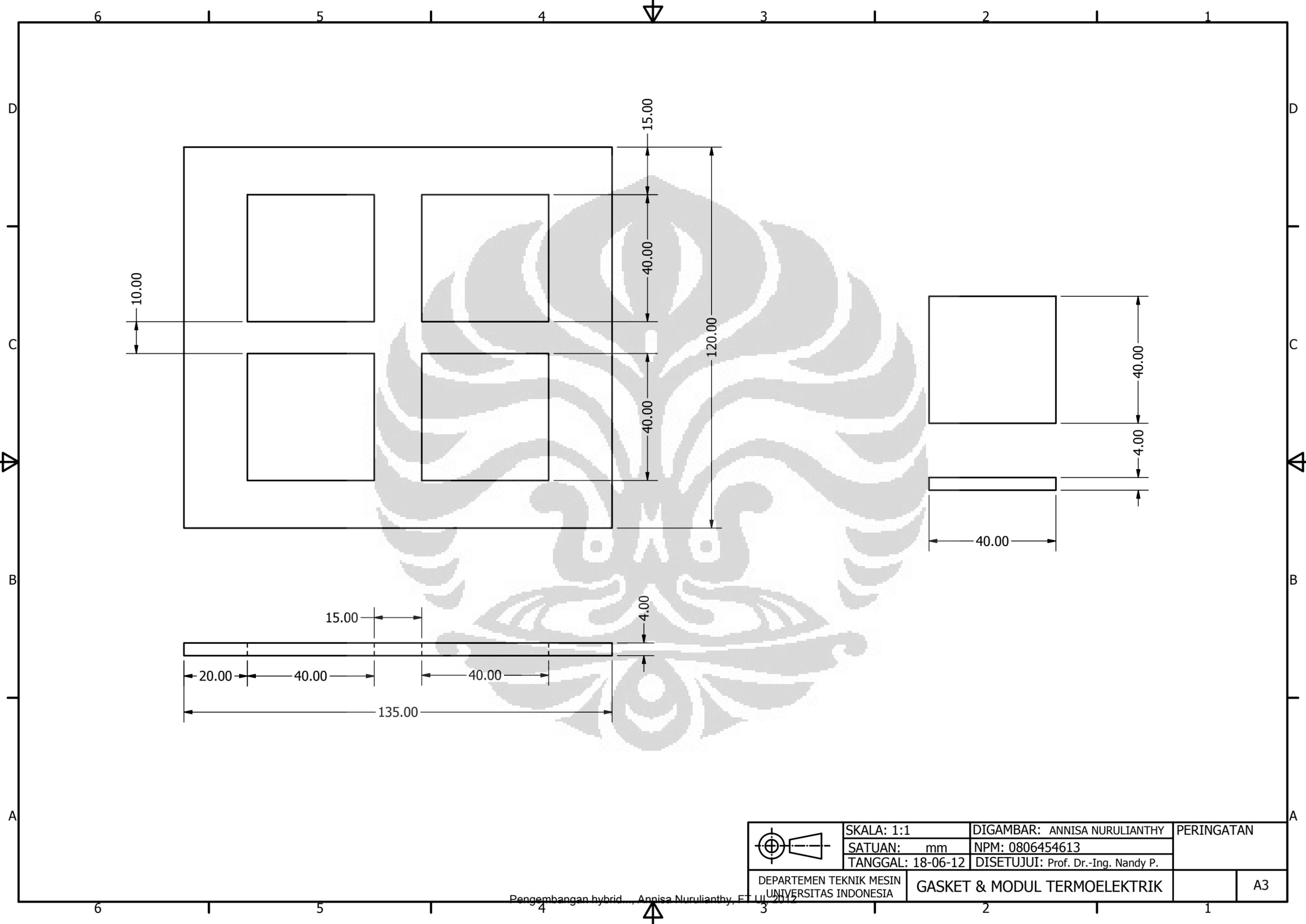
DIGAMBAR: ANNISA NURULIANTHY
 NPM: 0806454613
 DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.

PERINGATAN

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
 UNIVERSITAS INDONESIA

BRACKET ATAS

A3



SKALA: 1:1
 SATUAN: mm
 TANGGAL: 18-06-12

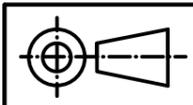
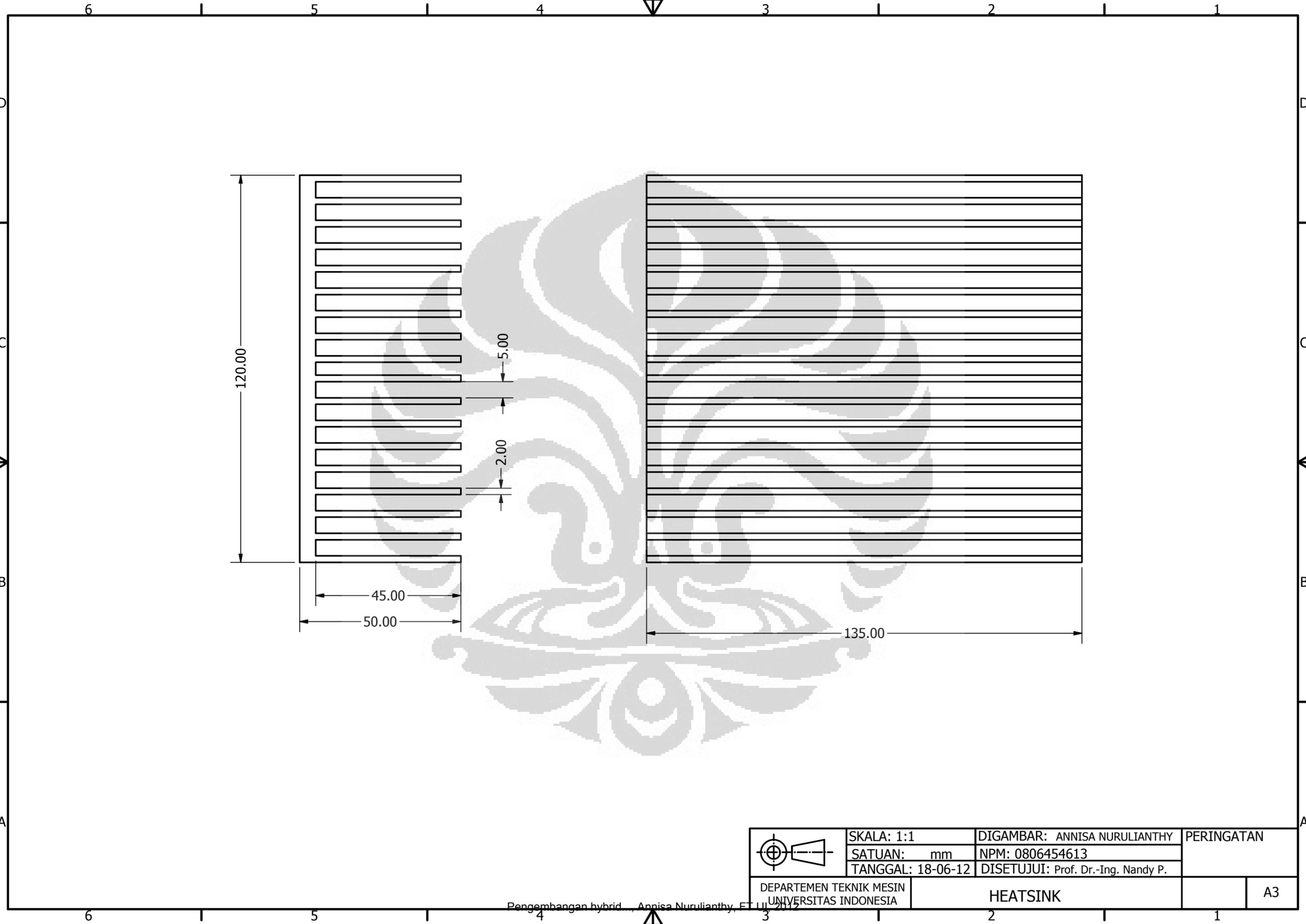
DIGAMBAR: ANNISA NURULIANTHY
 NPM: 0806454613
 DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.

PERINGATAN

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
 UNIVERSITAS INDONESIA

GASKET & MODUL TERMOELEKTRIK

A3



SKALA: 1:1
 SATUAN: mm
 TANGGAL: 18-06-12

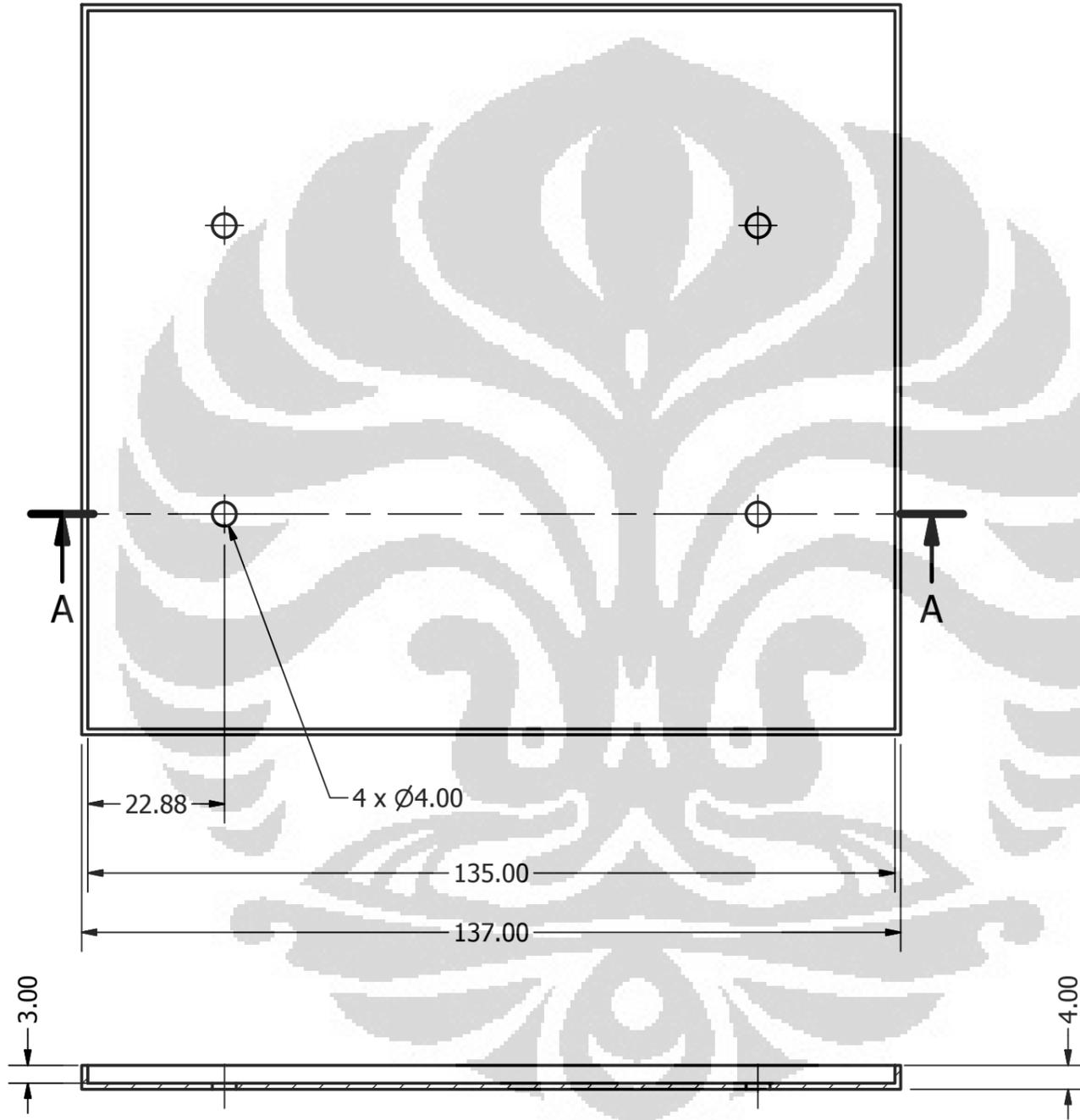
DIGAMBAR: ANNISA NURULIANTHY
 NPM: 0806454613
 DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.

PERINGATAN

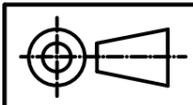
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
 UNIVERSITAS INDONESIA

HEATSINK

A3



SECTION A-A
SCALE 1 : 1



SKALA: 1:1
SATUAN: mm
TANGGAL: 18-06-12

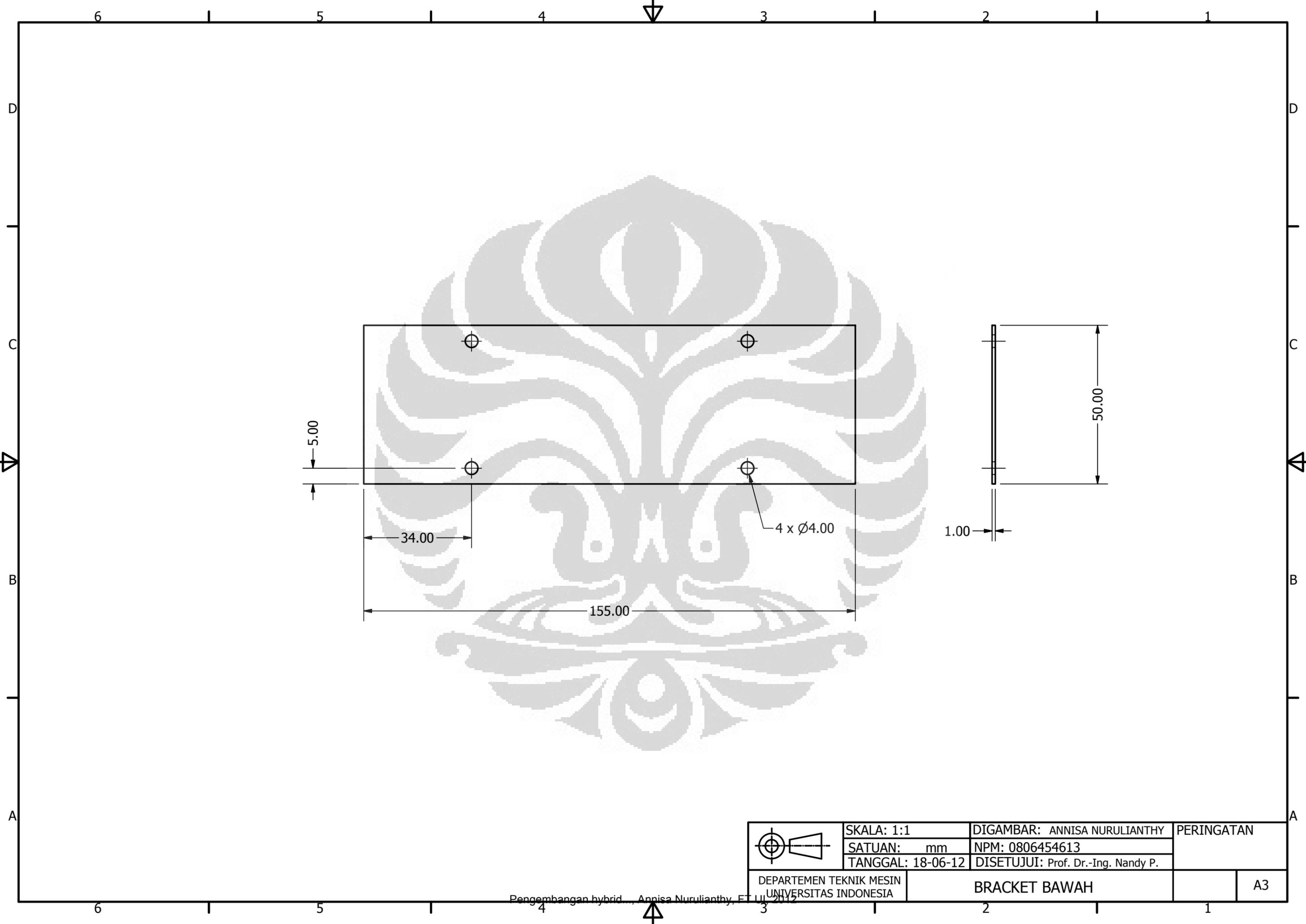
DIGAMBAR: ANNISA NURULIANTHY
NPM: 0806454613
DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.

PERINGATAN

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
UNIVERSITAS INDONESIA

DUDUKAN

A3



5.00

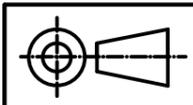
34.00

155.00

4 x Ø4.00

1.00

50.00



SKALA: 1:1
 SATUAN: mm
 TANGGAL: 18-06-12

DIGAMBAR: ANNISA NURULIANTHY
 NPM: 0806454613
 DISETUJUI: Prof. Dr.-Ing. Nandy P.

PERINGATAN

DEPARTEMEN TEKNIK MESIN
 UNIVERSITAS INDONESIA

BRACKET BAWAH

A3