

TUGAS AKHIR

**SIMULASI PENGARUH PEMISAH SPEKTRUM *COLD*
MIRROR TERHADAP PRESTASI HIBRID PV-TEG BERBASIS
LabVIEW**

Oleh :

ANDI ZAHIRAH SALSABILA

D211 16 312



**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

TUGAS AKHIR

**SIMULASI PENGARUH PEMISAH SPEKTRUM *COLD*
MIRROR TERHADAP PRESTASI HIBRID PV-TEG BERBASIS
LabVIEW**

Oleh :

ANDI ZAHIRAH SALSABILA

D211 16 312

Merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada
Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2020**

LEMBAR PENGESAHAN

Tugas akhir ini diajukan untuk memenuhi salah satu persyaratan mengikuti Ujian Akhir guna memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin

JUDUL:

SIMULASI PENGARUH PEMISAH SPEKTRUM *COLD MIRROR* TERHADAP PRESTASI HIBRID PV-TEG BERBASIS LabVIEW

**ANDI ZAHIRAH SALSABILA
D211 16 312**

Telah diperiksa dan disetujui oleh:

Hari/Tanggal : Selasa / 01 Desember 2020

Dosen Pembimbing I



Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT.
NIP. 19680301 199702 2 001

Dosen Pembimbing II



Prof. Dr-Ing Ir. Wahyu H Piarah, MSME.
NIP. 19600302 198609 1 001

Mengetahui,

Ketua Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin



Dr. Eng. Jalaluddin, ST., MT.
NIP. 19720825 200003 1 001

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI

Saya yang bertanda – tangan dibawah ini:

NAMA : Andi Zahirah Salsabila
NIM : D211 16 312
JUDUL SKRIPSI : Simulasi Pengaruh Pemisah Spektrum *Cold Mirror* Terhadap Prestasi Hibrid PV-TEG Berbasis LabVIEW

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa Skripsi ini merupakan hasil penelitian, pemikiran dan pemaparan asli saya sendiri. Saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan - bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagai bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijazah pada Universitas Hasanuddin atau perguruan tinggi lainnya.

Apabila dikemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik sesuai dengan peraturan yang berlaku di Universitas Hasanuddin.

Demikian pernyataan ini saya buat.

Gowa, 26 / 11 / 2020

Yang membuat pernyataan,



Andi Zahirah Salsabila

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Simulasi Pengaruh Pemisah Spektrum *Cold Mirror* Terhadap Prestasi Hibrid PV-TEG Berbasis LabVIEW”**. Tidak lupa penulis mengucapkan shalawat dan salam kepada junjungan Nabi Besar Muhammad SAW.

Penyusunan skripsi ini merupakan salah satu syarat dalam menyelesaikan studi untuk memperoleh gelar Sarjana pada Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Makassar.

Banyak kendala yang dihadapi oleh penulis dalam rangka penyusunan skripsi ini, berbagai pihak telah banyak memberikan dorongan, bantuan serta masukan secara langsung maupun tidak langsung, terutama dan teristimewa dipersembahkan kepada kedua orang tua. Kepada Almarhum Ayah Drs. H. Andi Abutahir dan Ibu Hj. Andi Hasrawati Muin tercinta yang senantiasa memberikan rasa sayang, didikan, materi serta doa yang selalu di panjatkan pada Allah kepada penulis.

Penulis juga ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada semua pihak yang telah memberikan bimbingan dan petunjuk, terutama kepada:

1. Prof. Dr. -Ing. Wahyu H Piarah, MSME dan Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT., selaku pembimbing atas bantuan dan bimbingan yang telah diberikan mulai dari penyusunan proposal, pelaksanaan penelitian sampai dengan penyusunan skripsi ini.
2. Dr. Eng. Jalaluddin., ST., MT., selaku Ketua Tim Penguji sekaligus Ketua Departemen Teknik Mesin Universitas Hasanuddin dan Ir. Andi Mangkau, MT., selaku anggota tim penguji atas waktu dan segala masukan yang bermanfaat dalam penyusunan skripsi ini
3. Seluruh dosen dan staf pada Program Studi Teknik Mesin Universitas Hasanuddin atas segala ilmu dan masukan selama penulis kuliah.

4. Kepada sahabat saya Khairul Cangara, Sarah Sakinah dan seluruh teman-teman COMPREZZOR 2016 atas support canda dan tawa yang selalu menghilangkan rasa lelah dalam menjalani proses-proses yang telah dilalui hingga sampai saat ini.
5. Serta semua pihak yang tidak bisa disebut satu persatu dalam membantu penulis.

Penulis menyadari bahwa naskah skripsi ini masih banyak kekurangan oleh karena itu segala kritik dan saran dari pembaca sangat diharapkan demi perbaikan dalam skripsi ini. Akhirnya semoga skripsi ini dapat memberikan manfaat bagi perkembangan energi terbarukan.

Makassar, Oktober 2020

Penulis

DAFTAR ISI

Halaman Sampul	i
Halaman Judul	ii
Lembar Pengesahan	iii
Kata Pengantar	iv
Daftar Isi	vi
Daftar Gambar	viii
Daftar Tabel	x
Daftar Simbol	xi
Abstrak	xiv
BAB I	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah.....	3
BAB II	
2.1 Spektrum Matahari.....	4
2.2 <i>Cold Mirror</i>	5
2.3 Termoelektrik Generator.....	7
2.4 Lensa Fresnel.....	8
2.5 Fotovoltaik (PV).....	9
2.6 Model Hibrid PV-TEG.....	11
2.7 LabVIEW.....	16
BAB III	
3.1 Rancangan Penelitian.....	18
3.2 Skema Prosedur Perhitungan PV-TEG Hibrid.....	18
3.3 Alur Penelitian.....	19
3.4 Data Spesifikasi Perangkat Sistem Hibrid PV-TEG.....	20
BAB IV	
4.1 Perbandingan Hasil Simulasi <i>Spectral Irradiance</i>	22
4.2 Perbandingan Hasil Simulasi PV.....	25
4.3 Perbandingan Hasil Simulasi TEG.....	27
4.4 Simulasi Hibrid PV-TEG.....	28
4.5 Perbandingan Model Perubahan Intensitas PV.....	29
4.6 Perbandingan Model Perubahan Temperatur PV.....	31
4.7 Perbandingan Model Perubahan Temperatur TEG.....	33
4.8 Radiansi Spektral.....	35
4.9 Model Simulasi PV pada LabVIEW.....	40
4.10 Model Simulasi TEG pada LabVIEW.....	43
4.11 Model Hibrid PV-TEG.....	48
4.12 Model Perubahan Intensitas PV.....	49
4.13 Model Perubahan Temperatur PV.....	51
4.14 Model Perubahan Temperatur TEG.....	52

BAB V	
5.1 Kesimpulan.....	55
5.2 Saran.....	55
Daftar Pustaka.....	56

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Pengukuran Spektrum Matahari AM1.5 Global (ASTMG173), AM1.5 Direct (ASTMG173) dan AM0 (ASTM E490)	4
Gambar 2.2	<i>Cold Mirror</i>	5
Gambar 2.3	Teknis panjang Gelombang 0° dan 45°	6
Gambar 2.4	Modul Generator Termoelektrik	7
Gambar 2.5	(a) Besarnya energi kinetik elektron ditandai dengan tanda anak panah, (b) Banyaknya elektron ditandai dengan titik-titik	7
Gambar 2.6	(a) Reflective Fresnel lens. (b) Refractive Fresnel lens	8
Gambar 2.7	Model pengujian sistem hibrid PV-TEG-lensa Fresnel	9
Gambar 2.8	Diagram yang menunjukkan efek fotovoltaik.....	10
Gambar 2.9	Sistem hibrid PV-TEG: (a) digram sistem hibrid dengan <i>splitter</i> ; (b) aliran energi pada sistem hibrid	12
Gambar 2.10	Spektrum gelombang AM1.5D dalam dua daerah untuk CPV dan TE	12
Gambar 2.11	(a) Prinsip desain PV-TEG (<i>cold mirror</i>); (b) setting eksperimen	15
Gambar 2.12	Data penggunaan <i>cold mirror</i>	16
Gambar 2.13	Tampilan <i>Front Panel</i> dan <i>Block Diagram</i> LabVIEW	17
Gambar 3.1	Skema PV-TEG hibrid.....	18
Gambar 3.2	Bagan Alir Penelitian.....	19
Gambar 4.1	Variasi sun AM1.5 Direct (ASTMG173) (a) Menggunakan <i>software</i> Matlab (Hariyanto, 2019) (b) Menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	22
Gambar 4.2	Variasi sun AM1.5D setelah melewati lensa Fresnel dan <i>hot mirror</i> (a) Menggunakan <i>software</i> Matlab (Hariyanto, 2019) (b) Menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	23
Gambar 4.3	Hasil simulasi kurva I-V dan kurva P-V pada fotovoltaik (a) Menggunakan <i>software</i> Matlab (Hariyanto, 2019) (b) Menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	25
Gambar 4.4	Hasil simulasi TEG (a) Menggunakan <i>software</i> Matlab (Hariyanto, 2019) (b) Menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	27
Gambar 4.5	Hasil simulasi hibrid PV-TEG menggunakan <i>software</i> Matlab (Hariyanto, 2019).....	28
Gambar 4.6	Hasil simulasi hibrid PV-TEG menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	28
Gambar 4.7	Kurva perubahan intensitas I-V (a) Menggunakan <i>software</i> Matlab (Hariyanto, 2019) (b) Menggunakan <i>software</i> LabVIEW	29
Gambar 4.8	Kurva perubahan intensitas P-V (a) Menggunakan <i>software</i> Matlab (Hariyanto, 2019) (b) Menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	29
Gambar 4.9	Kurva perubahan temperatur I-V (a) Menggunakan <i>software</i> Matlab (Hariyanto, 2019) (b) Menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	31

Gambar 4.10	Kurva perubahan temperatur P-V (a) Menggunakan <i>software</i> Matlab (Hariyanto, 2019) (b) Menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	31
Gambar 4.11	Kurva perubahan temperatur V-I (a) Menggunakan <i>software</i> Matlab (Hariyanto, 2019) (b) Menggunakan <i>software</i> LabVIEW	33
Gambar 4.12	Kurva perubahan temperatur P-I (a) Menggunakan <i>software</i> Matlab (Hariyanto, 2019) (b) Menggunakan <i>software</i> LabVIEW	33
Gambar 4.13	<i>Block diagram</i> variasi sun AM1.5 Direct (ASTMG173)	36
Gambar 4.14	<i>Front panel</i> variasi sun AM1.5 Direct (ASTMG173).....	37
Gambar 4.15	Variasi sun AM1.5 Direct (ASTMG173) sebelum melewati lensa frenal.....	38
Gambar 4.16	Variasi sun AM1.5 Direct (ASTMG173) setelah melewati lensa frenal.....	38
Gambar 4.17	Variasi sun AM1.5 Direct (ASTMG173) setelah melewati lensa frenal dan <i>cold mirror</i> yang direfleksikan ke PV.....	39
Gambar 4.18	Variasi sun AM1.5 Direct (ASTMG173) setelah melewati lensa frenal dan <i>cold mirror</i> yang direfleksikan ke TEG.....	39
Gambar 4.19	Rangkaian equivalen dioda tunggal PV	40
Gambar 4.20	Diagram blok persamaan (4)-(13).....	42
Gambar 4.21	Front Panel simulasi PV.....	42
Gambar 4.22	Hasil simulasi kurva I-V dan kurva P-V pada fotovoltaiik.....	43
Gambar 4.23	Skema resistansi internal TEG ketika daya maksimum (Mawi & Kazuz, 2014).....	44
Gambar 4.24	Diagram blok persamaan (14)-(22).....	45
Gambar 4.25	Front Panel Simulasi TEG	46
Gambar 4.26	Hasil simulasi kurva V-I dan kurva P-I pada TEG.....	47
Gambar 4.27	Diagram blok hibrid PV-TEG.....	48
Gambar 4.28	Hasil simulasi hibrid PV-TEG.....	49
Gambar 4.29	Kurva perubahan intensitas V-I.....	49
Gambar 4.30	Kurva perubahan intensitas V-P.....	50
Gambar 4.31	Kurva Perubahan Temperatur I-V.....	51
Gambar 4.32	Kurva Perubahan Temperatur V-P.....	52
Gambar 4.33	Kurva Perubahan Temperatur I-V.....	53
Gambar 4.34	Kurva Perubahan Temperatur I-P.....	53

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1	Spesifikasi PV	20
Tabel 3.2	Spesifikasi TEG	20
Tabel 3.3	Spesifikasi Cold Mirror	21
Tabel 3.4	Spesifikasi Lensa Fresnel.....	21
Tabel 4.1	Data hasil perhitungan integral spektrum AM1.5D menggunakan <i>software</i> Matlab.....	24
Tabel 4.2	Data hasil perhitungan integral spektrum AM1.5D menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	24
Tabel 4.3	Persentase kesalahan data hasil perhitungan integral spektrum AM1.5D menggunakan <i>software</i> Matlab dan LabVIEW.....	24
Tabel 4.4	Data hasil simulasi PV.....	26
Tabel 4.5	Data hasil simulasi TEG.....	27
Tabel 4.6	Data hasil simulasi hibrid PV-TEG.....	29
Tabel 4.7	Data Hasil Perubahan Intensitas PV menggunakan <i>software</i> Matlab.....	30
Tabel 4.8	Data Hasil Perubahan Intensitas PV menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	30
Tabel 4.9	Persentase kesalahan data Hasil Perubahan intensitas PV menggunakan <i>software</i> Matlab dan LabVIEW.....	30
Tabel 4.10	Data Hasil Perubahan Temperatur PV menggunakan <i>software</i> Matlab.....	32
Tabel 4.11	Data Hasil Perubahan Temperatur PV menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	32
Tabel 4.12	Persentase kesalahan data Hasil Perubahan Temperatur PV menggunakan <i>software</i> Matlab dan LabVIEW.....	32
Tabel 4.13	Data Hasil Perubahan Temperatur TEG menggunakan <i>software</i> Matlab.....	34
Tabel 4.14	Data Hasil Perubahan Temperatur TEG menggunakan <i>software</i> LabVIEW.....	34
Tabel 4.15	Persentase kesalahan data Hasil Perubahan Temperatur TEG menggunakan <i>software</i> Matlab dan LabVIEW.....	34
Tabel 4.16	Data Hasil Perhitungan Integral Spektrum AM1.5D.....	37
Tabel 4.17	Data Hasil Perubahan Intensitas PV	50
Tabel 4.18	Data Hasil Perubahan Temperatur PV	52
Tabel 4.19	Data Hasil Perubahan Temperatur TEG	54

DAFTAR SIMBOL

Lambang / Singkatan	Arti dan Keterangan
AM1.5D	Air mass 1.5 Direct
PV	Fotovoltaik
PV	Fotovoltaik
TEG	Generator Termolektrik
I-V	Arus-Tegangan
P-V	Daya-Tegangan
H	Densitas daya (Wm^{-2})
$F(\lambda)$	Spektral irradiansi ($\text{Wm}^{-2}\mu\text{m}^1$)
λ	Panjang gelombang
I_{PV}	Arus terukur pada PV (A)
I_{TEG}	Arus terukur pada TEG (A)
I_{ph}	Arus foton yang dibangkitkan (A)
I_s	Arus dioda (A)
I_{rs}	Arus hambatan (A)
I_{sc}	Arus hubung singkat (A)
I_{MP}	Arus pada daya maksimum (A)
V_{oc}	Tegangan pada rangkaian terbuka (V)
V_{PV}	Tegangan terukur pada PV (V)
V_{TEG}	Tegangan terukur pada TEG (V)
V_{MP}	Tegangan pada Daya Maksimum (V)

P_{PV}	Daya keluaran PV (W)
P_{TEG}	Daya keluaran TEG (W)
P_{MP}	Daya maksimum (W)
η_{PV}	Efisiensi PV (%)
η_{TEG}	Efisiensi TEG (%)
R_s	Hambatan seri (Ω)
R_{sh}	Hambatan paralel (Ω)
R_{TEG}	Hambatan internal TEG (Ω)
R_{LOAD}	Hambatan eksternal TEG (Ω)
T_H	Temperatur sisi panas ($^{\circ}C$)
T_C	Temperatur sisi dingin ($^{\circ}C$)
G	Irradiasi (W/m^2)
G_0	Irradiasi standart (W/m^2)
FF	Faktor pengisian PV
q	Muatan elektron ($1.602 \times 10^{-19} C$)
k	Konstanta Boltzman ($1,38 \times 10^{-23} J$)
k_i	Konduktivitas arus ($0,0023 A/^{\circ}C$)
ΔT	Perbedaan temperatur ($^{\circ}C$)
ΔV	Perbedaan tegangan
α	Koefisien Seebeck
k	Konduktivitas termal ($W/cm.K$)
t	Tebal TEG (m)
T	Temperatur ($^{\circ}C$)

T_0	Temperatur Standar ($^{\circ}\text{C}$)
N_s	Jumlah sel seri pada modul PV
N_p	Jumlah sel paralel pada modul PV
E_g	Energi gap (amorphous silicone = 1)
A	Faktor ideal dioda (amorphous silicone = 1)
A_{PV}	Luas permukaan modul PV (m^2)
A_{TEG}	Luas permukaan modul TEG (m^2)

ABSTRAK

Penelitian ini dilakukan berdasarkan pemanfaatan sumber energi baru terbarukan, khususnya energi surya. Energi surya dapat dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan sel fotovoltaik (PV) dan termoelektrik generator (TEG). Oleh karena itu, dilakukan simulasi pengaruh pemisah spektrum *cold mirror* terhadap prestasi hibrid PV-TEG. Simulasi ini dilakukan dengan menggunakan program LabVIEW. Pada simulasi ini, standar spektrum radiasi matahari yang digunakan adalah AM1.5D. Radiasi yang datang ditransmisikan dengan menggunakan lensa Fresnel. Transmisi radiasi dari lensa tersebut diteruskan ke *cold mirror*, dimana spektral irradianya terbagi menjadi 2 yaitu direfleksikan ke modul PV dan ditransmisikan ke modul TEG. Spektral irradians yang direfleksikan ke modul PV pada panjang gelombang 400-690 nm dan ditransmisikan ke modul TEG pada panjang gelombang 710-1150 nm. Dari pemodelan dan simulasi Hibrid PV-TEG menggunakan program LabVIEW dihasilkan daya dan efisiensi sebesar 240,635 W/m² dan 27%.

Kata kunci: Fotovoltaik, Termoelektrik generator, Spektrum cahaya, *Cold mirror*, Daya output.

ABSTRACT

This research was conducted based on the use of renewable energy sources, especially solar energy. Solar energy can be converted into electrical energy using photovoltaic (PV) cells and thermoelectric generator (TEG). Therefore, a simulation of the effect of the cold mirror spectrum separator on the performance of PV-TEG hybrids was carried out. This simulation is carried out using the LabVIEW program. In this simulation, the solar radiation spectrum used is AM1.5D. The incoming radiation is transmitted using a Fresnel lens. The radiation transmission from the lens is forwarded to the cold mirror, where the spectral irradiance is divided into 2, which is reflected in the PV module and transmitted to the TEG module. Spectral irradians are reflected to the PV module at a wavelength of 400-690 nm and transmitted to the TEG module at a wavelength of 710-1150 nm. From the PV-TEG hybrid modeling and simulation using the LabVIEW program, the resulting power and efficiency are 240,635 W/m² and 27%.

Keywords: Photovoltaic, Thermoelectric generator, Light spectrum, Cold mirror, Output power.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara umum, energi adalah suatu kemampuan dalam melakukan kerja. Kini ketersediaan energi di Indonesia semakin berkurang. Hal ini disebabkan oleh berkurangnya sumber energi sebagai akibat ketidakseimbangan antara kebutuhan dengan jumlah energi yang tersedia. Pada perkembangan teknologi kini, terdapat berbagai energi alternatif dan energi baru terbarukan untuk mengurangi dampak terjadinya pemanasan global. Namun ketersediaan sumber energi baru terbarukan di Indonesia masih belum dimanfaatkan secara maksimal. Penelitian ini dilakukan berdasarkan pemanfaatan sumber energi baru terbarukan, khususnya energi surya. Energi surya merupakan energi yang melimpah, kontinu, dan ramah lingkungan karena tidak memancarkan emisi gas karbon yang berbahaya yang mempengaruhi perubahan iklim yang ekstrim. Energi surya dapat dikonversi menjadi energi listrik dengan menggunakan sel surya atau sel fotovoltaik (PV). Dari hasil penelitian menurut Makki et al. (2015) menunjukkan bahwa PV dapat menyerap hingga 80% radiasi matahari, namun tidak semua dapat diubah menjadi energi listrik sebagian menjadi limbah panas yang dapat meningkatkan temperatur sel yang bisa menyebabkan turunnya efisiensi PV. Penelitian tentang teknik pendinginan PV untuk menjaga kestabilan temperatur dengan memanfaatkan limbah panas telah banyak dilakukan menggunakan fluida gas, cair oleh Chow et al. (2006), Li et al. (2011), Lin et al. (2001) dan pemanfaatan Termoelektrik Pendingin (TEC) oleh Kane & Verma (2013).

Selain termoelektrik pendingin (TEC) terdapat pula termoelektrik generator (TEG) yang merupakan perangkat pembangkit daya akibat perbedaan temperatur antara kedua sisi TEG. Pengembangan penelitian penggabungan PV dan TEG untuk menghasilkan daya *output* dan meningkatkan efisiensi telah banyak dilakukan, di antaranya Chang et al. (2011); Chang & Yu (2012); Su et al. (2014). Adapun model pengembangan

lanjutan PV-TEG hibrid yang memisahkan spektrum antara sinar inframerah (IR), sinar ultraviolet (UV), dan cahaya tampak (VL) dari energi matahari dipopulerkan oleh Ju et al. (2012); Li et al. (2014); Elsarrag et al. (2015), yang dikenal dengan istilah *beam splitter*, pengembangan ini dilakukan karena ingin mengamati kerja maksimum dari PV dan TEG.

Untuk model simulasi fotovoltaik dan generator termoelektrik beberapa penelitian telah dilakukan oleh Jadin dkk. (2015); Zainal & Yusoff (2016); Rukdq et al. (2017); Belkassmi et al. (2018) untuk menganalisa hasil output daya dan efisiensi. Namun dalam penelitian mereka, belum ada model simulasi hibrid PV-TEG yang memisahkan spektrum cahaya dengan menggunakan *beam splitter*. Penelitian mengenai simulasi hibrid PV-TEG dengan *beam splitter hot mirror* telah dilakukan oleh Hariyanto et al. (2019) dengan menggunakan spektrum matahari standar AM1.5D dibagi panjang gelombangnya menggunakan *hot mirror*, dimana panjang gelombang 400-690 nm ditransmisikan ke PV dan 690-1150 nm dipantulkan ke TEG. Hasilnya, total daya maksimum 0.1710W dengan efisiensi 5.1%. Adapula penelitian mengenai simulasi hibrid PV-TEG dengan *beam splitter hot* dan *cold mirror* untuk intensitas rendah telah dilakukan oleh Piarah et al. (2019) dengan menggunakan spektrum matahari AM1.5G intensitas rendah pada variasi 0.05, 0.1, 0.25, 0.50 dan 0.7 *Sun*. Spektrum cahaya dikonsentrasikan dengan menggunakan lensa Fresnel dan kemudian ditransmisikan ke pemisah spektrum (*hot* dan *cold mirror*). Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan menggunakan *cold mirror*, daya total maksimumnya lebih baik daripada *hot mirror*.

Berdasarkan rujukan di atas, maka pada penelitan ini akan dilakukan simulasi pengaruh pemisah spektrum *cold mirror* terhadap prestasi hibrid PV-TEG.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana perbandingan hasil simulasi pengaruh *hot mirror* terhadap prestasi hibrid PV-TEG dengan menggunakan *software* Matlab dan LabVIEW?
2. Bagaimana hasil simulasi pengaruh *cold mirror* terhadap prestasi Hibrid PV-TEG dengan menggunakan *software* LabVIEW?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menentukan perbandingan hasil simulasi pengaruh *hot mirror* terhadap prestasi hibrid PV-TEG dengan menggunakan *software* Matlab dan LabVIEW.
2. Menentukan hasil simulasi pengaruh *cold mirror* terhadap prestasi Hibrid PV-TEG dengan menggunakan *software* LabVIEW.

1.4 Manfaat Penelitian

1. Mendapatkan formulasi yang tepat dengan penggabungan PV dan TEG.
2. Mengetahui karakteristik PV dan TEG sebagai pembangkit listrik.
3. Memperkaya pemahaman cara kerja optik lensa Fresnel dan *cold mirror*.
4. Menambah pemahaman simulasi menggunakan *software* LabVIEW.

1.5 Batasan Masalah

Melihat kompleksitas masalah yang dihadapi, maka pada penelitian ini dibatasi pada ruang lingkup sesuai kondisi sebagai berikut:

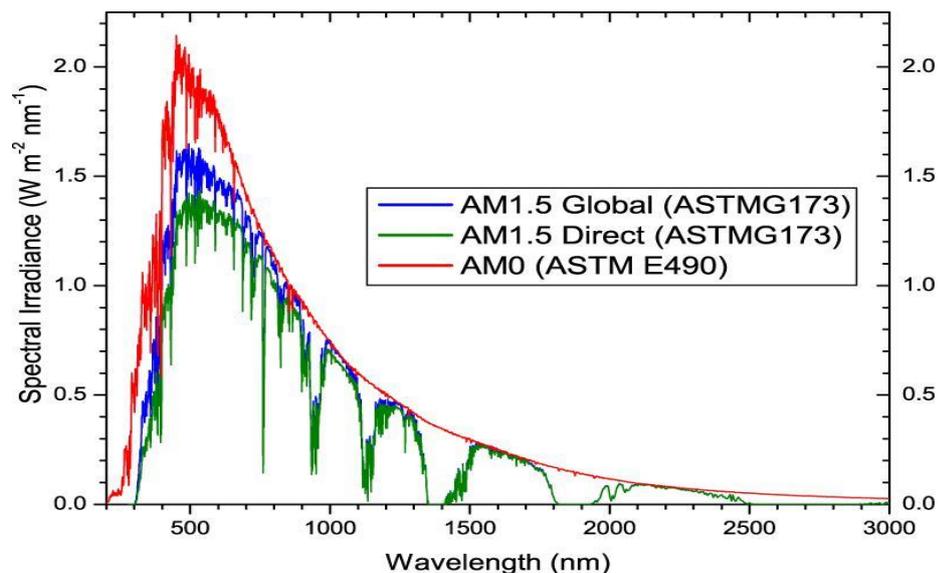
1. Sumber radiasi yang di gunakan adalah AM1.5D dengan daya (0.2, 0.4, 0.6, 0.8 dan 1 *Sun*).
2. Cahaya yang datang di fokuskan menggunakan lensa Fresnel ke *cold mirror*.
3. Kemiringan sudut pada *cold mirror* sebagai *beam splitter* panjang gelombang cahaya adalah 45° terhadap sumbu horizontal.
4. Model dan simulasi menggunakan *software* LabVIEW.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Spektrum Matahari

Spektrum matahari berubah sepanjang hari dan bergantung pada lokasi. Spektrum referensi standar didefinisikan untuk memungkinkan perbandingan kinerja perangkat PV dari berbagai produsen dan laboratorium penelitian. Spektral standar disempurnakan pada awal tahun 2000 untuk meningkatkan resolusi dan untuk mengkoordinasikan standar internasional. Dalam banyak kasus perbedaan antara spektrum memiliki sedikit efek pada kinerja perangkat (Honsberg & Bowden, 2018).



Gambar 2.1 Pengukuran Spektrum Matahari AM1.5 Global (ASTMG173), AM1.5 Direct (ASTMG173) dan AM0 (ASTM E490) (Honsberg & Bowden, 2018)

Pada gambar 2.1 menunjukkan tiga hasil pengukuran spektrum matahari yang dijelaskan sebagai berikut (Honsberg & Bowden, 2018) :

1. AM0 (ASTM E490) Spektrum standar untuk aplikasi ruang angkasa disebut sebagai AM0. Ini memiliki daya terintegrasi $1366,1 \text{ W/m}^2$.

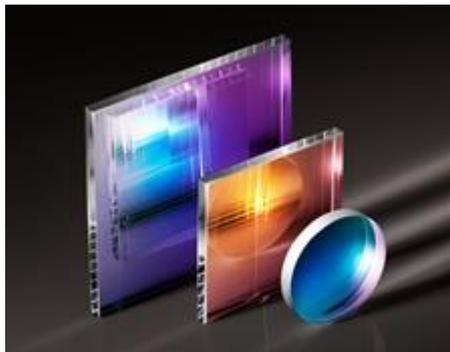
2. AM1.5 Global (ASTMG173) Spektrum Global AM1.5 dirancang untuk modul pelat datar dan memiliki daya terintegrasi 1000 W/m² (100 mW/cm²).
3. AM1.5 Direct (ASTMG173) Spektrum AM1.5 Langsung (+sirkumsolar) didesain untuk kerja konsentrator surya. Ini termasuk sinar langsung dari matahari ditambah komponen sirkumsolar dalam piringan 2,5 derajat di sekitar matahari. Spektrum langsung plus sirkumsolar memiliki kepadatan daya terpadu 900 W/m².

Densitas daya total yang dipancarkan dari sumber cahaya dapat dihitung dengan mengintegrasikan spektral irradiansi ke seluruh panjang gelombang atau energi (David Thorpe, 2018) :

$$H = \int_0^{\infty} F(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

Dimana H adalah densitas daya total yang dipancarkan dari sumber cahaya dalam Wm⁻²; F(λ) adalah radiasi spektral dalam satuan Wm⁻² μ m¹ dan λ adalah panjang gelombang.

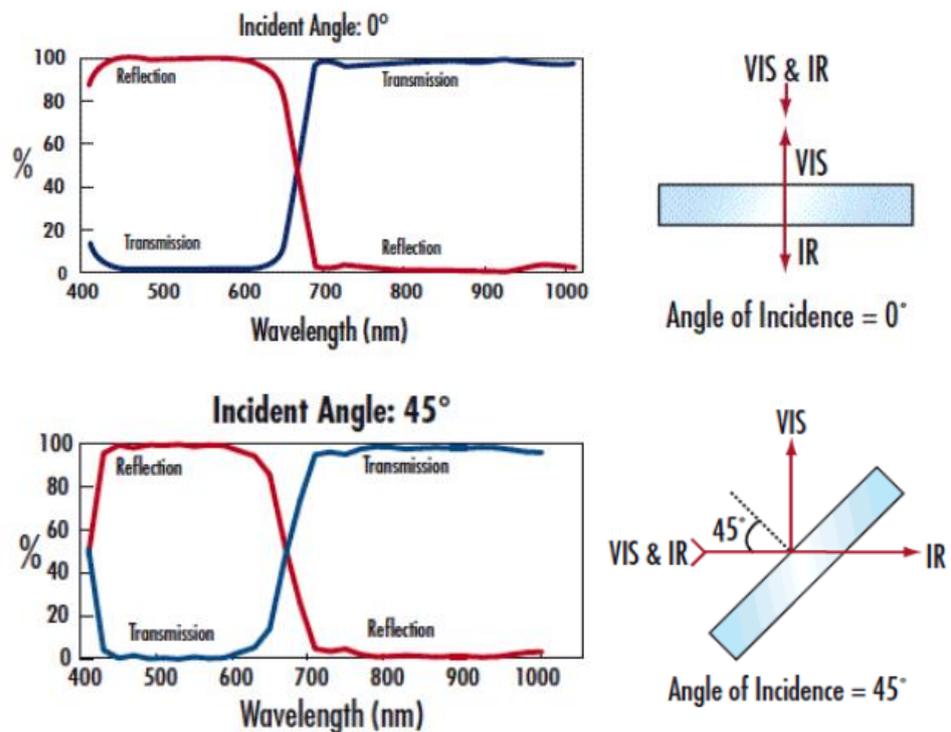
2.2 Cold Mirror



Gambar 2.2 Cold Mirror (Edmund Optics, 2020)

Cold mirror adalah jenis *filter dichroic* yang digunakan untuk menghilangkan energi yang tidak diinginkan dari sumber pemancar cahaya dapat dilihat pada gambar 2.2 *Cold Mirror* memiliki sudut kemiringan 0° dan 45° serta ideal untuk mengurangi panas yang tidak diinginkan yang disebabkan oleh radiasi inframerah dapat dilihat pada gambar 2.3 Lapisan dielektrik multi-layer memantulkan lebih dari 95% cahaya tampak dari 400-690nm dan juga

mentransmisikan lebih dari 90% NIR dan IR dari 700-1150nm. *Cold Mirror* berfungsi baik dengan ketahanan terhadap kerusakan dari suhu sekitar $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $+232\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan ideal untuk sistem proyeksi, di mana penumpukan panas dapat menyebabkan kerusakan sistem. Terbuat dari kaca BOROFLOAT®, *Cold Mirror* ini dapat dipotong sesuai ukuran yang diinginkan untuk aplikasi apa pun (Edmund Optics, 2020).



Gambar 2.3 Teknis panjang Gelombang 0° dan 45° (Edmund Optics, 2020)

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan oleh Piarah et al. (2019) nilai intensitas cahaya dengan *cold mirror* lebih baik daripada dengan *hot mirror* pada spektrum cahaya tampak (VL), dan arus dan tegangan setara dengan hasil dari area energi radiasi. Terbukti bahwa total output maksimum sistem hybrid PV-TEG dengan *Cold Mirror* lebih besar daripada dengan *Hot Mirror* $(100,53 > 68,77) \times 10^{-3} \mu\text{W}$.

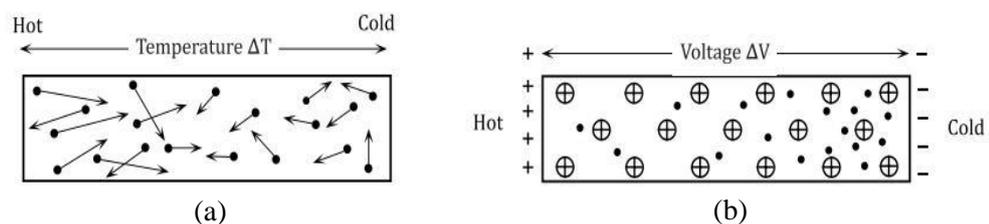
2.3 Termoelektrik Generator



Gambar 2.4 Modul Termoelektrik Generator (“SPEC TE Generator”, n.d.)

Dapat dilihat pada gambar 2.4 Termoelektrik Generator (TEG) merupakan pembangkit listrik yang menggunakan efek Seebeck sebagai prinsip kerjanya. Efek seebeck adalah konversi langsung dari perbedaan temperatur menjadi energi listrik. Modul generator termoelektrik bekerja dengan mengubah energi kalor menjadi energi listrik. Apabila dua batang logam atau kawat dihubungkan dengan salah satu ujungnya dipanaskan dan ujung lainnya di jaga tetap dingin maka menghasilkan perbedaan temperatur (ΔT).

Modul TEG terdiri dari sisi panas dan sisi dingin, perbandingan temperatur yang seimbang dari kedua sisi ini sangat mempengaruhi efisiensinya, jika perbandingan temperatur dari kedua sisi tidak seimbang maka daya keluaran dan efisiensi akan menurun.



Gambar 2.5 (a) Besarnya energi kinetik elektron ditandai dengan tanda anak panah, (b) Banyaknya elektron ditandai dengan titik-titik (Willfahrt, 2014).

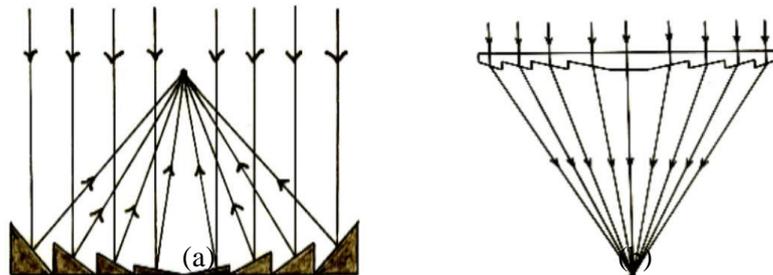
Dapat dilihat pada gambar 2.5 akibat perbedaan temperatur di kedua sisi logam menyebabkan adanya aliran elektron, ini terjadi karena elektron disisi panas logam bergerak aktif dan memiliki kecepatan aliran lebih tinggi daripada

sisi dingin logam. Elektron dari sisi panas akan berdifusi ke sisi dingin dan akan menyebabkan terjadinya medan listrik. Jumlah elektron disisi panas logam lebih renggang atau sedikit jika dibandingkan dengan sisi dingin yang memiliki elektron lebih padat (Willfahrt, 2014).

2.4 Lensa Fresnel

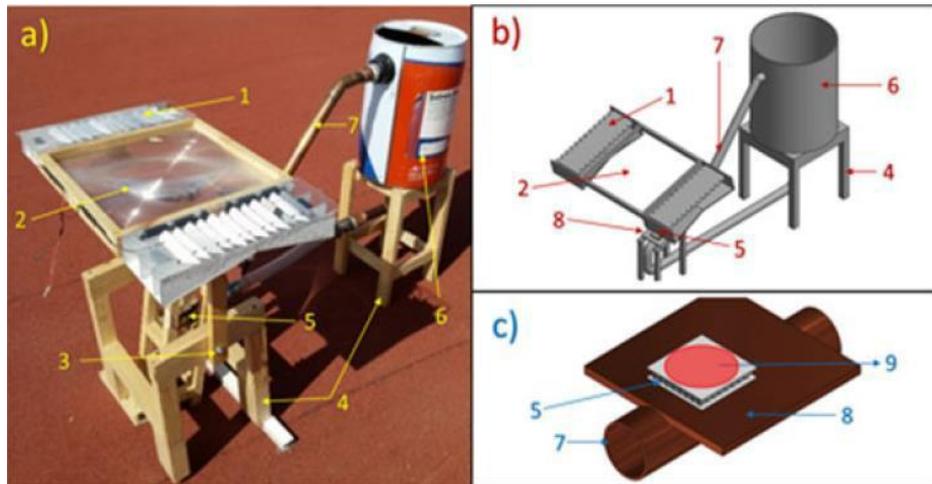
Lensa Fresnel adalah lensa kaca atau plastik yang awalnya diciptakan untuk meningkatkan kemampuan mercusuar. Terdiri dari konsentris bahan cincin siku, lensa Fresnel menggunakan cincin ini untuk memfokuskan cahaya ke bagian tengah lensa (Pustaka & Utara, 1821).

Menurut Menghani et al. (2013) ada dua tipe lensa Fresnel yaitu lensa bias (*refractive lens*) dan cermin bias (*reflective mirrors*), seperti yang di tunjukan dalam gambar 2.6 Lensa Fresnel bias sebagian besar digunakan dalam aplikasi PV sedangkan cermin bias banyak di aplikasikan dalam solar thermal.



Gambar 2.6 (a) Reflective Fresnel lens. (b) Refractive Fresnel lens
(Menghani et al. 2013)

Keuntungan menggunakan lensa Fresnel pada hibrid PV-TEG dapat meningkatkan intensitas radiasi sehingga dapat meningkatkan efisiensi. Vorobiev & Vorobiev (2016) melakukan penelitian hibrid PV-TEG dan konsentrator lensa Fresnel dengan fluida pendingin dengan simulasi dan eksperimen dalam bentuk prototipe.



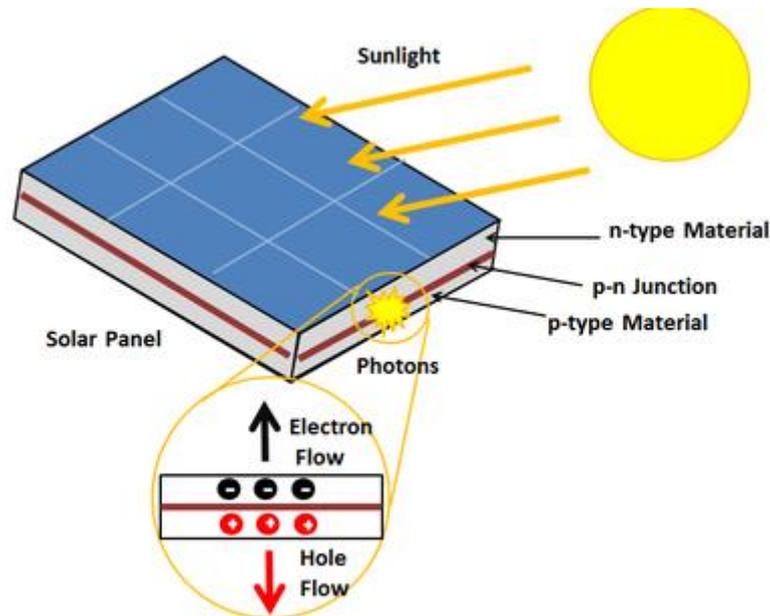
Gambar 2.7 Model pengujian sistem hibrid PV-TEG-lensa Fresnel (Vorobiev & Vorobiev, 2016)

Rancangan penelitian ini menempatkan sel surya sejajar dan berada di sayap kiri-kanan lensa Fresnel, sementara di bawahnya lensa ada modul TEG Bi_2Te_3 yang duduk di atas pelat tembaga dicat hitam menyatu dengan *heat sink* fluida pendingin air yang bersirkulasi secara *thermosiphon*, seperti pada gambar 2.7. Hasil Pengujian menunjukkan bahwa efisiensi termal adalah 49%, efisiensi TEG diukur pada musim panas dan dingin dengan nilai masing-masing 3.5 dan 2.5%, dan efisiensi PV pada angka 10.74%.

2.5 Fotovoltaik (PV)

Kata “*Photovoltaic*” terdiri dari dua kata yaitu *photo* dan *volta*. *Photo* yang berarti cahaya (dari bahasa Yunani yaitu *phos, photos*: cahaya) dan *Volta* (berasal dari nama seorang fisikawan italia yang hidup antara tahun 1745-1827 yang bernama *Alessandro Volta*) yang berarti tegangan listrik. Dengan kata lain arti *photovoltaic* yaitu proses konversi cahaya matahari secara langsung diubah menjadi listrik. *Photovoltaic* juga biasa di singkat dengan PV.

Sel surya fotovoltaik (PV) secara langsung mengubah sinar matahari menjadi listrik menggunakan fotovoltaik efek. Ada beberapa jenis sel PV yang semuanya menggunakan semikonduktor untuk berinteraksi dengan foton yang masuk dari matahari untuk menghasilkan arus listrik.



Gambar 2.8 Diagram yang menunjukkan efek fotovoltaiik

Sebuah sel fotovoltaiik terdiri dari banyak lapisan material, masing-masing dengan tujuan tertentu. Lapisan terpenting dari sel fotovoltaiik adalah lapisan semikonduktor yang diperlakukan secara khusus. Ini terdiri dari dua lapisan yang berbeda (tipe-p dan tipe-n - lihat gambar 2.8), dan inilah yang sebenarnya mengubah energi matahari menjadi listrik yang berguna melalui proses yang disebut efek fotovoltaiik. Di kedua sisi semikonduktor adalah lapisan bahan konduktor yang "mengumpulkan" listrik yang dihasilkan. Perhatikan bahwa sisi belakang atau sisi yang teduh dari sel dapat tertutup seluruhnya dalam konduktor, sedangkan sisi depan atau sisi yang diterangi harus menggunakan konduktor secukupnya untuk menghindari menghalangi terlalu banyak radiasi matahari mencapai semikonduktor. Lapisan terakhir yang diterapkan hanya pada sisi sel yang diterangi adalah lapisan anti pantulan. Karena semua semikonduktor secara alami bersifat reflektif, kehilangan refleksi dapat menjadi signifikan. Solusinya adalah dengan menggunakan satu atau beberapa lapisan lapisan anti pantulan (mirip dengan yang digunakan untuk kacamata dan kamera) untuk mengurangi jumlah radiasi matahari yang dipantulkan dari permukaan sel.

Efek fotovoltaiik adalah proses yang menghasilkan tegangan atau arus listrik dalam sel fotovoltaiik ketika terkena sinar matahari. Sel surya ini terdiri

dari dua jenis semikonduktor - tipe-p dan tipe-n - yang digabungkan bersama untuk membuat sambungan p-n. Dengan menggabungkan dua jenis semikonduktor ini, medan listrik terbentuk di daerah persimpangan saat elektron bergerak ke sisi-p positif dan lubang-lubang bergerak ke sisi-n negatif. Medan ini menyebabkan partikel bermuatan negatif bergerak ke satu arah dan partikel bermuatan positif ke arah lain. Cahaya terdiri dari foton, yang merupakan kumpulan kecil radiasi atau energi elektromagnetik. Ketika cahaya dengan panjang gelombang yang sesuai terjadi pada sel-sel ini, energi dari foton ditransfer ke elektron dari bahan semikonduktor, menyebabkannya melompat ke keadaan energi yang lebih tinggi yang dikenal sebagai pita konduksi. Dalam keadaan tereksitasi di pita konduksi, elektron-elektron ini bebas bergerak melalui material, dan gerakan elektron inilah yang menciptakan arus listrik di dalam sel (J.M.K.C. Donev et al., 2018).

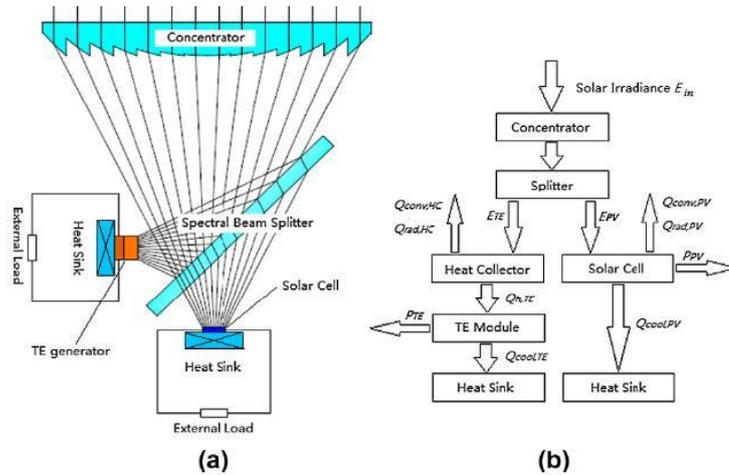
Menurut David Thorpe (2018) pengembangan sel surya terus berkembang mulai dari teknologi PV yang di komersilkan meliputi :

- a. *Cristal silicon* berbasis wafer (c-Si) (baik mono cristal atau multy cristal) : efisiensi maksimumnya sekitar 25%. Modul komersial terbaik saat ini adalah 19-20% (dengan target 23% pada 2020). Secara umum rata-rata modul komersial memiliki efisiensi mencapai 13-19%.
- b. Thin film (TF) menggunakan *Si amorf* (a-Si / c-Si); *micromorph silicon multi-junctions* (c-Si); *cadmium-telluride* (CdTe); Model ini memiliki efisiensi lebih rendah 6–12% (dengan target 12–16% pada 2020).

Kemudian yang sedang dikembangkan : *Concentrating PV (CPV)*; *Organic PV*; *Advanced thin films dan multi-junction*.

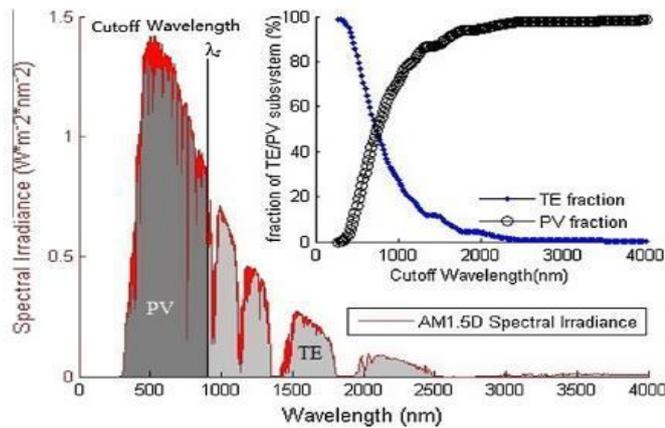
2.6 Model Hibrid PV-TEG

Semua perangkat hibrid menurut Huen & Daoud (2016), yang terdiri dari modul PV, TEG, sistem pendingin dan tambahan beberapa komponen yang dimodifikasi dan didesain untuk mendapatkan kinerja optimal dari sebuah sistem hibrid.



Gambar 2.9 Sistem hibrid PV-TEG: (a) digram sistem hibrid dengan *splitter*; (b) aliran energi pada sistem hibrid (Ju et al., 2012)

Output daya keseluruhan dari perangkat adalah jumlah dari *output* daya dari modul PV dan TEG. Pada gambar 2.9, Ju et al. (2012), menggambarkan penelitian analisis numerik dan optimasi hibrid PV-TEG melalui simulasi yang dalam pemodelannya memadukan lensa Fresnel, kaca *dichroic*, sel surya jenis GaAs dan TEG tipe skutterudites (CoSb_3) dengan luasan yang dianggap sama dan dengan menggunakan *heat sink* sebagai pendingin pada PV dan TEG. Pada dasarnya, pemisahan spektrum bekerja pada konsentrasi surya dan suhu yang tinggi.



Gambar 2.10 Spektrum gelombang AM1.5D dalam dua daerah untuk CPV dan TE (Ju et al., 2012)

Dengan menggunakan *beam splitter*, radiasi surya (E_{in} dalam satuan W/m^2) terbagi dalam dua panjang gelombang seperti terlihat pada gambar 2.10

dengan panjang gelombang (λ_s satuan nm = 770 nm), dimana besarnya energi surya yang diterima oleh TE dan PV dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$E_{PV} = \int_{280 \text{ nm}}^{\lambda_s} \eta_{opt} A_{HC} C_g F(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$E_{TE} = \int_{\lambda_s}^{4000 \text{ nm}} \eta_{opt} A_{HC} C_g F(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Dimana E_{TE} adalah energi matahari yang diarahkan ke subsistem TEG (dari λ_s sampai 4000 nm); E_{PV} adalah energi matahari yang diarahkan ke subsistem CPV (dari 280 nm sampai λ_s); $F(\lambda)$ adalah spektral irradiansi dalam kondisi AM1.5 D, dan η_{opt} adalah efisiensi sistem optik. Rasio konsentrasi geometrik C_g ditentukan oleh rasio area lensa Fresnel dan luas permukaan *heat collector* TE atau PV; $C_g = A_{HC}/A_F = A_{PV}/A_F$, dengan A_{HC} , A_{PV} , dan A_F adalah masing-masing luas permukaan *heat collector* di atas TE, luas sel surya, dan luas permukaan lensa Fresnel. Pada analisis ini, Ju et al., (2012) menganggap $A_{HC} = A_{PV}$.

Untuk subsistem TE, kebanyakan energi radiasi E_{TE} diserap oleh *heat collector* yang dikonversikan menjadi energi termal. Rugi-rugi panas dari *heat collector* disebabkan oleh radiasi dan konveksi bebas. Besarnya rugi panas radiasi dihitung dengan,

$$Q_{rad,TE} = \varepsilon_{HC} A_{HC} \sigma_{SB} (T_{HC}^4 - T_{air}^4) \quad (4)$$

Dimana T_{HC} adalah suhu permukaan *heat collector*, T_{air} adalah suhu udara sekitar, ε_{HC} adalah emisivitas lapisan *heat collector*, dan σ_{SB} konstanta Stefan-Boltzmann. Sementara besarnya rugi panas secara konveksi dapat dihitung dengan,

$$Q_{conv,TE} = h_{nc} A_{HC} (T_{HC} - T_{air}) \quad (5)$$

dengan h_{nc} adalah koefisien perpindahan panas konveksi bebas (W/m²K).

Karena PV dan TE pada hibrid ini menggunakan pendinginan *heat sink* yang dianggap pendinginan konveksi paksa, besarnya panas yang diserap oleh

heat sink yang sama dengan panas yang dibuang oleh sisi dingin termoelektrik, dapat dihitung menggunakan rumus :

$$Q_{cool,TE} = h_{cool}A_{HS}(T_c - T_{coolant}) \quad (6)$$

dimana T_c dan $T_{coolant}$ adalah rata-rata temperatur elemen dingin TE dan temperatur pendingin *heat sink*, h_{cool} adalah koefisien perpindahan panas sistem pendingin, A_{HS} adalah luas perpindahan panas efektif yang terjadi antara sisi dingin TE dan *heat sink*, $A_{HS} = A_{HC}$.

Panas yang diserap oleh elemen panas pada modul TE, dapat ditulis sebagai berikut :

$$Q_{h,TE} = \alpha_{HC}E_{TE} - Q_{rad,HC} - Q_{conv,HC} \quad (7)$$

dimana α_{HC} adalah absosptivitas dari lapisan permukaan *heat collector*. Sehingga besar daya yang dibangkitkan oleh modul TE adalah :

$$P_{TE} = Q_{h,TE} - Q_{cool,TE} \quad (8)$$

Untuk perhitungan subsistem PV, mempunyai persamaan yang sama dengan TE,

$$Q_{rad,PV} = \varepsilon_{PV}A_{PV}\sigma_{SB}(T_{PV}^4 - T_{air}^4) \quad (9)$$

$$Q_{conv,PV} = h_{nc}A_{PV}(T_{PV} - T_{air}) \quad (10)$$

$$Q_{cool,PV} = h_{cool}A_{HS}(T_{PV} - T_{coolant}) \quad (11)$$

dimana T_{PV} adalah temperatur dari sel surya dan ε_{PV} adalah emisivitas dari permukaan sel surya. Besarnya daya yang dibangkitkan oleh PV adalah

$$P_{PV} = \alpha_{PV}E_{PV} - Q_{rad,PV} - Q_{conv,PV} - Q_{cool,PV} \quad (12)$$

dimana α_{PV} adalah absosptivitas permukaan sel surya.

Jadi total daya yang dibangkitkan dengan hibrid PV-TE ini adalah :

$$P_{PV-TE} = P_{PV} + P_{TE} \quad (13)$$

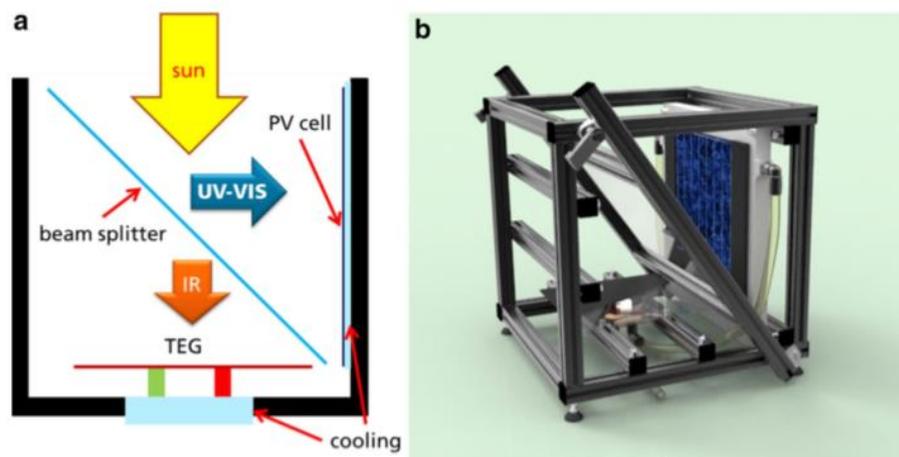
dan efisiensi konversi sistem hibrid PV-TE ini adalah :

$$\eta_{PV-TE} = P_{PV-TE}/(A_F - E_{in}) \quad (14)$$

Penelitian mengenai simulasi hibrid PV-TEG dengan *beam splitter hot mirror* telah dilakukan oleh Hariyanto et al. (2019) dengan menggunakan spektrum matahari standar AM1.5D. Radiasi yang datang ditransmisikan dengan menggunakan lensa Fresnel. Transmisi radiasi dari lensa tersebut

diteruskan ke *hot mirror*, dimana spektral irradiannya terbagi menjadi 2 yaitu direfleksikan ke modul TEG dan ditransmisikan ke modul PV. Spektral irradians yang ditransmisikan ke PV pada panjang gelombang 400-690 nm dan panjang gelombang 690-1150 nm ke TEG. Hasil simulasi menunjukkan bahwa model hibrid PV-TEG membangkitkan total daya maksimum sebesar 0.1710W dan efisiensi mencapai 5.1%.

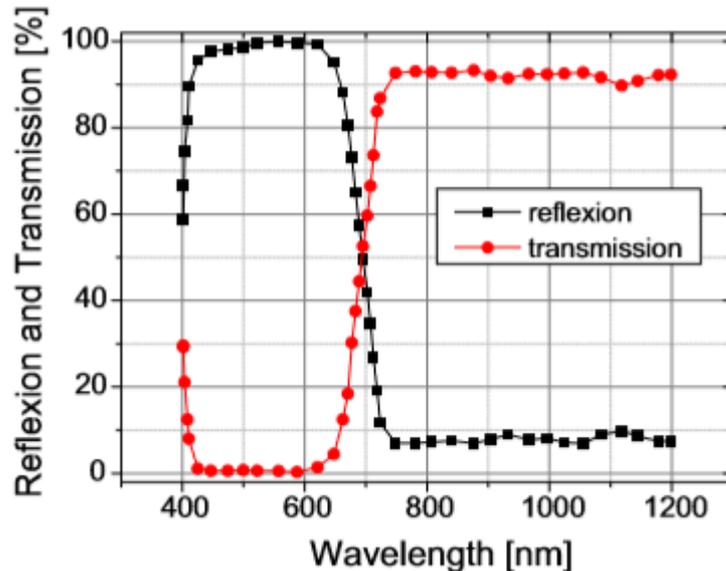
Penelitian tentang hibrid PV-TEG telah dilakukan oleh Elsarrag et al., (2015) menggunakan *cold mirror* sebagai *beam splitter*. Mereka menggunakan *cold mirror* yang memiliki fungsi terbalik dengan *hot mirror* untuk mensplit radiasi surya. *Cold mirror* yang dipasang pada sudut kemiringan 45° meneruskan IR radiasi surya, sementara UV dan IR. Mereka melaksanakan studi secara teoritis dan eksperimental untuk meningkatkan unjuk kerja TEG kombinasi PV.



Gambar 2.11 (a) Prinsip desain PV-TEG (*cold mirror*); (b) setting eksperimen (Elsarrag et al., 2015)

Pada eksperimen gambar 2.11, simulator surya digunakan sebagai sumber radiasi dengan irradians antara 200 dan 800 W/m² pada 0.5 suns, 0.7 dan 1.1 suns. Parameter sel PV dengan ukuran 15x15 cm *type monocrystalline* dan TEG dengan dimensi 1.5x1.5 dan 2.5x2.5 cm dari HiZ-2. Dapat dilihat pada gambar 2.12 *cold mirror* yang mensplit spektrum surya pada titik panjang gelombang 700 nm, dimana 58% UV dan VL diserap oleh P pada panjang gelombang 2-7 nm, sementara 7-1200 nm adalah cahaya IR yang diserap oleh

TEG sebanyak 42%. Media pendingin PV-TEG yang dipakai adalah cairan pendingin.



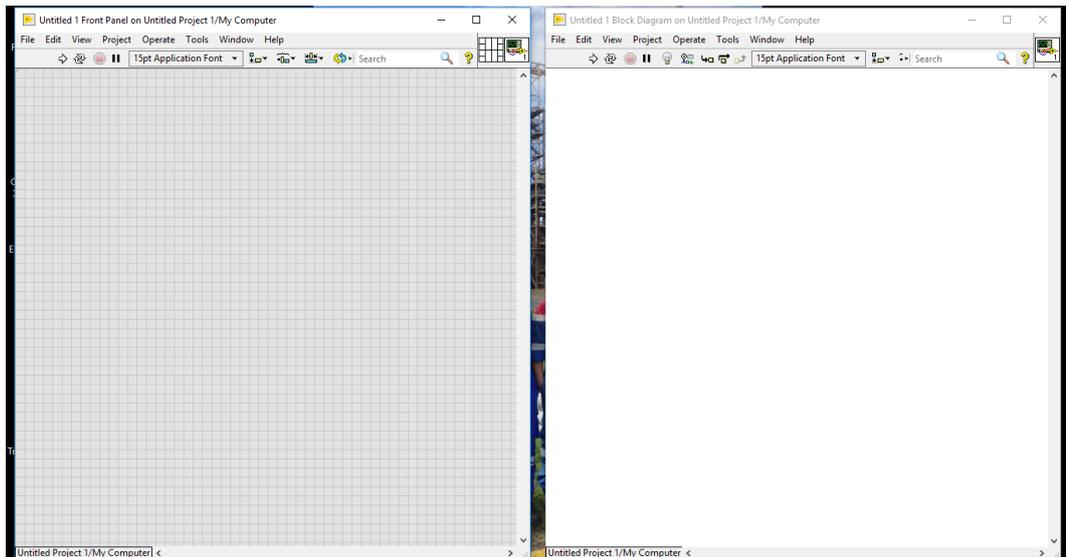
Gambar 2.12 Data penggunaan *cold mirror* (Elsarrag et al., 2015)

Hasil pengujian mengindikasikan bahwa sel PV memproduksi daya (mV) lebih baik pada irradians rendah (tidak lebih dari 700 W/m^2) jika menggunakan *cold mirror*. Lebih dari 700 W/m^2 , tanpa *cold mirror* akan lebih besar dayanya. Suhu sel surya dengan split spektrum lebih rendah (rata-rata 60°C) dan lebih besar dari 60°C jika tanpa kaca pemisah. Sementara TEG bekerja lebih baik jika irradians yang lebih tinggi dari sel PV. Meskipun secara keseluruhan hibrid sistem ini menghasilkan unjuk kerja mendekati dua kali lebih besar dibandingkan dengan tanpa pemisahan spektrum cahaya, efisiensi modul TEG masih rendah jauh di bawah efisiensi Carnot sebagai akibat ΔT pada sisi panas-dingin yang rendah serta rendahnya panas yang diserap oleh modul tersebut.

2.7 LabVIEW

Program LabVIEW adalah sebuah *software* pemrograman yang diproduksi oleh *National Instruments* dengan konsep yang berbeda. Seperti bahasa pemrograman lainnya yaitu C++, matlab atau *Visual Basic*, LabVIEW juga mempunyai fungsi dan peranan yang sama, perbedaannya bahwa

labVIEW menggunakan bahasa pemrograman berbasis grafis atau block diagram sementara bahasa pemrograman lainnya menggunakan basis text. Program labVIEW dikenal dengan sebutan Vi atau *Virtual Instruments* karena penampilannya dan operasinya dapat meniru sebuah *instrument*. Pada labVIEW, user pertama-tama membuat *user interface* atau *front panel* dengan menggunakan kontrol dan indikator, yang dimaksud dengan kontrol adalah *knobs*, *push button*, *dials* dan peralatan input lainnya sedangkan yang dimaksud dengan indikator adalah *graphs*, *LEDs*, dan peralatan *display* lainnya. Setelah menyusun *user interface*, lalu *user* menyusun block diagram yang berisi kode-kode Vis untuk mengontrol *front panel* dapat dilihat pada gambar 2.13.



Gambar 2.13 Tampilan *Front Panel* dan *Block Diagram* LabVIEW