



TUGAS AKHIR - TF 141581

**DESAIN *BUILDING INTEGRATED
PHOTOVOLTAIC SYSTEM* PADA BANGUNAN
FOOD COURT DI WILAYAH SURABAYA**

MUHAMMAD JAMALUDDIN
NRP. 2412 100 122

Dosen Pembimbing :
Gunawan Nugroho, Ph.D.
Nur Laila Hamida, S.T., M.Sc.

DEPARTEMEN TEKNIK FISIKA
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017



FINAL PROJECT - TF 141581

***DESIGN OF BUILDING INTEGRATED
PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR FOOD COURT
BUILDING IN SURABAYA***

*MUHAMMAD JAMALUDDIN
NRP. 2412 100 122*

*Supervisor:
Gunawan Nugroho, Ph.D.
Nur Laila Hamida, S.T., M.Sc.*

*DEPARTMENT OF ENGINEERING PHYSICS
Faculty of Industrial Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2017*

PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Jamaluddin

NRP : 2412100122

Jurusan : Teknik Fisika FTI-ITS

dengan ini menyatakan bahwa tugas akhir saya berjudul DESAIN BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEM PADA BANGUNAN FOOD COURT DI WILAYAH SURABAYA adalah bebas dari plagiasi. Apabila pernyataan ini terbukti tidak benar, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai ketentuan yang berlaku.

Demikian surat pernyataan ini saya buat dengan sebenar-benarnya.

Surabaya, 15 Januari 2017

Yang membuat pernyataan,

Muhammad Jamaluddin

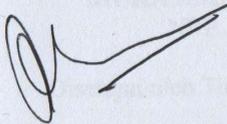
**LEMBAR PENGESAHAN
TUGAS AKHIR**

**DESAIN BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC
SYSTEM PADA BANGUNAN FOOD COURT DI
WILAYAH SURABAYA**

Oleh:
Muhammad Jamaluddin
NRP. 2412100122

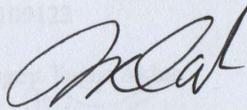
Surabaya, 25 Januari 2017
Mengetahui/Menyetujui

Pembimbing I



Gunawan Nugroho, Ph.D.
NIPN. 197711272002121002

Pembimbing II



Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.
NIPN. 198807102015042001

**Ketua Departemen
Teknik Fisika FTI-ITS**



Agus Muhamad Hatta, S.T., M.Si, Ph.D
NIPN. 197809022003121002

Halaman ini memang dikosongkan

LEMBAR PENGESAHAN

**DESAIN BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC
SYSTEM PADA BANGUNAN FOOD COURT DI
WILAYAH SURABAYA**

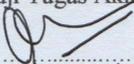
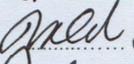
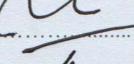
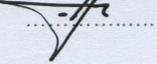
TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
pada
Bidang Studi Rekayasa Energi dan Pengkondisian Lingkungan
Program Studi S-1 Jurusan Teknik Fisika
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

MUHAMMAD JAMALUDDIN
NRP. 2412100122

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Gunawan Nugroho, Ph.D.  (Pembimbing 1)
2. Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc.  (Pembimbing 2)
3. Harsono Hadi, Ph.D.  (Ketua Penguji)
4. Ir. Roekmono, M.T.  (Penguji 1)

SURABAYA
JANUARI, 2017

Halaman ini memang dikosongkan

DESAIN *BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC* SYSTEM PADA BANGUNAN *FOOD COURT* DI WILAYAH SURABAYA

Nama Mahasiswa : **Muhammad Jamaluddin**
NRP : **2412 100 122**
Jurusan : **Teknik Fisika FTI-ITS**
Dosen Pembimbing : **Gunawan Nugroho, Ph.D.**
Nur Laila Hamidah, S.T., M.Sc

Abstrak

Performansi dari *photovoltaic*(PV) modul berhubungan langsung dengan suhu modul *photovoltaic* saat operasi. Suhu modul ini dipengaruhi oleh nilai iradiansi serta faktor pemasangan modul *photovoltaic* dalam hal ini terjadi karena suhu *photovoltaic* akan berkurang saat terkena udara, oleh karena itu celah udara antara modul *photovoltaic* dengan atap bangunan pada Building Integrated Photovoltaic merupakan hal yang perlu diperhatikan dalam perancangan desain. efek dari celah udara pada performansi PV dengan dimensi PV (1593x790x50mm) untuk lokasi yang digunakan di teliti. Penelitian ini membahas tentang efek dari perubahan celah udara antara panel dan atap bangunan. Pembuatan desain pemasangan panel pv disimulasikan menggunakan software computational Fluid Dynamic (CFD). Untuk nilai iradiansi yang sama nilai suhu *photovoltaic* semakin menurun dengan perubahan jarak antara 0,06m sampai dengan 0,2m dari atap bangunan. Suhu rata-rata panel *photovoltaic* berkurang saat penggunaan modul dari 3 modul *photovoltaic* menjadi 4 modul *photovoltaic* sebesar 5,08oC saat lebar celah udara 0,12m. Dapat disimpulkan bahwa pemberian celah udara dapat mengurangi suhu operasi modul *photovoltaic* untuk memelihara performansinya.

Kata Kunci: **Photovoltaic, CFD, Building Integrated Photovoltaic, celah udara**

Halaman ini memang dikosongkan

DESIGN OF BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEM FOR FOOD COURT BUILDING AT SURABAYA

Name : **Muhammad Jamaluddin**
NRP : **2412 100 122**
Department : **Engineering Physics FTI-ITS**
Supervisor : **Gunawan Nugroho, Ph.D.**
Nur Laila Hamidah, S.T, M.T

Abstract

The performance of photovoltaic (PV) modules directly related to the temperature of photovoltaic modules during the operation. The temperature of this module is influenced by the value of irradiance and photovoltaic module installation. Because the temperature of photovoltaic will be reduced when exposed to air, the air gap between the photovoltaic modules with the roof of Building Integrated Photovoltaic was investigated. The effect of the air gap in PV performance with dimensions of (1593x790x50mm) and the number of PV modules are required for proper installation. This study on panel is to varying the number of modules arrangement in series and variations in distance between the module and the roof to determine the effects of air gaps which are then used to determine the installation design suitable for building. CFD simulation is used with same irradiance and different windspeed because natural convection. The results show that PV operating temperature is decreasing for the air gap 0,06m to 0.2 m from the roof of the building. The average temperature decreases as the photovoltaic panels use 3 to 4 modules of 5,08°C when the air gap 0,12m with same irradiation and different wind speed. It is concluded that the air gap installation reduces the operation temperature of photovoltaic and then maintain the performance.

Keywords: BIPV, Photovoltaic, Air Gap, CFD

Halaman ini memang dikosongkan

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT, karena rahmat dan hikmat-Nya sehingga penulis diberikan kesehatan, kemudahan, dan kelancaran dalam menyusun laporan tugas akhir yang berjudul:

“DESAIN BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC SYSTEM PADA BANGUNAN FOOD COURT DI WILAYAH SURABAYA”

Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan akademik yang harus dipenuhi dalam Program Studi S-1 Teknik Fisika FTI-ITS. Penulis menyampaikan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibuku dan Bapakku tercinta yang telah memberikan segala dukungan baik moril maupun materil serta perhatiannya.
2. Bapak Agus Muhammad Hatta, ST, M.Si, Ph.D. selaku Ketua Jurusan Teknik Fisika FTI-ITS.
3. Gunawan Nugroho S.T, M.T, Ph.D. dan Nur Laila Hamidah S.T, M.Sc selaku dosen pembimbing yang telah sabar dalam memberikan dukungan, bimbingan dan arahan sehingga Tugas Akhir ini dapat diselesaikan dengan baik.
4. Kedua orangtua serta seluruh keluarga atas dukungan, doa, serta semangat tiada henti sehingga tugas akhir ini dapat diselesaikan dengan baik dan sesuai waktunya.
5. Fitri Adi Iskandarianto, ST, MT selaku dosen wali atas bimbingan dan arahnya selama ini.
6. Teman-teman seperjuangan tugas akhir (Fardan Sentosa dan Kiki Yonata) yang selalu memberi semangat serta motivasi agar tugas akhir ini selesai sesuai jadwal.
7. Teman-teman Laboratorium Pengukuran Fisis yang turut menemani dan memberi fasilitas untuk mengerjakan tugas akhir ini.
8. Teman-teman Laboratorium Rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan yang turut menemani serta memberi saran tentang penyusunan laporan tugas akhir ini.

9. Teman SMA seperjuangan di kampus tercinta yang lulus bersama saya periode ini.
10. Solitong F47 sebagai keluarga terdekat yang selalu memberikan dukungan dan kebahagiaan selama 4,5 tahun perkuliahan ini.
11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa mungkin masih ada kekurangan dalam laporan ini, sehingga kritik dan saran penulis terima. Semoga laporan ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis dan pihak yang membacanya, jika ada pertanyaan silahkan menghubungi kontak yang ada.

Surabaya, Januari 2017

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
DAFTAR NOTASI	xxi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Tujuan	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
BAB II TEORI PENUNJANG	5
2.1. <i>Photovoltaic</i>	5
2.2. Potensi Energi Surya di Indonesia	11
2.3. Energi Radiasi Surabaya	12
2.4. Sistem PLTS.....	13
2.5 Parameter Pemasangan <i>Photovoltaic</i>	15
2.6 <i>Computational Fluid Dinamic</i>	18
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	21
3.1. Studi Literatur	22
3.2. Perumusan Masalah	23
3.3. Pengumpulan Data yang diperlukan Pada Simulasi	23
3.4. Pembuatan Desain Pemasangan <i>Photovoltaic</i>	26
3.5. Simulasi.....	27

3.6. Analisa Performansi <i>Photovoltaic</i>	31
BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN.....	33
4.1. Analisis Energi Matahari.....	33
4.2. Analisis Pengaruh Celah Udara.....	35
4.3. Analisis Performansi Photovoltaic Terhadap Posisi Pemasangan.....	47
4.4 Analisis Pengaruh Kontur Tekanan Terhadap Kecepatan Udara Pada Bagian Bawah Modul	49
4.5. Analisis Pengaruh Distribusi Suhu Terhadap Performansi Photovoltaic.....	52
BAB V PENUTUP	59
5.1. Kesimpulan.....	59
5.2. Saran.....	59
DAFTAR PUSTAKA	57
LAMPIRAN	
BIODATA PENULIS	

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Rangkaian elektronik ekuivalen <i>photovoltaic</i>	6
Gambar 2.2. Kurva karakteristik I-V dan P-V tentang perubahan intensitas matahari dan temperatur permukaan tetap <i>photovoltaic</i>	8
Gambar 2.3. Kurva karakteristik I-V dan P-V tentang pengaruh intensitas matahari tetap dan perubahan temperatur permukaan <i>photovoltaic</i>	9
Gambar 2.4. Intensitas Radiasi Matahari Indonesia (esdm.go.id)	11
Gambar 2.5. Grafik Rata-rata Radiasi Matahari Tahunan	12
Gambar 3.1. Diagram alir penelitian.....	21
Gambar 3.2. Gambar Atap Bangunan Food Court.....	23
Gambar 3.3. Rangkaian elektrikal sistem	24
Gambar 3.4. Sambungan antar modul <i>photovoltaic</i>	28
Gambar 4.1. Variasi iradiansi matahari dan suhu ambient di Surabaya	33
Gambar 4.2. Grafik Iradiansi di daerah Surabaya.....	34
Gambar 4.3. Grafik energi yang dihasilkan oleh sistem selama satu tahun.....	35
Gambar 4.4. Kontur suhu pada modul <i>photovoltaic</i>	36
Gambar 4.5. Distribusi panel pemasangan 5 modul dengan air gap 0,12m.....	37
Gambar 4.6. Distribusi kecepatan udara pada modul <i>photovoltaic</i> dengan jarak air gap 0,12m dan jumlah modul 5 (a) bagian depan (b) bagian tengah (c) bagian belakang (d)	39
Gambar 4.7. Grafik Suhu maksimum modul <i>photovoltaic</i> pada susunan 5	40
Gambar 4.8. Distribusi suhu pada 4 susunan modul dan jarak celah udara 0,16 m.....	41

Gambar 4.9.	Distribusi Kecepatan Pada Modul Photovoltaic dengan variasi Celah Udara (a) 0,06 m, (b) 0,08 m dan (c)0,1 m celah udara.....	43
Gambar 4.10.	Distribusi Kecepatan Pada Modul Photovoltaic dengan variasi Celah Udara (a) 0,12 m, (b) 0,14 m dan (c) 0,16 m celah udara.....	44
Gambar 4.11.	Distribusi Kecepatan Pada Modul Photovoltaic dengan variasi Celah Udara (a) 0,18 m dan (b) 0,2 m celah udara.....	45
Gambar 4.12.	Grafik Performansi dari <i>photovoltaic</i> dengan pemasangan yang berbeda	48
Gambar 4.13.	Gambar distribusi kecepatan dan tekanan pada kombinasi 4 modul dengan jarak 0,12m.....	49
Gambar 4.14.	Gambar distribusi kecepatan dan tekanan pada bagian (a) depan (b) belakang (c) tengah (d) sambungan antar PV	51
Gambar 4.15.	Gambar distribusi suhu pada kombinasi 4 modul dengan jarak 0,12m.....	53
Gambar 4.16.	Gambar distribusi suhu pada bagian (a) depan (b) belakang (c) tengah (d) sambungan antar PV	55
Gambar 4.17.	Grafik suhu maksimum pada jarak 0,12m dengan variasi susunan 4 modul.....	56

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Spesifikasi <i>photovoltaic</i>	24
Tabel 3.2. Data Lokasi.....	25
Tabel 3.3. Konsumsi Beban Pada Studi Kasus	26
Tabel 3.4. Informasi Lokasi.....	26
Tabel 3.5. Data spesifikasi <i>Boundary Condition</i>	28
Tabel 3.6. <i>Properties</i> Fluida (Gas Ideal)	29
Tabel 3.7. <i>Properties Photovoltaic</i>	30
Tabel 4.1. Suhu Rata-Rata Photovoltaic.....	47

Halaman ini memang dikosongkan

DAFTAR NOTASI

kW_p	= daya <i>array photovoltaic</i>
S	= radiasi rata rata harian
Z_{pv}	= <i>shading factor</i>
n_{PV}	= Jumlah modul <i>photovoltaic</i>
kW_p	= Daya <i>Array</i> yang dibutuhkan
P_{pv}	= Daya satu modul <i>photovoltaic</i>
I_{pv}	= Arus keluaran dari modul <i>photovoltaic</i> (Ampere)
I_{ph}	= Arus yang dihasilkan saat terjadi efek <i>photovoltaic</i> (Ampere)
C_p	= <i>Specific Heat</i> (kJ/kg.K)
η_c	= Efisiensi <i>cell photovoltaic</i> saat T
η_r	= Efisiensi <i>cell photovoltaic</i> saat suhu referensi
α_{mp}	= Koefisien suhu untuk daya maksimum (%/°C)
I	= Sudut datang <i>beam radiation</i> (°)
Z	= Sudut kemiringan matahari
p	= Reflektansi tanah
β	= Sudut kemiringan <i>photovoltaic</i> (°)
G_b	= <i>Beam Irradiation</i> (W/m ²)
G_d	= <i>Diffuse Irradiation</i> (W/m ²)
T_c	= Suhu <i>cell photovoltaic</i>
T_a	= Suhu Ambient (°C)
T_n	= Suhu saat STC (°C)
E	= Energi yang dihasilkan modul (Wh)
PR	= Rasio Performansi
P_{STC}	= Daya modul saat STC(Standart Test Condition)(W)
G_{STC}	= Iradiansi saat STC (W/m ²)
G	= Iradiansi yang diterima modul (Wh/m ²)
I	= Arus saturasi <i>reverse</i> (Ampere)
V_{pv}	= Tegangan keluaran modul <i>photovoltaic</i> (Volt)
k	= Konstanta boltzman (1.3806.10 ⁻²³ J.K ⁻¹)
T	= Temperatur permukaan modul <i>photovoltaic</i> (K)
R_{sh}	= Hambatan shunt (Ohm)

- R_s = Hambatan pada arus keluaran (Ohm)
 N_s = Jumlah *cell* seri
 N_p = Jumlah *cell* parallel
 A = Luasan yang terkena radiasi pada *cell* (m^2)
 q = *Irradiansi* terserap *cell* (W)

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Rendahnya ketahanan negara di bidang energi merupakan salah satu penghambat pertumbuhan ekonomi nasional. Dewasa ini, permintaan sumber energi nasional yang paling tinggi diduduki oleh batubara sebesar 40% dan minyak bumi sebesar 23%, lalu diikuti oleh gas sebesar 22%, panas bumi sebesar 3% serta sumber energi terbarukan lainnya sebesar 12%. Alasan ini menjadikan suatu peluang untuk mengembangkan suatu energi alternatif terbarukan yang ramah lingkungan. (Ray R.D. dkk., 2005).

Energi matahari merupakan sumber energi yang melimpah. Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang sekarang mulai populer karena kenaikan kebutuhan energi serta pengurangan penggunaan bahan bakar fosil (Ellabban, H, & F, 2014). Energi matahari dimanfaatkan dengan menggunakan fotovoltaic. Energi yang dihasilkan oleh *photovoltaic* (PV) didapatkan dari modul panel surya yang berisi bahan yang mengubah foton ke listrik (M.Z, 2009). *Building integrated photovoltaic* (BIPV) merupakan suatu bangunan dimana *solar panel* PV menggantikan bahan yang digunakan pada bangunan seperti atap ataupun dinding. Selanjutnya, BIPV dapat diklasifikasikan sebagai bagian fungsional dari struktur bangunan, atau suatu bagian yang di integrasikan ke dalam desain bangunan. (Changhai Penga, 2011)

Dalam pengoprasiaannya, performansi dari *photovoltaic crystal* (PV) bergantung pada suhu *cell* yang merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi daya yang dihasilkan oleh divais. Suhu tinggi yang terjadi akibat *overheating* dapat terjadi pada *photovoltaic* yang terpasang pada permukaan bangunan yang merupakan akibat dari pendinginan oleh angin dibandingkan dengan *free standing photovoltaic*. Kebanyakan pemanfaatan *photovoltaic* digunakan pada atap rumah dibandingkan dengan penggunaan pada permukaan dinding vertikal. Maka dari itu pemberian jalur angin pada bagian bawah PV modul merupakan hal yang penting. Penelitian

penelitian sebelumnya sudah pernah dilakukan dengan melihat performansi dari *roof-mounted* solar panel namun tidak spesifik pada efek yang ditimbulkan oleh celah udara antara *solar panel* dan atap. Luasan celah udara lebih banyak ditentukan dari eksperimen dari pada investigasi spesifik. (Khedari, Hirunlabh, & Bunnag, 1997). Meneliti tentang solar kolektor pada atap dengan jarak antara atap dan insulasi bagian belakang *solar* kolektor sebesar 0,14 m (Khedari, Mansirisub, Chaima, Pratinthong, & Hirunlabh, 2000). Diketahui bahwa celah udara yang besar yang dikombinasikan dengan lubang masuk yang besar akan menghasilkan aliran yang tinggi namun aliran tersebut masih belum mencukupi untuk ventilasi udara bangunan. Dan disarankan untuk menggunakan celah udara untuk *solar thermal* kolektor antara 0,1 m sampai 0,14 m (Hirunlabh, Wachirapuwadon, Pratinthong, & Khedari, 2001). mendemonstrasikan tentang pentingnya menggunakan installed *normal operating cell temperature* (INOCT) yang bergantung pada celah udara dan juga beberapa faktor lainnya untuk memprediksi performansi dari sistem bangunan terintegrasi *photovoltaic*. Mereka mengembangkan relasi empiris antara system pemasangan dan INOCT yang efektif. . Maka dari itu dalam penelitian ini akan membahas tentang pengaruh pemasangan *photovoltaic* pada BIPV terhadap performansi dari *photovoltaic* dengan perubahan variasi jarak celah udara pada bagian belakang *array photovoltaic* dan menemukan jarak celah udara kritis yang cocok untuk diaplikasikan berdasarkan nilai performansi yang didapat.

1.2. Rumusan Masalah

Permasalahan dalam tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana desain *Building Integrated Photovoltaic System* untuk *food court* di wilayah Surabaya?
2. Bagaimana pengaruh perubahan jarak modul surya *photovoltaic* dengan atap terhadap suhu modul *photovoltaic*?
3. Bagaimana menentukan jarak modul surya terhadap atap untuk menghasilkan performansi *photovoltaic* yang maksimal?

1.3. Tujuan

Tujuan penelitian dalam pengerjaan tugas akhir ini ada tiga macam, yaitu:

1. Mampu mendesain *Building Integrated Photovoltaic system* yang sesuai untuk *food court* di wilayah Surabaya
2. Mengetahui pengaruh perubahan jarak antar modul surya *photovoltaic* dengan atap bangunan terhadap suhu modul surya *photovoltaic*
3. Menentukan jarak optimal modul surya terhadap atap pada *Building Integrated Photovoltaic System*.

1.4. Batasan Masalah

Pada penelitian ini, ada beberapa batasan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

1. Data cuaca yang digunakan berasal dari data NASA pada wilayah di Indonesia.
2. Data suhu yang digunakan merupakan data sekunder yang didapat dari software berdasarkan data satelit.
3. Penelitian dibatasi hanya pada analisa daya keluaran *photovoltaic* sebagai pengganti energi alternatif bukan sebagai sumber utama
4. Simulasi digunakan untuk mengetahui pengaruh konveksi pada suhu *photovoltaic*.
5. Suhu pada *photovoltaic* diasumsikan uniform pada seluruh permukaan
6. Suhu *photovoltaic* didapat dari perhitungan dan simulasi.
7. Studi kasus tempat yang digunakan adalah *food court* pada gedung Convention Hall di Surabaya
8. Pemasangan modul *photovoltaic* di asumsikan sama pada setiap modul PV

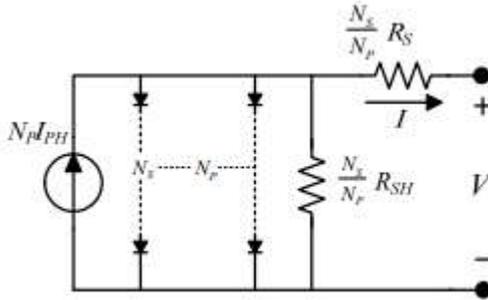
Halaman ini memang dikosongkan

BAB II TEORI PENUNJANG

2.1. *Photovoltaic*

Panel *photovoltaic* adalah implementasi teknologi dari energi terbarukan, merupakan salah satu perangkat yang memiliki kemampuan untuk mengkonversi energi foton yang berasal dari cahaya matahari menjadi energi listrik (Alsayid, Alsadi, Jallad, & Dradi, 2013). Dalam proses menghasilkan arus listrik, terjadi efek *photovoltaic* dimana sebuah lempengan yang terkena sinar matahari akan bereaksi sehingga energi listrik dapat dihasilkan. Panel *photovoltaic* terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon, TiO_2 dan sebagainya. Bahan yang sering digunakan dalam fabrikasi *photovoltaic* adalah silikon yang mempunyai sifat isolator dan konduktor sehingga sel memiliki kepekaan terhadap intensitas cahaya matahari. Dalam operasinya, *photovoltaic* tidak mungkin berada dalam kondisi ideal dimana tanpa adanya gangguan yang mempengaruhi kinerja modul *photovoltaic*. Gangguan itu dapat berupa intensitas matahari yang berubah-ubah, posisi matahari yang berubah dengan fungsi waktu, kecepatan angin dan lain-lain.

Photovoltaic sudah banyak digunakan sebagai energi alternatif untuk mengatasi krisis energi akibat *global warming* yang melanda dunia saat ini. *Photovoltaic* terdiri dari susunan sel surya dimana akan terjadi efek *photovoltaic* jika terkena intensitas matahari sehingga dapat menghasilkan arus listrik (Nguyen, 2015). Arus listrik dapat digunakan untuk keperluan selanjutnya atau untuk disimpan dalam perangkat penyimpan (*storage battery*). Kinerja dari *photovoltaic* akan berpengaruh kepada lama *charging* pada baterai, banyak daya yang dihasilkan dan efisiensi dari *photovoltaic* (Preetham Goli, 2015). Secara teori, arus yang dihasilkan oleh modul *photovoltaic* dapat dimodelkan sesuai dengan rangkaian elektronik di bawah ini.



Gambar 2.1. Rangkaian elektronik ekuivalen *photovoltaic*

Rangkaian di atas merupakan hasil pendekatan secara elektrik yang dapat merepresentasikan arus keluaran dari modul *photovoltaic*. Rangkaian ekuivalen di atas juga merupakan model umum dari panel *photovoltaic* yang terdiri dari sumber arus, dioda, resistor parallel yang menggambarkan keluaran arus dan resistor seri yang mendeskripsikan resistansi internal di dalam aliran arus. *Cell* dari panel *photovoltaic* mengeluarkan daya yang sangat kecil, *cell* harus disusun dalam konfigurasi seri paralel untuk memproduksi daya yang cukup. Rangkaian ekuivalen yang menyatakan seri yaitu N_s dan paralel yaitu N_p . Saat terjadi efek *photovoltaic*, maka muncul arus I_{ph} dari sumber arus sesuai dengan intensitas yang diterima. Kemudian, arus yang dihasilkan akan mengalir menuju dioda sehingga terjadi *forward bias*. Hambatan R_{sh} merupakan hambatan *shunt* yang bernilai ribuan Ohm sehingga arus akan dominan mengalir pada hambatan R_s . Arus keluaran modul *photovoltaic* adalah sebesar I_{pv} dengan tegangan sebesar V_{pv} saat diberi beban sebesar R_L . Rangkaian pada *photovoltaic* dapat disederhanakan menjadi sebuah persamaan di bawah ini.

$$I = N_p I_{PH} - N_p I_S \left(\exp \left[\frac{q \left(\frac{V}{N_s} + \frac{I R_s}{N_s} \right)}{k T A} \right] - 1 \right) - \frac{\left(V \frac{N_p V}{N_s} + I R_s \right)}{R_{SH}}$$

2.1

$$V_t = \frac{kT}{q}$$

2.2

Keterangan:

- I_{pv} = arus keluaran dari modul *photovoltaic* (Ampere)
- I_{ph} = arus yang dihasilkan saat terjadi efek *photovoltaic* (Ampere)
- I = arus saturasi *reverse* (Ampere)
- V_{pv} = tegangan keluaran modul *photovoltaic* (Volt)
- k = konstanta boltzman (1.3806.10⁻²³ J.K-1)
- T = temperatur permukaan modul *photovoltaic* (K)
- R_{sh} = hambatan shunt (Ohm)
- R_s = hambatan pada arus keluaran (Ohm)
- N_s = jumlah *cell* seri
- N_p = jumlah *cell* parallel
- A = luasan yang terkena radiasi pada *cell*
- q = *irradiansi* terserap *cell*

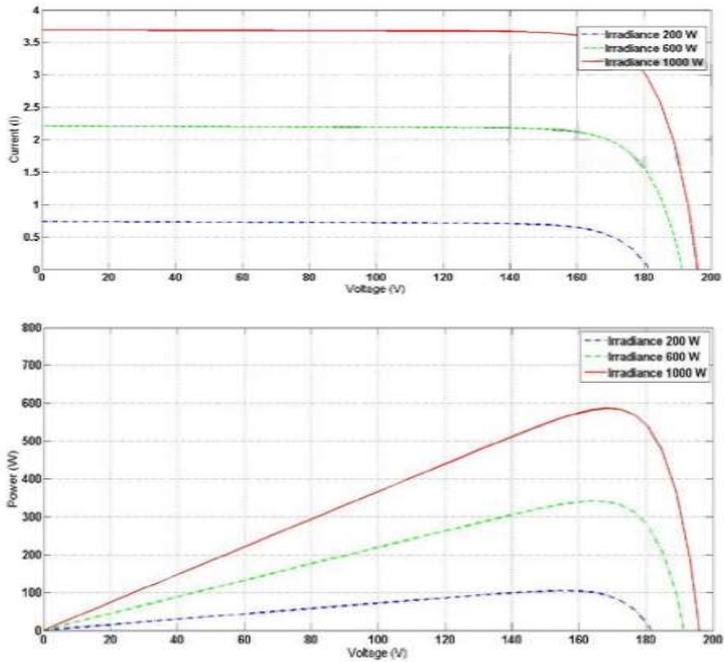
2.1.1 Karakteristik *Photovoltaic*

Dalam aplikasinya, hal yang paling diperhatikan di dalam *photovoltaic* adalah besar daya keluaran (P_{out}). Daya yang dihasilkan oleh *photovoltaic* bergantung pada tegangan dan arus yang dihasilkan saat terkena cahaya matahari. Tegangan dan arus *photovoltaic* bergantung dari besaran-besaran antara lain (Upadhyay, Kumar, & Vairagi, 2014):

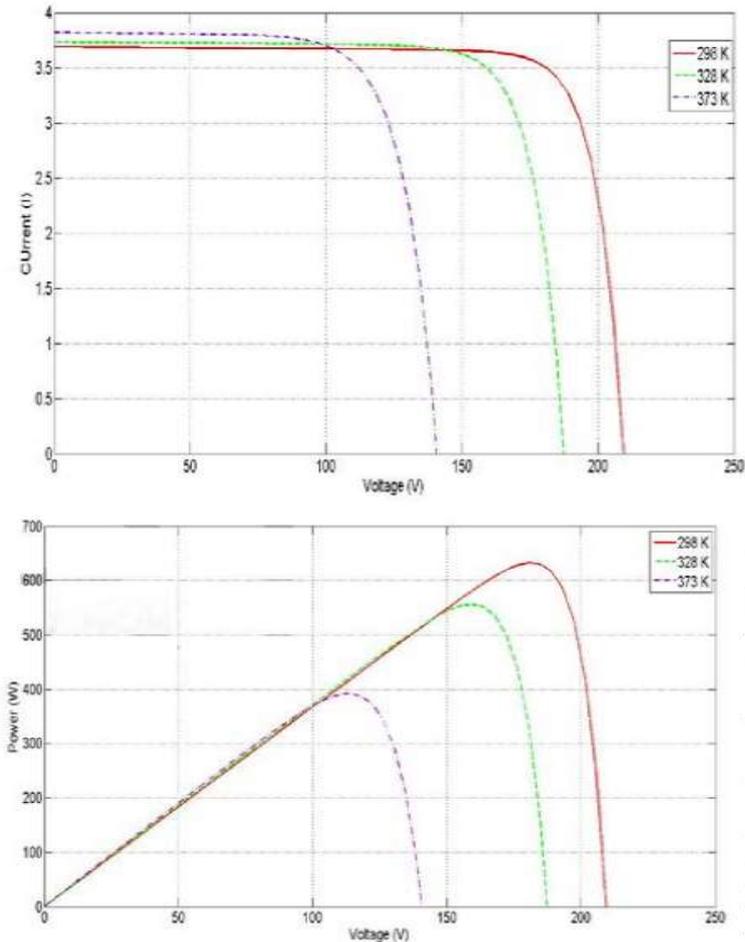
- a) Intensitas Matahari
- b) Temperatur permukaan modul *photovoltaic*
- c) Posisi dan sudut letak *photovoltaic* terhadap matahari
- d) Lokasi pemasangan *photovoltaic*
- e) Arah dan kecepatan angin

Kelima besaran yang telah disebutkan, faktor yang paling berpengaruh terhadap daya keluaran *photovoltaic* adalah *intensitas matahari* dan temperatur permukaan modul *photovoltaic* (Rajitha Reddy, 2015).

Untuk melihat pengaruh kedua besaran tersebut, dapat ditunjukkan dengan kurva karakteristik I-V dan P-V pada.



Gambar 2.2. Kurva karakteristik I-V dan P-V tentang perubahan intensitas matahari dan temperatur permukaan tetap *photovoltaic*



Gambar 2.3. Kurva karakteristik I-V dan P-V tentang pengaruh intensitas matahari tetap dan perubahan temperatur permukaan *photovoltaic*

Gambar 2.3 merupakan keluaran daya *Maximum Power Point* (MPP) panel *photovoltaic* dengan nilai daya maksimum sebesar 600 *watt peak* yang mengalami perubahan intensitas matahari dan temperatur permukaan yang tetap (Ghosh, Shawon, & Rahman,

2013). Pada gambar 2.2 perubahan intensitas matahari menurun dari nilai 1000 W/m^2 , 600 W/m^2 dan 200 W/m^2 dengan nilai temperatur 273°K . Setiap penurunan intensitas matahari, maka akan terjadi penurunan besaran arus pada keluaran *photovoltaic* dan tegangan yang ditunjukkan pada kurva I-V. Selain mengalami penurunan keluaran besaran arus, terjadi penurunan daya dan tegangan yang ditunjukkan pada kurva P-V. Daerah kerja maksimum dari modul *photovoltaic* berada pada perpotongan pada kurva V-I dengan kurva P-V. Pada daerah tersebut, modul *photovoltaic* dapat menghasilkan tegangan dan arus keluaran maksimum sehingga daya maksimum dapat dihasilkan pula.

Gambar 2.3 sama seperti gambar 2.2 menunjukkan karakteristik I-V dan P-V pada panel *photovoltaic* yang terjadi perubahan adalah temperatur dari nilai 373°K , 328°K dan 298°K . Pada kurva I-V terjadi kenaikan arus dan tegangan saat terjadi penurunan temperatur permukaan panel *photovoltaic*. Kurva P-V, keluaran daya semakin besar dengan penurunan temperatur. Daerah kerja maksimum dari modul *photovoltaic* berada pada perpotongan pada kurva V-I dengan kurva P-V. Pada daerah tersebut, modul *photovoltaic* dapat menghasilkan tegangan dan arus keluaran maksimum, sehingga daya maksimum dapat dihasilkan. Daya keluaran *photovoltaic* merupakan hasil perkalian antara tegangan *open circuit* dan arus *short circuit* modul *photovoltaic*.

Dari kurva pada gambar 2.2 dan gambar 2.3 dapat diketahui bahwa pengaruh kenaikan intensitas matahari dapat meningkatkan daya yang dihasilkan modul dan demikian sebaliknya daya keluaran *photovoltaic* akan menurun saat intensitas yang diterima menurun. Pengaruh kenaikan temperatur permukaan akan berakibat pada pergeseran kurva daya ke arah kiri yang berarti daya yang dihasilkan akan menurun. Dari pengaruh tersebut, perlu dilakukan suatu upaya untuk menjaga modul *photovoltaic* agar tetap bekerja pada titik maksimum untuk menghasilkan daya maksimumnya.

2.2. Potensi Energi Surya di Indonesia

Indonesia memiliki potensi energi terbarukan yang cukup melimpah. Diantaranya adalah energi matahari yang dapat dikonversikan menjadi energi surya. Telah dinyatakan oleh kementerian ESDM melalui pemetaan persebaran intensitas matahari Indonesia seperti gambar 2.4



Gambar 2.4. Intensitas Radiasi Matahari Indonesia (esdm.go.id)

Indonesia memiliki keuntungan secara geografis karena terletak di daerah tropis dan dilewati oleh garis khatulistiwa dimana intensitas radiasinya lebih tinggi dibandingkan daerah lain yaitu sebesar 4,66 – 5,54 kWh/m² per hari hal ini termasuk yang paling baik untuk dimanfaatkan sebagai PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya) baik skala kecil, menengah maupun menengah keatas.

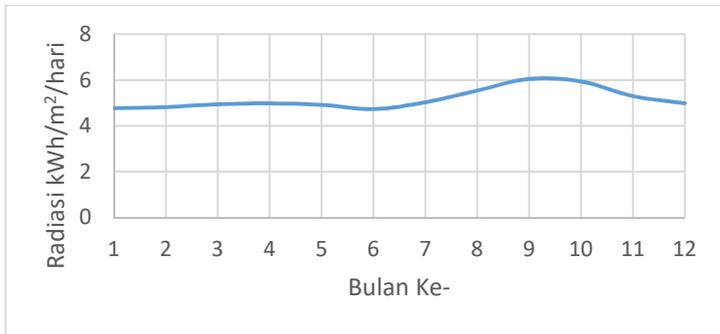
Berdasarkan data penyinaran matahari yang dihimpun dari 18 lokasi di Indonesia menunjukkan bahwa radiasi matahari Indonesia dapat diklarifikasi untuk dua kawasan, yakni:

- Kawasan Barat Indonesia (KBI) = 4,5 kWh/m²/hari, dengan variasi bulanan sekitar 10%
- Kawasan Timur Indonesia (KTI) = 5,1 kWh/m²/hari, dengan variasi bulanan sekitar 9%

Data tersebut menunjukkan bahwa ketersediaan radiasi matahari di KTI lebih tinggi dan lebih merata sepanjang tahun dibandingkan dengan KBI.

Surabaya yang merupakan bagian dari kawasan timur Indonesia, memiliki potensi radiasi matahari yang baik dan stabil. Apalagi letaknya yang berada di pesisir pantai laut Jawa. Data rata-rata intensitas radiasi matahari Surabaya mencapai 5,6 kWh/m²/hari (eosweb.larc.nasa.gov) pada tahun 2015

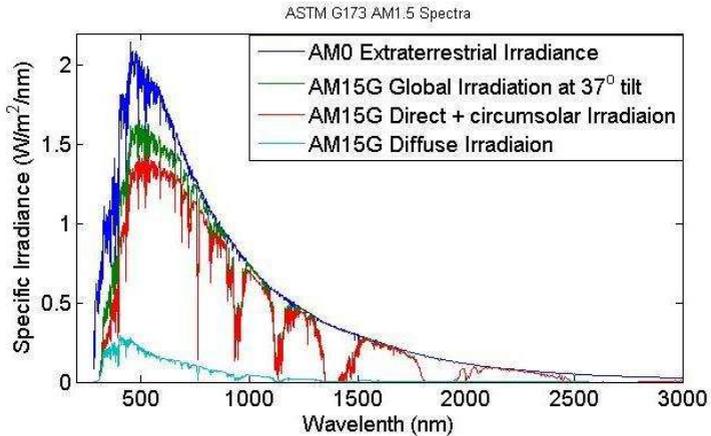
2.3. Energi Radiasi Surabaya



Gambar 2.5. Grafik Rata-rata Radiasi Matahari Tahunan

Radiasi matahari terdiri dari beberapa frekuensi, selain terlihat Gambar 2.5 The extraterrestrial spektrum matahari disebut Air Mass Nol (AM0) spektrum dan didefinisikan oleh ASTM E490 *standard*. Spektrum AM0 ditampilkan pada Gambar 2.6. Spektrum sinar matahari mencapai permukaan bumi dipengaruhi oleh atmosfer kondisi dan bervariasi berdasarkan lokasi dan waktu hari. Photovoltaic (PV) industri menerima spektrum standar untuk pengujian dan rating PV devices. Standar ini (AM1.5) *global irradiation* spektrum didefinisikan dalam ASTM G173-03 *standard*. Untuk kondisi atmosfer tertentu pada permukaan yang menghadap ke selatan miring di 37° (yaitu, lintang rata-rata untuk berdekatan Amerika Serikat). Kondisi yang dipilih dianggap rata-rata untuk berdekatan USA selama periode satu tahun (Zobaa

Ahmed, dkk).



Gambar 2.6. Extraterrestrial dan referensi fotovoltaik spektrum surya

Pengukuran radiasi matahari distabilkan dan diambil nilai rata-rata dengan nilai 1350 W/m² dengan nilai toleransi $\pm 3.4\%$ yang disebabkan variasi perubahan jarak bumi – matahari pertahunnya. Data ini diperoleh dari pengukuran satelit di luar atmosfer bumi. Energi matahari yang ditransmisikan mempunyai panjang gelombang dengan range 0.25 mikrometer sampai 3 mikrometer (untuk diluar atmosfer bumi / *extraterrestrial*), sedangkan untuk di atmosfer bumi berkisar antara 0.32 mikrometer sampai 2.53 mikrometer. Hanya 7% energi tersebut berisi ultraviolet, 47% adalah cahaya tampak (cahaya tampak memiliki panjang gelombang 0.4 mikrometer), 46% merupakan cahaya infra merah. (Jumadi, 2011).

2.4. Sistem PLTS

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah suatu teknologi pembangkit listrik yang mengkonversikan energi foton dari matahari menjadi energi listrik. Terjadi pada sel surya yang kemudian akan menghasilkan arus listrik searah yang kemudian akan dihubungkan antara sel surya satu dan yang lainnya secara

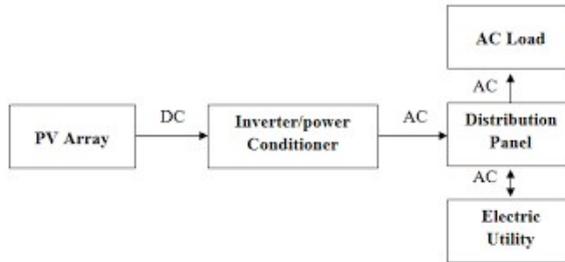
seri-pararel menjadi sebuah pv modul yang bisaanya terdiri dari 72 sel surya, selanjutnya rangkaian modul *photovoltaic* akan digabungkan membentuk PV *array*. Berdasarkan lokasi pemasangan sistem PLTS dibagi menjadi dua jenis yaitu, sistem PLTS pola tersebar dan sistem PLTS pola terpusat. Berdasarkan aplikasi dan konfigurasinya PLTS terbagi menjadi 2 jenis yaitu PLTS *off-grid* dan PLTS *on-grid* atau yang lebih dikenal dengan *grid connected*.

2.4.1 Off-Grid System

PLTS *off-grid* merupakan sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan listrik yang sudah ada. Sistem ini berdiri sendiri. Pada sistem ini bisaanya merupakan sistem dengan pola pemasangan tersebar dan dengan kapasitas energi yang dibangkitkan skala kecil. Sistem ini bisaanya dilengkapi dengan *storage* tenaga listrik dengan media penyimpanan baterai. Dengan tujuan baterai dapat menjamin ketersediaan pasokan listrik saat kondisi cuaca tanpa matahari.

2.4.2 On-Grid System

PLTS *on-grid* atau *grid-connected photovoltaic plant* merupakan sistem pembangkit listrik tenaga surya yang terhubung dengan jaringan listrik yang sudah ada. Berdasarkan pola operasi sistem tenaga listrik dibagi menjadi dua yaitu sistem dengan penyimpanan (*grid-connected photovoltaic with battery back up*) dan sistem pembangkit listrik tanpa sistem penyimpanan (*grid-connected photovoltaic without battery back up*). Sistem penyimpanan pada PLTS digunakan sebagai suplai energi listrik saat jaringan listrik mengalami kegagalan untuk periode tertentu. Berdasarkan aplikasinya sistem ini dibagi menjadi dua yaitu, *grid-connected distributed photovoltaic system* dan *grid-connected centralized photovoltaic* (Setiawan, 2014).



Gambar 2.7 Diagram sistem PLTS grid-connected (Gatot. 2012).

2.4.2.1 Grid-Connected Distributed Photovoltaic System

Grid-connected distributed photovoltaic system merupakan sistem PLTS on-grid yang menyediakan daya listrik untuk pelanggan yang terhubung dengan jaringan listrik yang spesifik. Contohnya *photovoltaic* system pada kawasan rumah yang terhubung jaringan tegangan rendah 230 V AC. Dalam hal ini setiap rumah memiliki *photovoltaic* system sebagai salah satu sumber tenaga listrik selain terhubung dan memperoleh pasokan tenaga listrik dari jaringan utama.

2.4.2.2 Grid-Connected Centralized Photovoltaic System

Grid-connected centralized photovoltaic merupakan sistem *photovoltaic* on-grid yang menyediakan pembangkit listrik yang digunakan sebagai sumber utama pasokan listrik skala besar dan langsung terhubung ke tengangan listrik tegangan menengah maupun tegangan tinggi.

2.5 Parameter Pemasangan *Photovoltaik*

Faktor pengoperasian maksimum solar *cell* sangat tergantung pada:

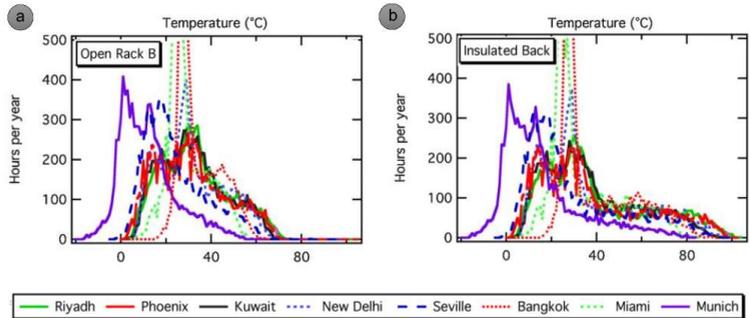
- a. Temperatur *Ambient*.
- b. Radiasi solar matahari.
- c. Kecepatan angin bertiup.
- d. Keadaan atmosfer bumi.
- e. Orientasi panel atau *array* PV (*photovoltaik*).

Posisi letak sel surya (*array*) terhadap matahari (*tilt angle*) (Sunaryo, 2014).

2.5.1 Temperature PV Modul

Sebuah sel surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur sel tetap normal (pada 25°C), kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperature normal pada panel surya akan melemahkan voltage. Setiap kenaikan temperatur sel surya 1 derajat celcius (dari 25 derajat) akan berkurang sekitar 0.5% pada total tenaga yang dihasilkan atau akan melemah dua kali lipat untuk kenaikan temperatur sel per 10°C. (Wulandari, 2010).

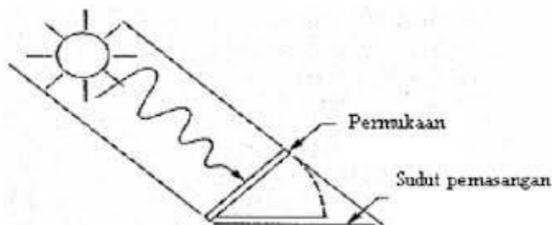
Kecepatan tiup angin disekitar lokasi PV dapat membantu mendinginkan permukaan temperatur kaca-kaca PV *array*. Keadaan atmosfer bumi, berawan, mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air, kabut dan polusi menentukan hasil arus listrik dari deretan PV. Untuk menghitung besarnya daya yang berkurang pada saat temperatur di sekitar PV modul mengalami kenaikan °C dari temperatur standarnya, dipergunakan rumus sebagai berikut (Gatot, 2011). Gambar 2.8 menjelaskan tentang distribusi suhu di modul *photovoltaic* pada lokasi yang berbeda yang menggambarkan dampak iklim pada variasi suhu modul (Kurtz, Whitfield, Tamizhmani, & et al., 2011). Suhu modul juga bergantung pada tipe pemasangan dari modul (*open-rack, roof mounted, insulated back, tracker*). Karena hal ini akan mempengaruhi perpindahan panas antara modul dan kondisi ruangan pada gambar 2.8 menunjukkan distribusi temperature pada open rack sebelah kiri (gambar 2.8a) dan insulated back pada sebelah kanan (2.8b). dari gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa pada insulated back memiliki suhu yang lebih besar dari pada open rack. Namun distribusi suhu pada gambar 2.8 adalah distribusi suhu pada jam di setiap waktu antara tidak ada matahari atau ada matahari. Oleh karena itu distribusi suhu dalam cakupan energi akan berbeda.



Gambar 2.8. Distribusi suhu dari modul PV untuk 2 konfigurasi pemasangan yang berbeda di beberapa lokasi (Kurtz, Whitfield, Tamizhmani, & et al., 2011)

2.5.2 Orientasi Panel atau Array

Orientasi dari rangkaian PV (*array*) ke arah matahari secara optimum adalah penting agar panel/deretan PV dapat menghasilkan energi maksimum. Selain arah orientasi, sudut orientasi (*tilt angle*) dari panel/deretan PV juga sangat mempengaruhi hasil energi maksimum. Sebagai guideline : untuk lokasi yang terletak di belahan utara *latitude* (seperti Indonesia) maka panel atau deretan PV sebaiknya diorientasikan ke utara, orientasi ke timur-barat juga dapat menghasilkan sejumlah energi dari panel-panel PV tetapi tidak akan mendapatkan energi matahari optimum. (Sunaryo, 2014)



Gambar 2.9. Sudut panel PV dalam posisi datar. (Sunaryo, 2014)

Gambar 2.9 tilt angle (sudut orientasi matahari) mempertahankan sinar matahari jatuh ke sebuah permukaan panel

surya secara tegak lurus akan mendapatkan energi maksimum $\pm 1000\text{W/m}^2$ atau 1 kW/m^2 .

2.6 *Computational Fluid Dynamic*

CFD merupakan analisis suatu sistem yang melibatkan aliran fluida, perpindahan panas, dan fenomena sejenis lain yang terkait, misalnya reaksi kimia dengan menggunakan simulasi computer (Veersteeg HK, 1995). Pemodelan CFD didasarkan pada penyelesaian persamaan Navier-Stokes, yaitu persamaan massa, momentum dan energi pada setiap titik pada grid dua atau tiga dimensi.

Simulasi berbasis CFD mulai dikembangkan sejak tahun 1960 an, namun masih terbatas pada bidang penelitian luar angkasa. Untuk saat ini software ini sudah digunakan secara luas pada industry manufaktur hingga industry kimia. Kelebihan menggunakan CFD dalam analisa adalah *insight*, *foresight*, dan efisiensi waktu. Komputasi yang digunakan pada CFD berdasarkan pada prinsip hukum kekekalan energi, massa, dan momentum. Sebagian besar simulasi CFD dilakukan dengan melalui 3 tahapan sebagai berikut:

2.6.1 *Pre-Processing*

Tahap ini merupakan tahap dimana pembuatan geometri dari pada benda atau material yang akan disimulasikan serta pemasukan variabel variabel awal seperti pendefinisian *domain*, *meshing*, dan pendefinisian boundary condition yang didapat dari perhitungan.

2.6.2 *Processing*

Tahap ini merupakan tahap dimana dilakukan perhitungan dari data-data yang dimasukkan dengan persamaan yang terlibat saat pendefinisian di *pre-processing* secara iterasi. Iterasi dilakukan sampai diperoleh nilai eror terkecil dan didapatkan hasil yang konvergen dimana selisih hasil iterasi sebelum dan sesudah sudah mencapai nilai minimum eror.

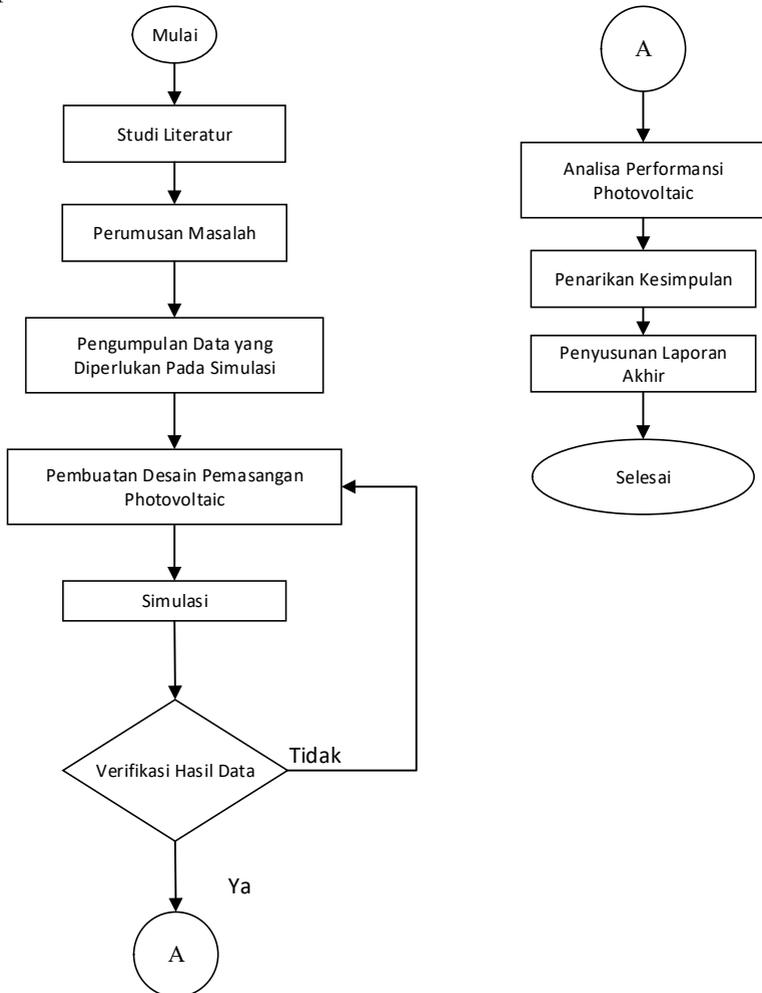
2.6.3 *Post-Processing*

Post-processing merupakan tahap dimana hasil simulasi CFD di intrepertasikan ke dalam gambar, grafik, serta animasi (untuk *transient*). Simulasi yang ditampilkan dapat berupa kontur warna atau dengan tabel serta vector untuk kecepatan.

Halaman ini memang dikosongkan

BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Diagram alir penelitian tugas akhir ini digambarkan pada Gambar 3.1 dengan penjelasan masing masing langkah dijelaskan pada subbab berikut.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

Berikut adalah rincian metodologi penelitian yang akan dilaksanakan pada tugas akhir kali ini:

- a) Perumusan masalah cakupan bahasan penelitian.
- b) Studi literatur tentang *Building Integrated Photovoltaic*.
- c) Studi literatur terhadap materi yang terkait dengan pelaksanaan tugas akhir yang akan dilakukan, mengenai kesetimbangan panas pada *photovoltaic* serta factor yang mempengaruhi suhu dari *photovoltaic*.
- d) Studi literatur terhadap materi yang terkait dengan factor yang mempengaruhi performansi dari *photovoltaic* seperti suhu dan iradiansi.
- e) Pengambilan data dilapangan meliputi beban yang ada pada studi kasus, dan pengambilan data sekunder seperti data iradiansi dan suhu rata-rata harian pada lokasi yang di tinjau.
- f) Merancang simulasi aliran udara pada *photovoltaic* dengan menggunakan *Computational Fluid Dinamic Fluent*
- g) Mensimulasikan posisi pemasangan *photovoltaic* pada sistem untuk mengetahui efek dari konveksi alam terhadap suhu *photovoltaic* yang terpasang untuk mengetahui posisi pemasangan yang optimal meliputi sudut serta jarak antara *photovoltaic* dengan insulasi.
- h) Mendapatkan nilai optimal pemasangan *photovoltaic* Penyusunan analisis dan laporan.

3.1. Studi Literatur

Dalam penelitian ini, literatur – literatur yang mendukung adalah jurnal, artikel, buku referensi dan makalah seminar yang telah dipublikasikan sebelumnya. Hal yang dibahas dalam referensi meliputi *photovoltaic*, *Natural Convection*, *heat generation*, *heat gain photovoltaic*, *power at maximum power point*. Literatur tentang *photovoltaic* menjelaskan tentang kinerja *photovoltaic* yang direpresentasikan dengan suhu *photovoltaic* terhadap efisiensi dari *photovoltaic* serta perubahan nilai iradiasi kedalam energi listrik dan energi panas. Serta pengaruh dari *natural convection* pada bangunan teintegrasi *photovoltaic* terhadap suhu

photovoltaic. Cara kerja *software* yang digunakan dan sistem pengambilan data yang dibutuhkan.

3.2. Perumusan Masalah

Sebelum melakukan penelitian, maka dibuat perumusan masalah yang menentukan cakupan pembahasan. Dalam penelitian ini terdapat beberapa cakupan masalah yaitu, bagaimana optimalisasi desain *Building Integrated-Photovoltaic System* yang cocok untuk food court di wilayah surabaya, bagaimana pengaruh pemasangan posisi *photovoltaic* pada atap bangunan terhadap performansi *photovoltaic* serta faktor faktor yang dapat mengoptimalkannya untuk meningkatkan performansi.

3.3. Pengumpulan Data yang diperlukan Pada Simulasi

Data yang diperlukan untuk parameter masukan meliputi temperatur suhu ruangan, spesifikasi komponen yang digunakan, luas dari atap bangunan, beban maksimal bangunan pada satu waktu, iradiasi pada daerah, kecepatan angin daerah.



Gambar 3.2. Gambar Atap Bangunan *Food Court*(google.co.id)



Gambar 3.3 Foto lokasi *Food Court* dari samping

Tabel 3.1. Spesifikasi *photovoltaic*

Solar Module	BP 3165
<i>Maximum Power</i> (P_{\max})	165 Watt
<i>Power Tolerance</i>	$\pm 10\%$
<i>Voltage at</i> P_{\max}	35,2 Volt
<i>Current at</i> P_{\max}	4,7 Ampere
V_{oc} (<i>Open Circuit</i>)	44,2 Volt
I_{sc} (<i>Short Circuit</i>)	5,1 Ampere
<i>Normal Operating Cell Temperature</i> (NOCT)	$47 \pm 2^{\circ}\text{C}$
<i>Standard Test Condition</i>	1 kW/m^2 and 25°C
<i>R shunt</i>	300 ohm
<i>Rseries</i>	0,66 ohm

Koefisien suhu untuk I_{sc}	$(0,065 \pm 0,015)\%/^{\circ}\text{C}$
Koefisien suhu untuk V_{oc}	$-(160 \pm 20)\text{mV}/^{\circ}\text{C}$
Koefisien suhu untuk daya	$-(0,5 \pm 0,05)\%/^{\circ}\text{C}$
NOCT	$47 \pm 2^{\circ}\text{C}$
Solar Module	BP 3165
<i>Width</i>	790 mm
<i>Length</i>	1593 mm
<i>Area</i>	$1,25847 \text{ m}^2$
<i>Height</i>	50 mm
<i>Weight</i>	15.4 Kg

Tabel 3.2. Data Lokasi

No	Parameter	Nilai
1	Latitude	$-7,235^{\circ}$
2	Kemiringan Atap	20°
3	Suhu Udara	301.9 K
4	Kecepatan Angin	1 m/s
5	Gravitasi	$9,8\text{m}/\text{s}^2$
6	Tekanan Udara	101153.13 Pa
7	Heat transfer coefficient udara	$10\text{W}/\text{m}^2\text{K}$
8	Panjang	28,44 m
9	Lebar	34 m
10	Tinggi	13,5 m

Tabel 3.3. Konsumsi Beban Pada Studi Kasus

Jenis Beban	Jumlah	Kapasitas total(kW)	Jam Operasi per hari(h)	Konsumsi Energi kWh
Kulkas 145W	2	0.28	10	2.8
Kulkas 74W	5	0.37	10	3.7
Penanak Nasi	2	0.75	10	7.5
Pend. Minuman	3	0.516	10	5.16
Dispenser	5	1.75	10	17.5
Blender	2	0.75	10	7.5
Total Konsumsi Energi per hari				44.16
Konsumsi energi pertahun				16118.4

Tabel 3.4. Informasi Lokasi

Nama tempat	Food Court Convention Hall, Surabaya
Koordinat	-07° 17' 22", 112° 47' 01"
altitude	3 m
Sudut inclinasi	20°
Sudut Azimuth	0° Utara
Rata-rata iradiasi harian	5.3 kWh/m ²
Suhu Udara Harian	25.1°C

3.4. Pembuatan Desain Pemasangan *Photovoltaic*

Dari data yang berhasil didapat di lapangan maka akan digunakan untuk membuat desain sistem *photovoltaic* yang sesuai dengan lokasi yang ditinjau pada tahap ini akan ditentukan konfigurasi sistem *photovoltaic* yang meliputi penentuan kapasitas pembangkit listrik tenaga surya yang diperlukan dengan menggunakan persamaan 3.1 (Ireland)

$$\text{Output (kWh)} = 0,8 \times kW_p \times S \times Z_{pv} \quad 3.1$$

Dimana

kW_p = daya array *photovoltaic*

S = radiasi rata rata harian
 Z_{pv} = *shading factor*

Maka untuk mencari nilai kWp dari persamaan 3.1 adalah sebagai berikut

$$kW_p = \frac{Output}{0,8 \times S \times Z_{pv}} \quad 3.2$$

Dari persamaan 3.2 didapat nilai daya maksimum *photovoltaic* yang digunakan pada sistem sebesar 10,4kW_p maka digunakan *inverter* dengan kapasitas 3,8kW sebanyak 2 buah dan 3kW sebanyak 1 buah. Jumlah *photovoltaic* yang digunakan dapat dicari dari persamaan 3.3

$$nPV = \frac{kW_p}{P_{pv}} \quad 3.3$$

Dimana

nPV = Jumlah modul *photovoltaic*

kWp = Daya *Array* yang dibutuhkan

Ppv = Daya satu modul *photovoltaic*

Dari persamaan 3.3 didapat jumlah modul *photovoltaic* sebanyak 68 buah modul. Dari penentuan kapasitas *inverter* dan jumlah modul *photovoltaic* didapat konfigurasi modul *photovoltaic* dengan rangkaian seri sebanyak 8 untuk *inverter* 3,8kW dan 10 pada *inverter* 3kW dimana *inverter* 3,8kW masing masing memiliki 3 buah input dan *inverter* 3kW memiliki 2 input sehingga konfigurasi pada sistem untuk bagian elektrikal dapat dilihat pada Lampiran a gambar 1. Setelah menemukan jumlah modul *photovoltaic* yang dibutuhkan maka akan dibuat desain pemasangan *array* dari bangunan yang sudah ada. Desain bangunan secara detail dapat dilihat pada Lampiran B.

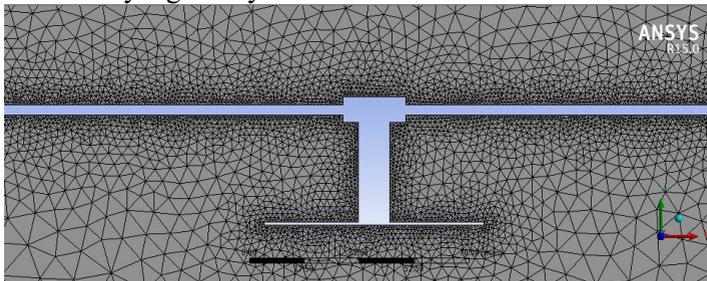
3.5. Simulasi

Pada penelitian ini *photovoltaic* yang digunakan adalah tipe BP 3155 dengan daya maksimal output 155 WP, sudut kemiringan yang digunakan adalah 20^o dengan variasi pemasangan 3, 4, 5

modul *photovoltaic*. Pemasangan *photovoltaic* terletak di bagian atap bangunan dengan material aluminium.

3.5.1 Pre-Processing

Dimasukkan data seperti nilai konduktifitas dari bahan serta geometry yang ada, gambar property bahan dilihat di tabel 3.1. Setelah itu maka dibuat geometry *photovoltaic* dengan konfigurasi 3 modul, 4 modul dan 5 modul. Hal ini dilakukan untuk mengetahui profil perubahan suhu terhadap jumlah modul yang dipasang serta perubahan air gap dengan jarak antara 0,1 m sampai dengan 0,2m dengan increment 0,02m. gambar 3.8 menjelaskan tentang *mesh* pada sambungan antara *photovoltaic* dengan *photovoltaic* yang lainnya



Gambar 3.4. Sambungan antar modul *photovoltaic*

3.5.2 Menentukan *Boundary Condition*

Tahapan selanjutnya adalah menentukan *boundary condition* atau kondisi batas pada obyek yang akan disimulasikan. *Boundary condition* dapat dilihat pada tabel 3.5

Tabel 3.5. Data spesifikasi *Boundary Condition*

<i>Boundary condition</i>	Keterangan
<i>Inlet</i>	Type : <i>Velocity Inlet</i> Kecepatan : 1 m/s Suhu : 301,9 K
<i>Outlet</i>	Type : <i>Pressure Outlet</i>
<i>Atmosfer</i>	Type : <i>Pressure Outlet</i>
<i>Photovoltaic</i>	Type: <i>Stationary Wall</i>
<i>Aluminium Frame</i>	Type : <i>Stationary Wall</i>

3.5.3 Processing

Tahapan setelah pre-processing ialah processing. Pada tahap *Processing* mengatur *Solver Model*, *viscous model*, *materials*, *control and monitoring condition*, serta *initializing conditions*. Kemudian dilakukan proses iterasi untuk menyelesaikan proses simulasi. Berikut ini adalah penjelasan mengenai langkah-langkah dalam *processing*.

3.5.3.1 Solver model

Persamaan energi yang ada pada solver model diaktifkan untuk mendukung penyelesaian *heat transfer* dan kompreibilitas aliran terhadap perubahan temperatur dan tekanan. Untuk turbulence modeling yang digunakan ialah k-epsilon. Pemilihan k-epsilon karena model ini mendukung perhitungan *natural convection* pada sekitar *photovoltaic*.

3.5.3.2 Material

Dalam simulasi ini material yang digunakan ada 3 macam yaitu fluida kerja yang mengalir, material *frame photovoltaic* dan material *photovoltaic*. Fluida kerja yang mengalir dimodelkan sebagai gas ideal dengan temperature 301,9K dan material *photovoltaic* merupakan campuran antar silicon dan glass. Properties fluida diperoleh dari tabel A4 website www.engineeringtoolbox.com. Berikut adalah tabel properties fluida yang mengalir:

Tabel 3.6. *Properties* Fluida (Gas Ideal)

Properties	Nilai
<i>Temperature Inlet(K)</i>	301,9
<i>Density(Kg/m³)</i>	1,17029
<i>Specific Heat (Cp)</i> (KJ/Kg.K)	1,005
<i>Thermal Conductivity(W/m.K)</i>	0,134859
<i>Kinematic Viscosity(Kg/m.s)</i>	15,9377x10 ⁻⁶
<i>Expansion Coefficient(1/K)</i>	3,32765

Tabel 3.7. Properties *Photovoltaic*

Properties	Nilai
Tebal Material(m)	0,0038351
<i>Density</i> (Kg/m ³)	2646,9948
<i>Specific Heat</i> (Cp) (KJ/Kg.K)	594,255926
<i>Thermal Conductivity</i> (W/m.K)	1,0663

3.5.3.3 Boundary Condition

Pada *boundary condition* terdapat beberapa variabel yang dimasukkan sebagai parameter simulasi. Variabel yang digunakan tertera pada tabel 3.2.

3.5.3.4 Control and Monitoring Solution

Solution control yang digunakan pada metode *pressure-velocity coupling* adalah SIMPLE dengan diskritisasi *first order upwind* untuk seluruh parameter selain pressure. Pada *Discretization Method* untuk tekanan dipilih PRESTO!. Pada bagian residual untuk seluruh parameter sebesar 10^{-3} . Kecuali energi 10^{-6} .

3.5.3.5 Initialize Condition

Initialize adalah nilai awal untuk setiap parameter sebelum dilakukan proses iterasi pada simulasi. Metode inisialisasi yang digunakan adalah *Standrat initialize* untuk mendapatkan nilai parameter awal berdasarkan *boundary conditions* pada sisi *inlet*.

3.5.3.6 Iterations

Iterations merupakan tahap terakhir setelah seluruh pengaturan dilakukan. Proses simulasi dimulai dengan melakukan iterasi sejumlah 1000 iterasi hingga mencapai kriteria konvergensi. Kriteria konvergensi telah diatur pada pengaturan *residual monitoring level*.

3.5.4 Post-Processing

Pada tahap post processing didapatkan hasil simulasi berupa nilai temperatur wall boundary PV pada masing masing modul serta kecepatan aliran pada bagian bawah modul. Selain nilai didapat juga persebaran panas pada bagian yang telah dilakukan *pre-processing*.

3.6. Analisa Performansi Photovoltaic

Pada tahap ini dilakukan analisa terhadap suhu *photovoltaic* terhadap performansi dari *photovoltaic* dengan membandingkan daya yang keluar dengan kondisi suhu berdasarkan persamaan (Duffie & Beckman, 2006)

$$T_c = T_a + \frac{Tn - 20}{800} G \left(1 - \frac{\eta_c}{\tau\alpha} \right) \quad 3.4$$

Efisiensi modul berdasarkan suhu didapat dari persamaan

$$\eta_c = \eta_r (1 + \alpha_{mp} (T_c - T_r)) \quad 3.5$$

Sehingga perkiraan suhu sel *photovoltaic* dapat dicari dengan mensubstitusikan kedua persamaan diatas

$$T_c = \frac{T_a + \frac{Tn - 20}{800} G \left(1 - \frac{\eta_c (1 - \alpha_{mp} (T_r))}{\tau\alpha} \right)}{1 + \frac{Tn - 20}{800} G \frac{\eta_c \alpha_{mp}}{\tau\alpha}} \quad 3.6$$

Dimana G merupakan Iradiansi yang mengenai panel, yang mengenai panel dapat dihitung dengan menggunakan geometri matahari, *beam radiation* dan *diffuse radiation* pada sumbu horizontal menggunakan persamaan dibawah ini (Duffie & Beckman, 2006)

$$G = G_b \frac{\cos i}{\cos z} + G_d \frac{1 + \cos \beta}{2} + (G_b + G_d) \rho \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad 3.7$$

Rasio performansi dari modul *photovoltaic* bisa didapatkan dari rasio antara efisiensi modul *photovoltaic* saat kondisi operasi dengan kondisi saat STC(standart test condition).

Dan dicari dengan persamaan 3.8. (Chatzipanagi, Frontini, & Virtuani, 2016)

$$PR=(E/P_{STC})/(G/G_{STC}) \quad 3.8$$

Dimana

E= Energi yang dihasilkan modul (Wh)

PR= Rasio Performansi

P_{STC} = Daya modul saat STC(Standart Test Condition)(W)

G = Iradiansi yang diterima modul(Wh/m²)

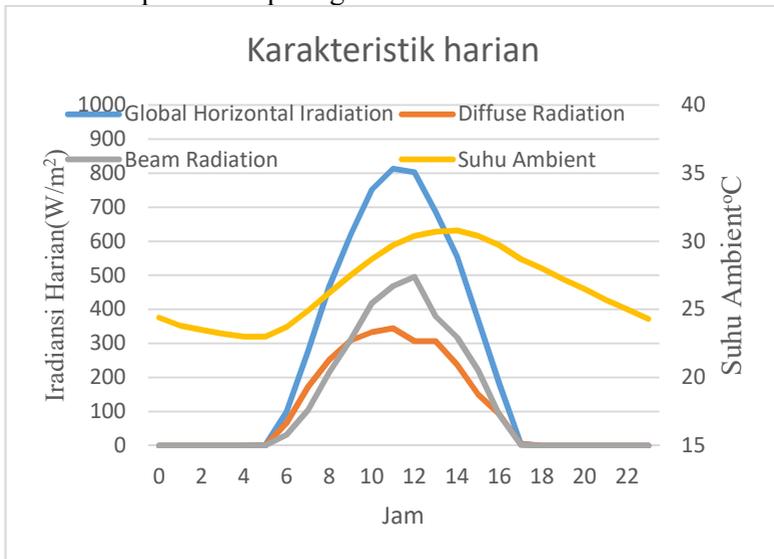
G_{STC} = Iradiansi saat STC (W/m²)

BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

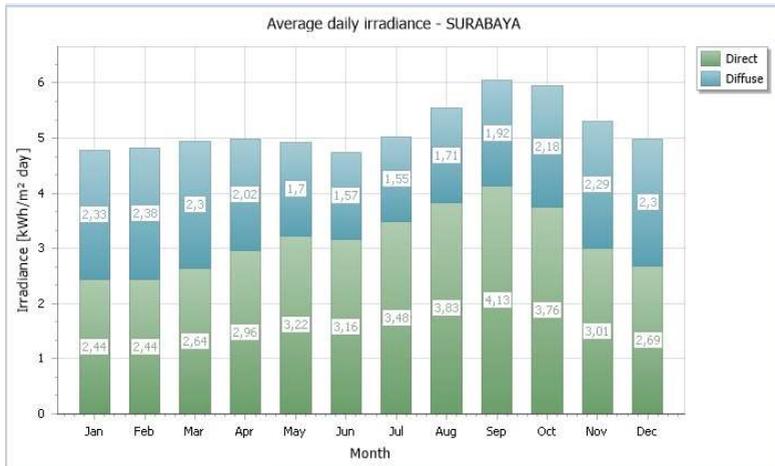
Pada bab ini akan membahas hasil simulasi mengenai pengaruh pemasangan modul *photovoltaic* terhadap suhu *photovoltaic* dengan variasi lebar celah udara antara *photovoltaic array* dan atap bangunan. Dan membahas tentang hasil desain sistem *photovoltaic* yang dibutuhkan

4.1. Analisis Energi Matahari

Surabaya berada pada 07.28° Lintang Utara dan 112.78° Bujur timur yang termasuk memiliki nilai iradiasi yang cukup selama setahun. Iradiasi matahari perhari berkisar antara $4,73 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ sampai dengan $6.05 \text{ kWh/m}^2/\text{hari}$ dengan rata-rata sinar matahari harian 7 jam. Performansi dari sistem *photovoltaic* sangat dipengaruhi oleh kondisi cuaca dan iklim daerah seperti suhu udara, iradiansi, kecepatan angin dll. Variasi suhu ruangan dan iradiansi dapat dilihat pada gambar 4.1.

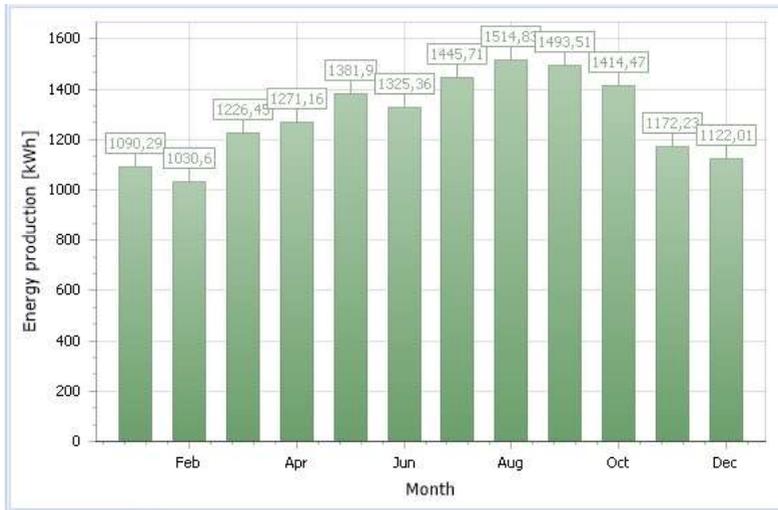


Gambar 4.1. Variasi iradiansi matahari dan suhu ambient di Surabaya



Gambar 4.2. Grafik Iradiansi di daerah Surabaya

Pada gambar 4.1 menunjukkan rata-rata iradiansi horisontal, radiasi sinar langsung, dan radiasi terpendar serta suhu harian. Suhu ambient harian bervariasi antara 23°C sampai 30°C yang cocok untuk pemasangan PV namun suhu permukaan *photovoltaic* bisa melebihi suhu ambient. Hal ini dikarenakan sebagian iradiansi yang diterima oleh modul *photovoltaic* diubah menjadi panas dan hanya sebagian yang diubah menjadi energi listrik. Surabaya terletak pada altitude yang rendah sehingga mempunyai kelembaban antara 72% - 86% sehingga *diffuse radiation* kadang kala melebihi *beam radiation*. Saat musim hujan (Desember, Januari, Februari, Maret). *Diffuse radiation* semakin meningkat karena penyebaran radiasi dari udara. *Diffuse irradiation* dan *beam irradiation* bervariasi antara 1,57 kWh/m²/hari menjadi 2,38 kWh/m²/hari dan 4,13 kWh/m²/hari menjadi 2,44 kWh/m²/hari (gambar 4.2). Radiasi tertinggi yang didapat terjadi pada bulan September (6,05 kWh/m²/hari) dan radiasi terendah terjadi pada bulan Juni (4,77 kWh/m²/hari). Hasil energi yang dihasilkan oleh sistem dapat dilihat pada gambar 4.3



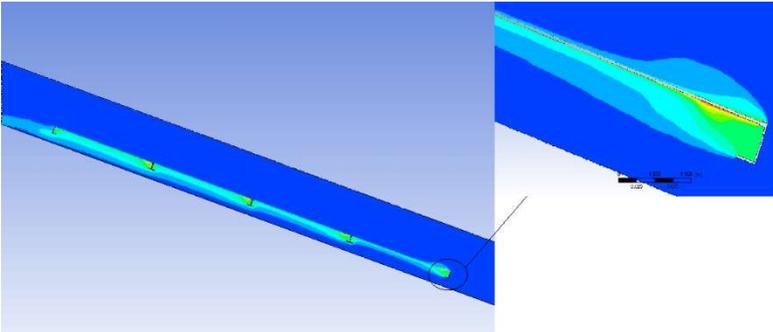
Gambar 4.3. Grafik energi yang dihasilkan oleh sistem selama satu tahun

Dari grafik 4.3 produksi paling tinggi terjadi pada bulan agustus sebesar 1514,83kWh dan produksi minimu terjadi pada bulan february dimana intensitas sinar matahari lebih sedikit dari bulan yang lain dikarenakan terjadinya musim hujan. Dari grafik 4.3 didapatkan kesimpulan bahwa produksi energi dari panel surya akan kurang dari beban konsumsi bangunan antara bulan November sampai april dan surplus pada bulan mei sampai juni, dari grafik ini didapatkan bahwa desain sistem dengan tujuan dapat mencukupi kebutuhan bangunan untuk satu tahun sudah mencukupi dimana perbandingan energi yang berlebih saat bulan mei sampai oktober dapat mencukupi kekurangan pada bulan November sampai juni.

4.2. Analisis Pengaruh Celah Udara

Pada sub bab ini akan membahas mengenai pengaruh dari celah udara pada pemasangan *photovoltaic* antara atap bangunan food court. Suhu rata-rata *photovoltaic* didapat dari area dengan distribusi panas paling banyak. Sedangkan suhu maksimal

photovoltaic atau pv panel didapat langsung dari simulasi. Pada simulasi ini nilai iradiansi yang digunakan sebesar 1107 W/m^2 dengan suhu ambient 28.9°C

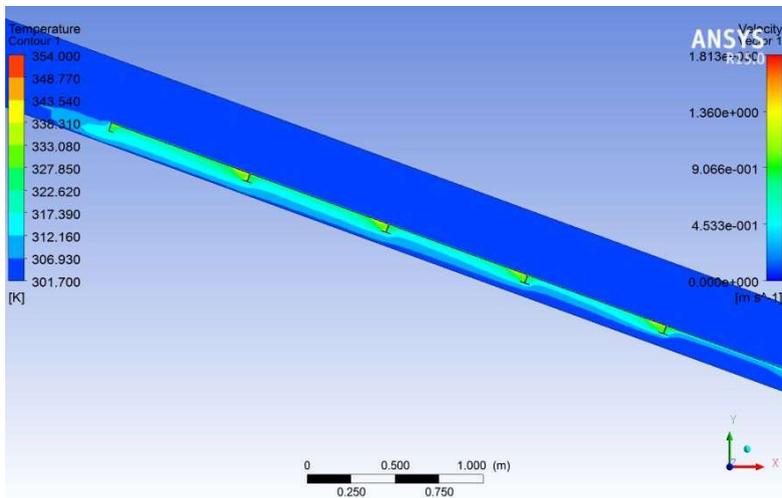


Gambar 4.4. Kontur suhu pada modul *photovoltaic*

Pada gambar 4.3 menunjukkan distribusi suhu pada modul *photovoltaic* dengan jarak $0,12\text{m}$ diatas atap bangunan yang memiliki kemiringan 20° pada iradiansi 1107 W/m^2 . suhu PV maksimum yang terjadi pada bagian ekor PV sebesar 80°C .

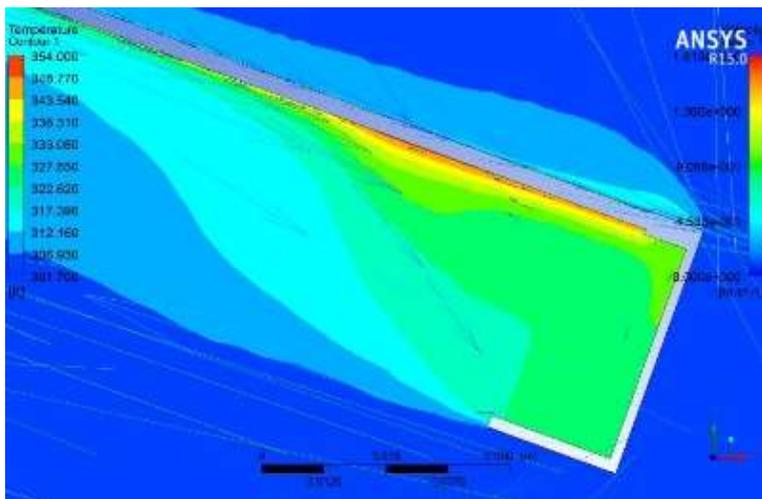
4.2.1. Analisis Suhu Lokal Pada susunan *photovoltaic* 5 modul

Fenomena aliran pada *photovoltaic module* dengan susunan 5 module secara detail ditunjukkan pada tampilan kontur suhu. Arah inlet pada simulasi berada pada sisi kanan dengan kecepatan inlet 1 m/s . Hasil simulasi ditunjukkan pada gambar berikut:

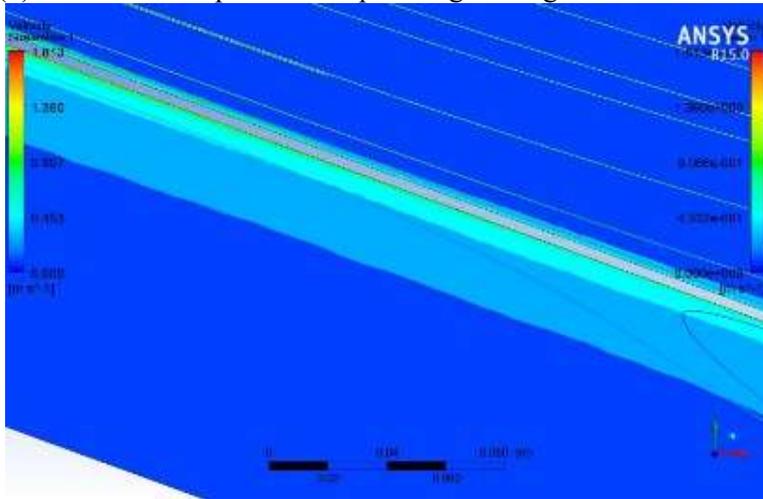


Gambar 4.5. Distribusi panel pemasangan 5 modul dengan air gap 0,12m

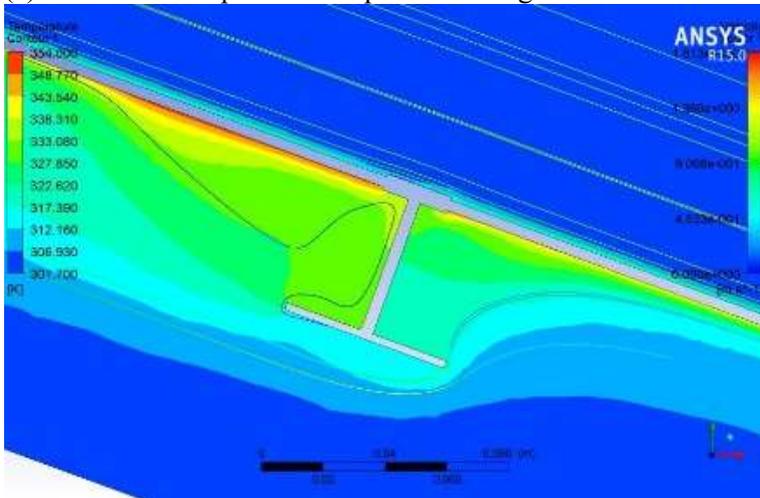
(a) Distribusi kecepatan udara pada bagian depan modul



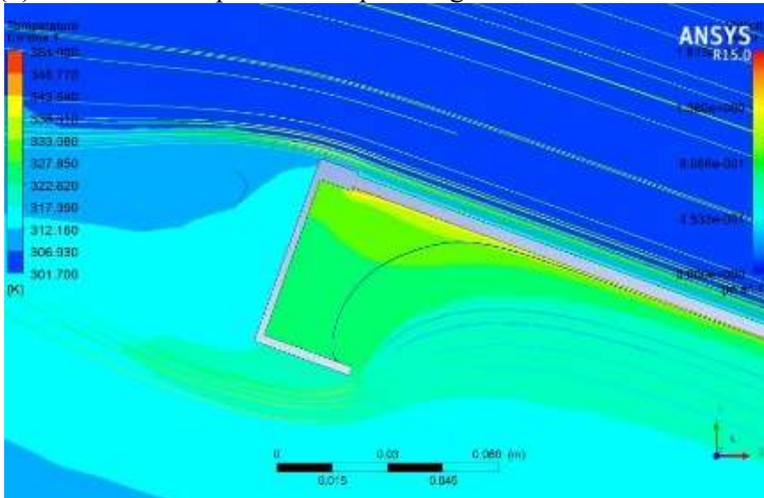
(b) Distribusi kecepatan udara pada bagian tengah modul



(c) Distribusi kecepatan udara pada sambungan antar modul



(d) Distribusi kecepatan udara pada bagian bawah modul

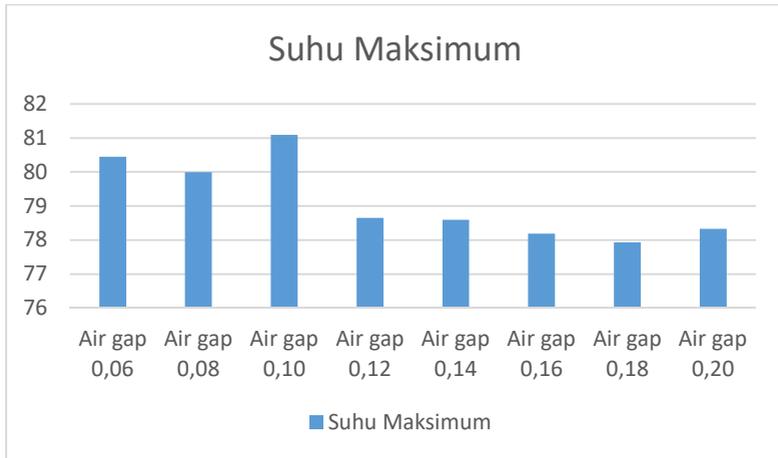


(d)

Gambar 4.6. Distribusi kecepatan udara pada modul *photovoltaic* dengan jarak air gap 0,12m dan jumlah modul 5 (a) bagian depan (b) bagian tengah (c) sambungan antar modul (d) bagian belakang

Pada gambar 4.4 terjadi peningkatan suhu udara pada bagian outlet modul *photovoltaic* dari 301,9 K menjadi 317,75K hal ini terjadi karena efek dari perpindahan panas dari modul sebelumnya. Pada gambar 4.5 a suhu modul *photovoltaic* memiliki distribusi suhu yang lebih tinggi dari daerah lainnya hal ini dikarenakan tidak adanya angin yang memindahkan panas dari modul *photovoltaic* sehingga suhu menjadi meningkat hal ini juga terjadi pada bagian modul *photovoltaic* di daerah sambungan antara satu modul dengan modul yang lainnya. Dari gambar 4.5 a dan 4.5 c terjadi pola distribusi suhu yang hampir sama namun pada sisi sebaliknya pada gambar 4.5c distribusi suhu lebih dominan memiliki warna hijau muda hal ini dikarenakan tidak terjadinya aliran udara dikarenakan kerumitan dari bingkai *photovoltaic*. Pada gambar 4.5 b suhu modul memiliki distribusi dengan warna hijau tua karena pada bagian ini efek angin mulai terjadi pada bagian ini nilai kecepatan angin rata rata sebesar 0,5 m/s. Dari simulasi didapat nilai suhu

maksimum modul *photovoltaic* sebesar 78.854°C . untuk distribusi suhu pada sambungan yang lain memiliki pola yang hampir sama meski dengan suhu yang berbeda dikarenakan suhu udara yang melalui menjadi semakin panas hal ini dapat dilihat dengan warna biru muda yang berada pada sekitar bagian bawah *photovoltaic* yang semakin banyak searah dengan arah angin.



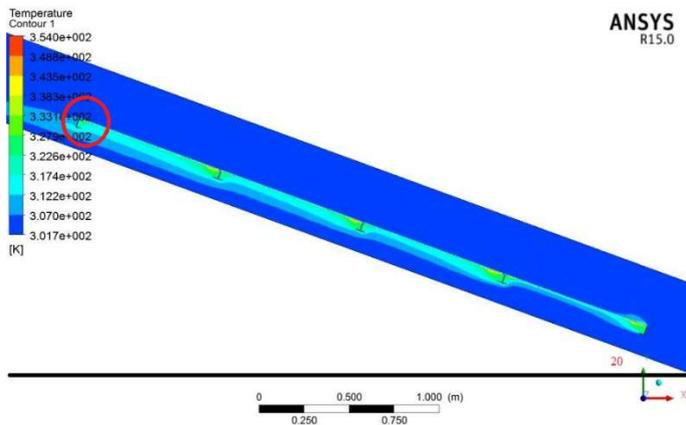
Gambar 4.7. Grafik Suhu maksimum modul *photovoltaic* pada susunan 5

Dari gambar 4.5 dapat terlihat distribusi suhu lokal pada model yang ditunjukkan oleh kontur suhu dengan warna merah. Dimana warna merah menunjukkan suhu dengan nilai tinggi, sedangkan kontur warna biru tua memiliki suhu yang paling rendah. Range yang digunakan untuk melihat suhu maksimal pada masing masing variasi berbeda yang ditunjukkan pada grafik 4. Saat suhu melewati modul *photovoltaic* maka akan terjadi perpindahan panas antara aliran diluar modul *photovoltaic* dengan dinding *photovoltaic*. Suhu aliran yang berada pada dinding *photovoltaic* lebih tinggi dibandingkan suhu udara yang melalui *photovoltaic*. Sehingga nilai suhu yang keluar dari modul *photovoltaic* dengan celah udara yang kecil akan memiliki

distribusi suhu yang lebih tinggi dari yang lain pada bagian bawah modul *photovoltaic* karena volume yang mengalir pada bagian bawah semakin kecil. Terlihat pada gambar 4.5c pada modul *photovoltaic* yang terakhir distribusi suhu menjadi semakin banyak dengan kontur warna hijau muda.

4.2.2 Analisis Pengaruh Jarak Celah Udara Terhadap Kontur Kecepatan

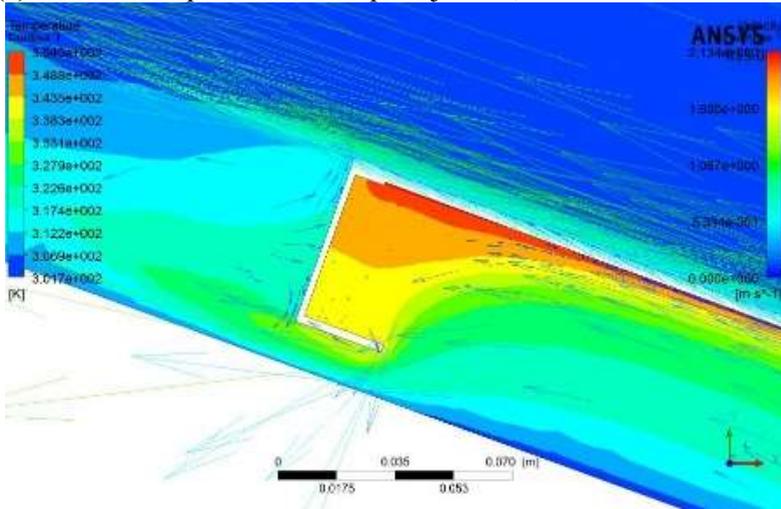
Fenomena perubahan kontur kecepatan berdasarkan perubahan besar celah udara antara modul dengan atap bangunan yang didapat dari simulasi dapat dilihat pada gambar berikut:



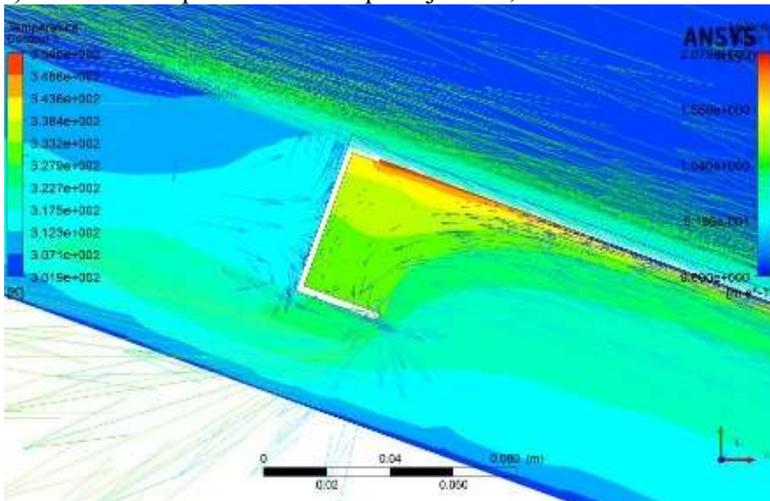
Gambar 4.8. Distribusi suhu pada 4 susunan modul dan jarak celah udara 0,16 m

Dari gambar diatas maka diambil data distribusi suhu dan kecepatan pada daerah yang diberi lingkaran merah untuk menunjukkan efek dari perubahan jarak celah udara pada variasi antara 0,06m sampai dengan 0,2m dengan kenaikan 0,02m. Hasil simulasi dapat dilihat pada gambar 4.8 sampai 4.9

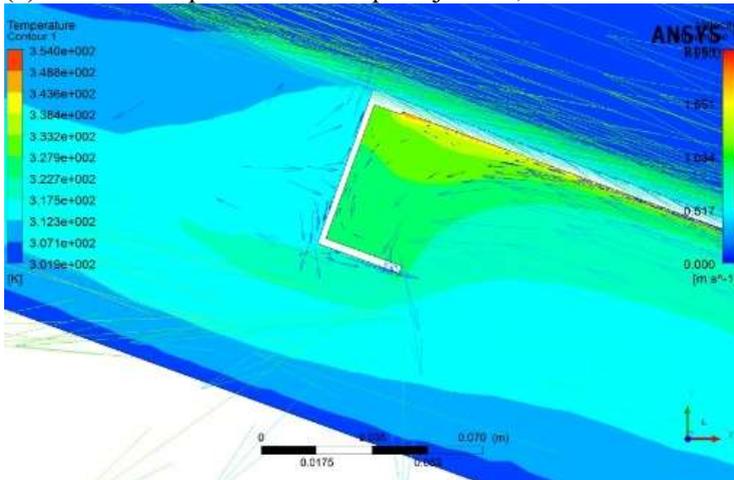
(a) Kontur kecepatan dan suhu pada jarak 0,06m



(b) Kontur kecepatan dan suhu pada jarak 0,08m

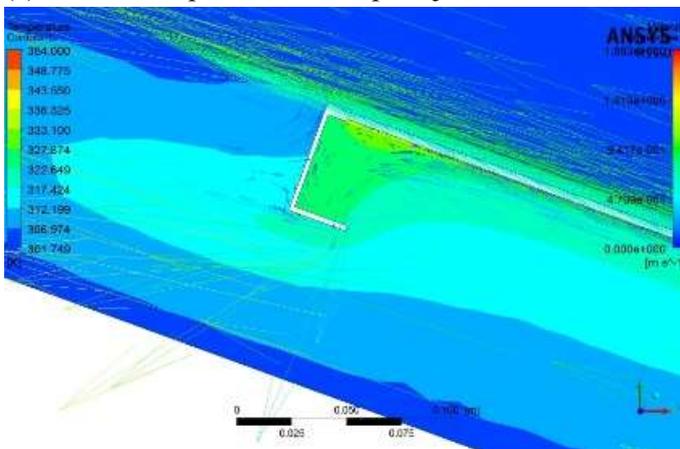


(c) Kontur kecepatan dan suhu pada jarak 0,1m

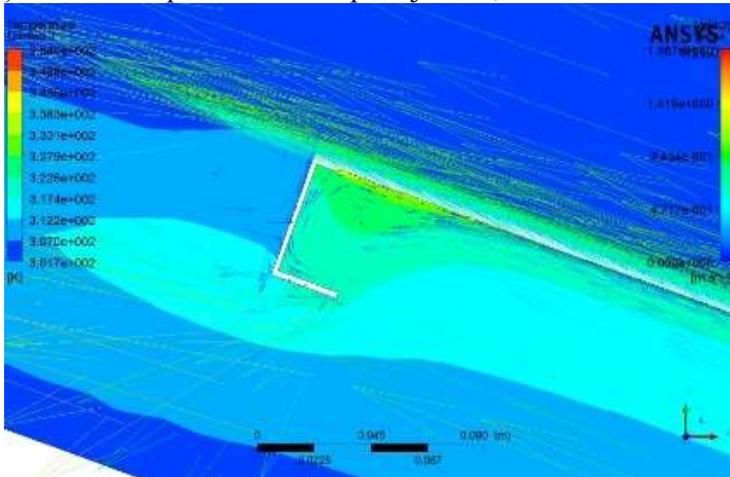


Gambar 4.9. Distribusi Kecepatan Pada Modul Photovoltaic dengan variasi Celah Udara (a) 0,06 m, (b) 0,08 m dan (c) 0,1 m celah udara

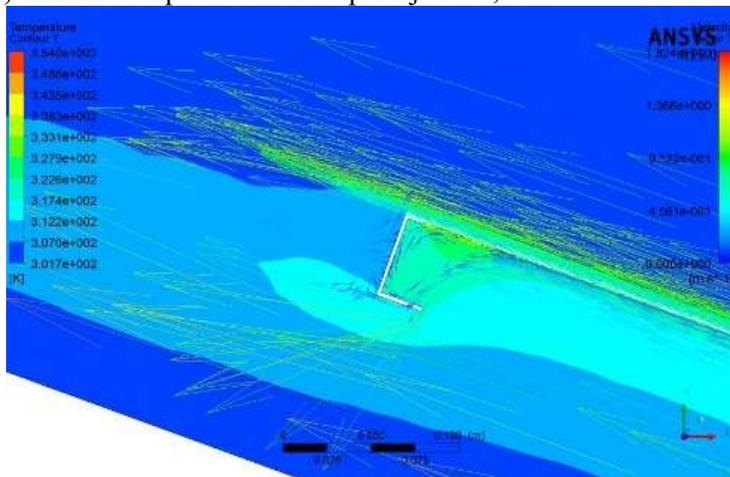
(a) Kontur kecepatan dan suhu pada jarak 0,12m



(b) Kontur kecepatan dan suhu pada jarak 0,14m

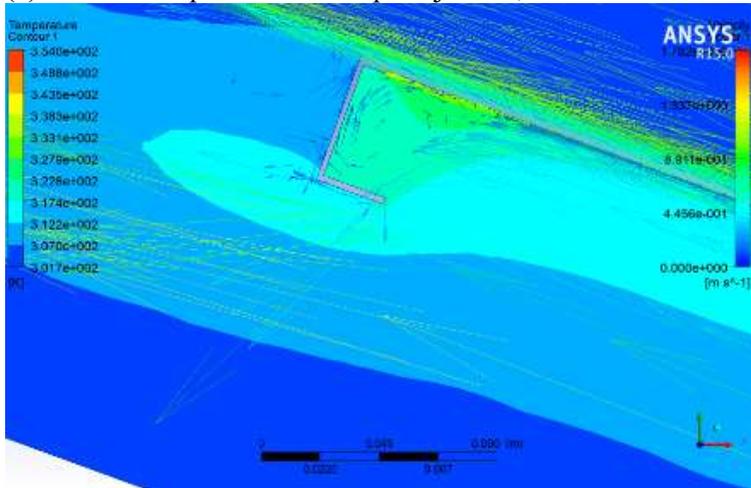


(c) Kontur kecepatan dan suhu pada jarak 0,16m

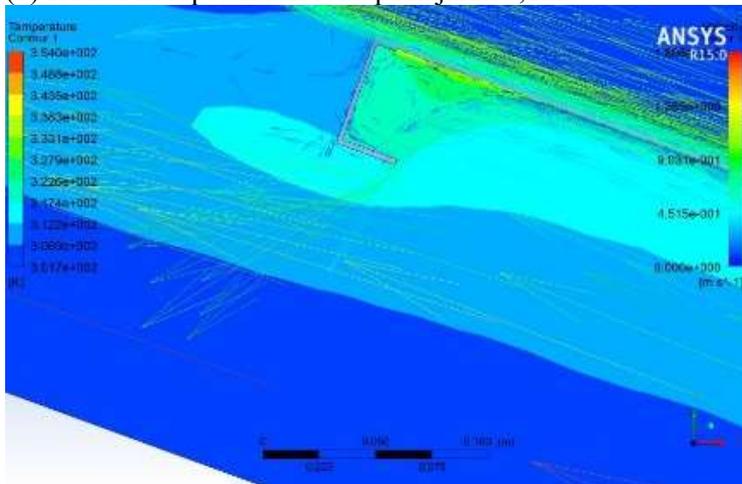


Gambar 4.10. Distribusi kecepatan pada modul photovoltaic dengan variasi celah udara (a) 0,12 m, (b) 0,14 m dan (c) 0,16 m \

(a) Kontur kecepatan dan suhu pada jarak 0,18m



(b) Kontur kecepatan dan suhu pada jarak 0,2m



Gambar 4.11. Distribusi Kecepatan Pada Modul Photovoltaic dengan variasi Celah Udara (a) 0,18 m dan (b) 0,2 m celah udara

Pada gambar 4.9 menunjukkan tentang perubahan distribusi suhu yang semakin berkurang distribusi warna merah pada jarak celah udara 0,6 ke jarak 0,8 hal ini berarti suhu modul *photovoltaic* semakin menurun saat terjadi perubahan dari 0,06 ke 0,08 dan saat diturunkan sampai ke 0,1 distribusi warna kuning menjadi lebih sedikit dan berganti menjadi warna hijau meskipun letak persebaran distribusi masih sama, hal ini terjadi karena karakteristik dari persebaran angin pada daerah tersebut yang semakin menurun saat mendekati bingkai aluminium hal ini terjadi karena saat udara membentur dinding maka akan terjadi peningkatan tekanan pada bagian tersebut dan sebagian kecil aliran udara akan berjalan keatas karena geometri dari aluminium, namun volume udara yang berputar pada samping bingkai aluminium sangat kecil sehingga tidak maksimal dalam mengurangi suhu dari modul *photovoltaic*. Udara yang melewati bagian *frame* aluminium tadi sebagian akan mengalami perputaran pada daerah tersebut dan sebagian lain akan mengikuti aliran yang berada dibawahnya hal ini mengakibatkan pola distribusi suhu yang akan semakin menurun saat peningkatan jarak modul *photovoltaic* terhadap celah udara karena saat perubahan jarak akan memperkecil koefisien hambat yang mengurangi kecepatan masuk. Pada gambar 4.10 menunjukkan tentang perubahan distribusi suhu pada daerah saat jarak celah udara sebesar 0,12m masih memiliki distribusi warna hijau muda dan saat dinaikkan menjadi 0,14 m distribusi suhu semakin berubah dengan distribusi warna hijau muda semakin berkurang, hal ini dikarenakan kecepatan pada daerah tersebut mengalami peningkatan karena perbesaran jarak celah udara pada gambar 4.9 c pola distribusi suhu menjadi lebih kecil untuk warna hijau muda, sehingga suhu *photovoltaic* menjadi lebih dingin karena suhu aliran udara yang berputar pada daerah tersebut menjadi lebih dingin. Pada gambar 4.10 terjadi peningkatan kecepatan aliran udara antara gambar 4.10 a dan 4.10 b.

4.3. Analisis Performansi Photovoltaic Terhadap Posisi Pemasangan

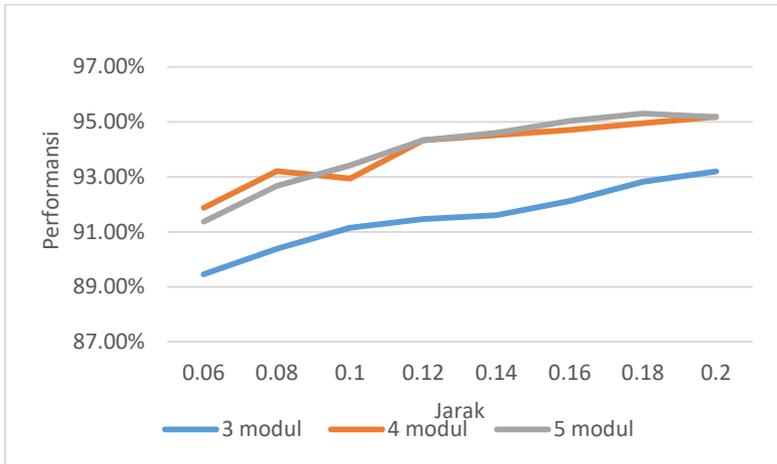
Pada Sub Bab ini akan dibahas tentang performansi *photovoltaic* terhadap posisi pemasangan modul *photovoltaic* pada *array*. Pada subab 4.2 didapatkan pengaruh dari celah udara terhadap penurunan suhu modul *photovoltaic* serta pengaruh pola pemasangan jumlah modul *array*. Simulasi yang dilakukan terhadap variasi jarak dan tipe pemasangan modul *photovoltaic* menghasilkan data suhu rata-rata *photovoltaic* terhadap jarak celah udara pada variasi pemasangan yang berbeda beda yang terdapat pada Tabel 4.1 berikut:

Tabel 4.1. Suhu Rata-Rata Photovoltaic.

Panjang Modul	3	4	5	
Jarak Celah Udara(m)	0.06	66.459	62.170	63.367
	0.08	64.824	59.821	60.781
	0.1	63.465	60.298	60.206
	0.12	62.913	57.833	57.983
	0.14	62.656	57.499	57.510
	0.16	61.742	57.168	56.732
	0.18	60.510	56.726	56.229
	0.2	59.831	56.317	56.483

Dari tabel 4.1 Dicari nilai performansi *photovoltaic* hasil desain dengan performansi *photovoltaic* saat kondisi tes standar.

Dengan menggunakan persamaan 3.8 maka didapat grafik pada gambar 4.12

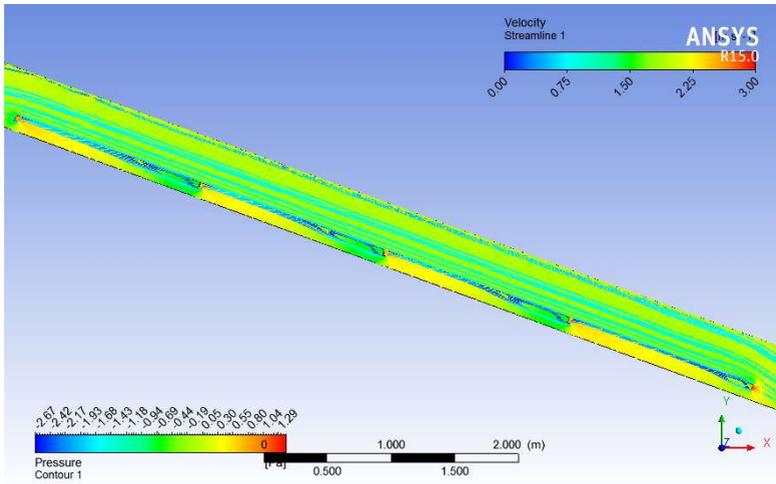


Gambar 4.12. Grafik Performansi dari *photovoltaic* dengan pemasangan yang berbeda

Grafik 4.12 menunjukkan tentang kenaikan nilai performansi sebanding dengan perubahan jarak celah udara, hal ini dapat dilihat dengan grafik yang selalu naik dari 89,46% sampai ke 93,2% untuk variasi dengan 3 modul per *array*, yaitu terjadi kenaikan sampai dengan 3,74%. Pada perubahan jarak dari 0,06m ke 0,01m kenaikan performansi terjadi secara signifikan hal ini dikarenakan aliran udara yang melewati bagian bawah modul menjadi lebih cepat sehingga panas yang dipindahkan menjadi lebih banyak dan membuat energi yang dihasilkan *photovoltaic* pada kondisi cuaca yang sama menjadi lebih besar. Pada penyusunan 4 modul dengan celah udara yang sama dengan 3 modul pada jarak 0,12m didapatkan peningkatan nilai performansi sebesar 2,28% tiap modul atau dalam sistem sebesar 240 Wh. Hal ini menunjukkan bahwa perubahan konfigurasi jumlah modul dapat mempengaruhi nilai performansi dikarenakan semakin panjang konfigurasi maka efek dari gaya buoyansi akan semakin besar. Serta perubahan jarak celah udara antara modul *photovoltaic* dengan atap bangunan dapat meningkat antara 3,3% sampai 3,8% untuk konfigurasi 3 sampai 5 modul dengan variasi jarak 0,06m sampai 0,2m. Dari gambar 4.12d.

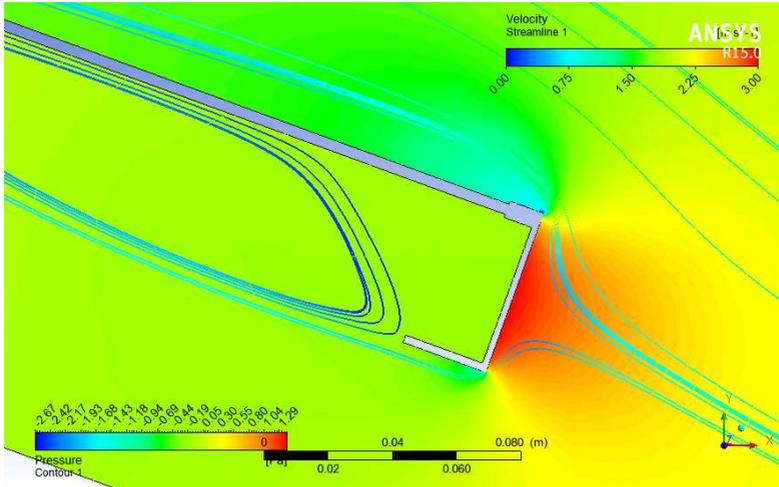
4.4 Analisis Pengaruh Kontur Tekanan Terhadap Kecepatan Udara Pada Bagian Bawah Modul

Dalam sub bab ini akan dibahas tentang pengaruh dari tekanan terhadap distribusi kecepatan pada bagian bawah modul *photovoltaic* pada konfigurasi 4 modul dengan jarak 0,12m. Analisis data dilakukan secara kualitatif dengan menggunakan visualisasi kontur tekanan dan vektor kecepatan untuk melihat efek perubahan tekanan pada masing masing bagian modul *photovoltaic*. Fenomena distribusi kecepatan dan tekanan dapat dilihat pada gambar 4.13 sampai dengan 4.15.

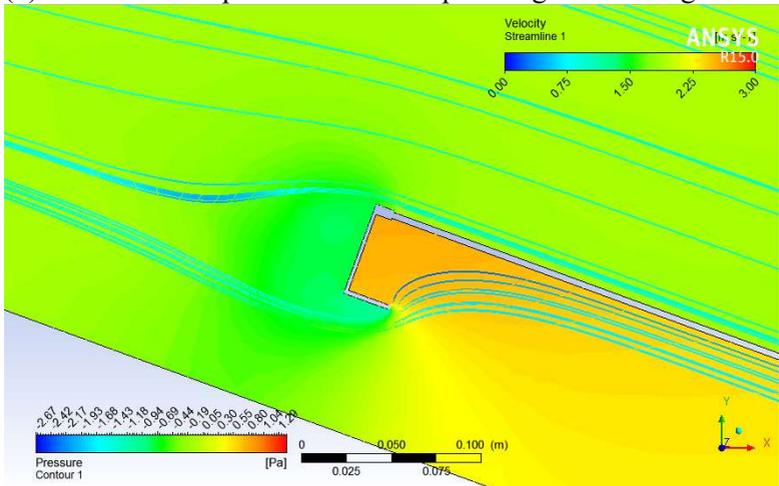


Gambar 4.13. Gambar distribusi kecepatan dan tekanan pada kombinasi 4 modul dengan jarak 0,12m

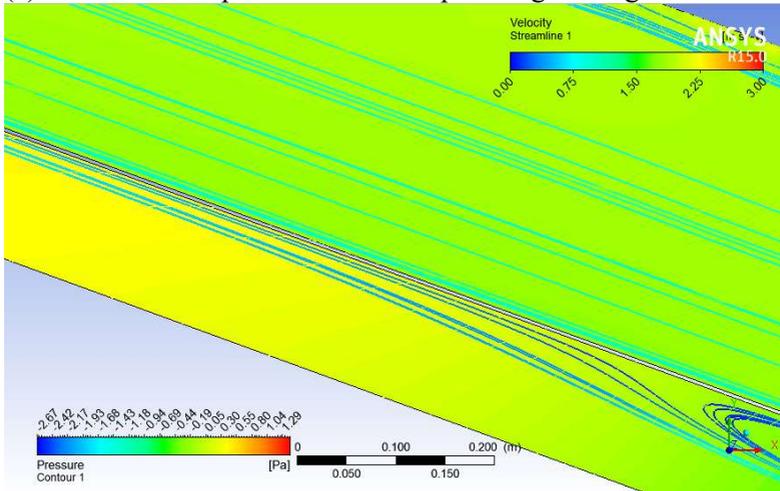
(a) Distribusi kecepatan dan tekanan pada bagian depan modul



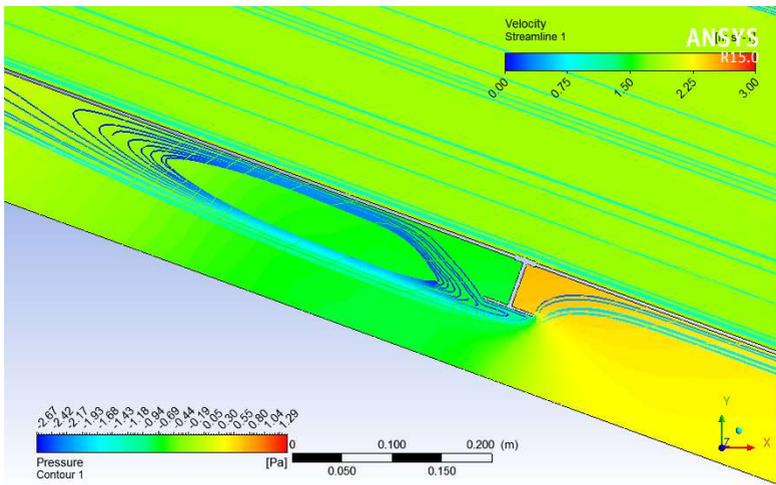
(b) Distribusi kecepatan dan tekanan pada bagian belakang modul



(c) Distribusi kecepatan dan tekanan pada bagian tengah modul



(d) Distribusi kecepatan dan tekanan pada sambungan antar modul



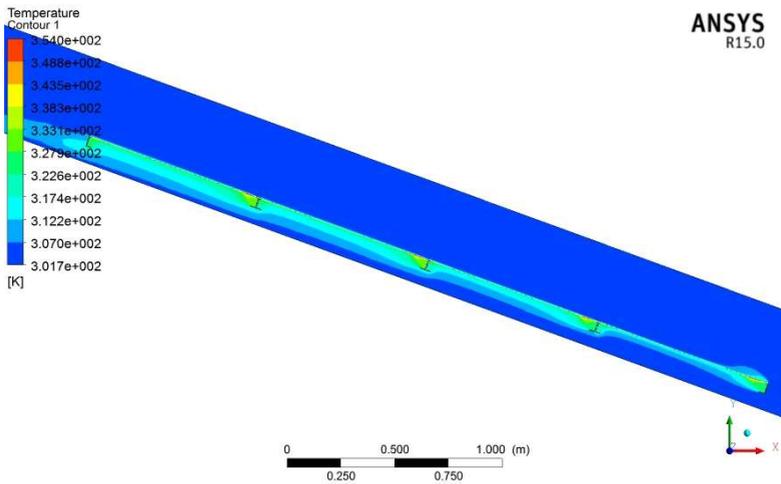
(d)

Gambar 4.14. Gambar distribusi kecepatan dan tekanan pada bagian (a) depan (b) belakang (c) tengah (d) sambungan antar PV

Dari gambar 4.14 diketahui bahwa terjadi penurunan tekanan pada bagian depan dari *array photovoltaic* hal ini dikarenakan pada bagian tersebut terjadi pembelokan aliran karena bentuk dari *frame* modul photovoltaic sehingga terjadi penurunan tekanan. Hal ini mengakibatkan kecepatan pada bagian tersebut memiliki nilai yang paling besar dikarenakan terjadi perbedaan tekanan pada bagian depan dan bagian atas depan modul. Pada lampiran D dapat dilihat bahwa kecepatan angin pada bagian tersebut memiliki nilai paling tinggi untuk semua variasi. Pada bagian antar sambungan terjadi perbedaan tekanan diantara sambungan PV sebelum dan sesudahnya sehingga kecepatan udara pada bagian tersebut memiliki nilai yang lebih tinggi dari daerah yang lain. Dari gambar 4.13 dapat disimpulkan bahwa tekanan pada bagian bawah modul berpusat pada sambungan antar *frame* dan tekanan tertinggi ada pada depan modul. Sedangkan untuk bagian depan *frame* pada sambungan memiliki kecepatan yang kecil dikarenakan terjadi turbulensi pada bagian tersebut.

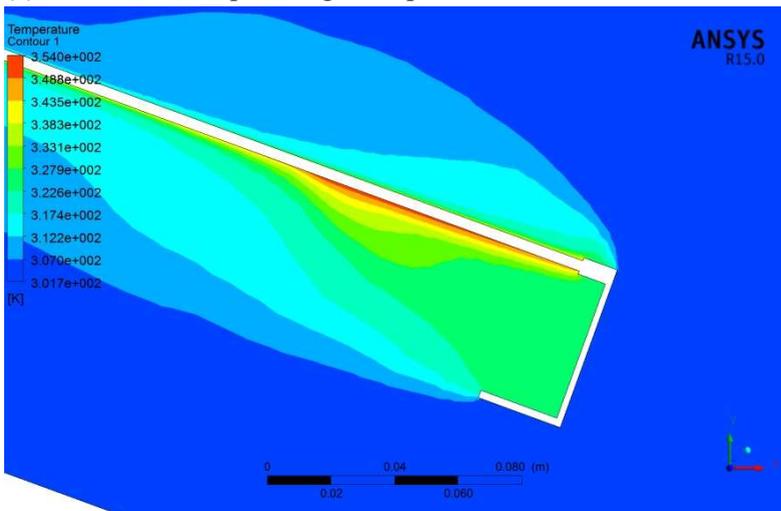
4.5. Analisis Pengaruh Distribusi Suhu Terhadap Performansi Photovoltaic

Dalam Sub bab ini akan dibahas tentang pengaruh dari distribusi suhu pada bagian *photovoltaic* pada pemasangan dengan jarak optimal yaitu 4 modul dan lebar celah udara 0,12m terhadap performansi dari *photovoltaic* (PV). Analisis data dilakukan secara kualitatif dan kuantitatif. Secara kualitatif data yang didapatkan meliputi visualisasi kontur kecepatan yang melewati bagian masing masing modul PV. Fenomena distribusi suhu secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 4.15

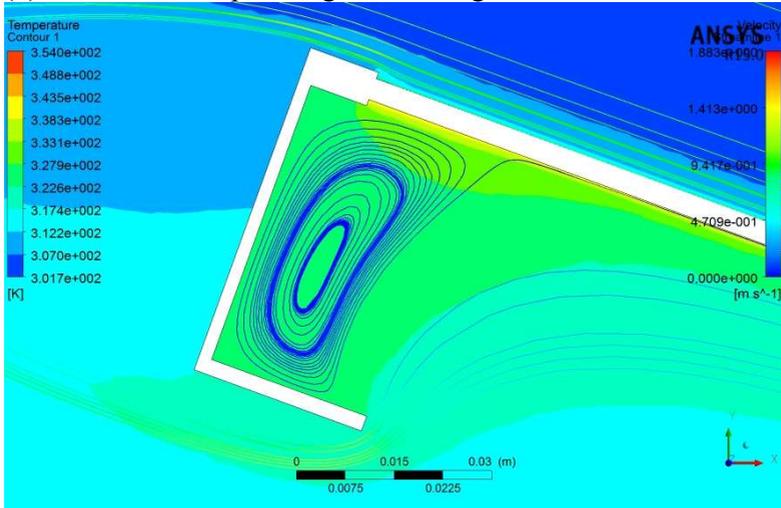


Gambar 4.15. Gambar distribusi suhu pada kombinasi 4 modul dengan jarak 0,12m

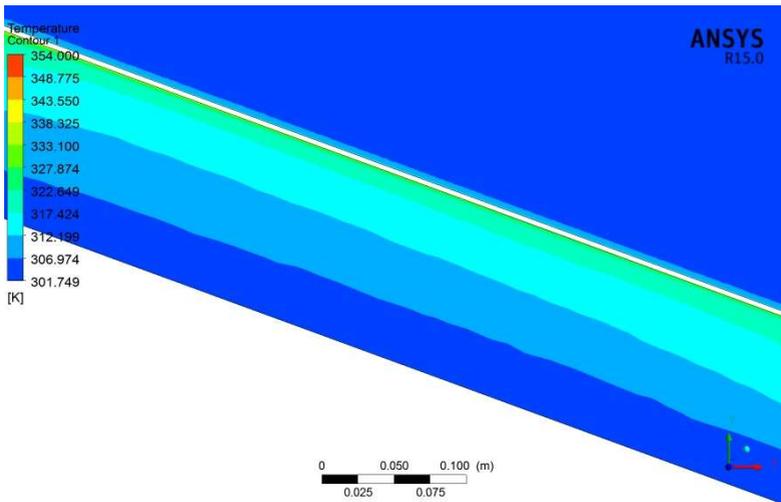
(a) Distribusi suhu pada bagian depan modul



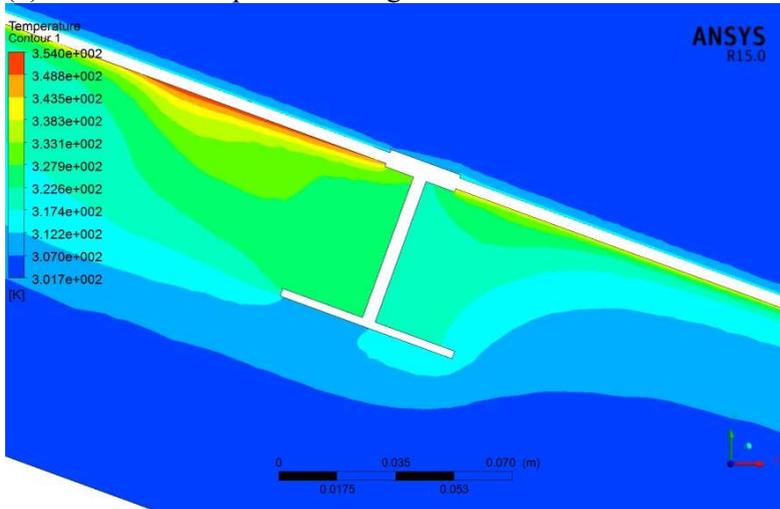
(b) Distribusi suhu pada bagian belakang modul



(c) Distribusi suhu pada bagian tengah modul



(d) Distribusi suhu pada sambungan antar modul

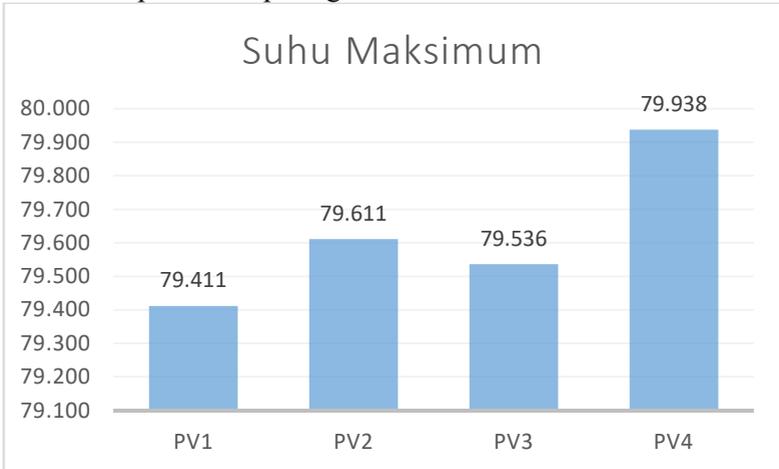


(d)

Gambar 4.16. Gambar distribusi suhu pada bagian (a) depan (b) belakang (c) tengah (d) sambungan antar PV

Pada gambar 4.16 distribusi suhu ditunjukkan dengan kontur warna merah yang menunjukkan suhu tertinggi sedangkan warna biru tua menunjukkan suhu terendah. Pada simulasi ini suhu inlet sebesar 301.9K. Saat suhu melewati bagian depan *photovoltaic* (PV) maka akan terjadi perpindahan panas antara modul *photovoltaic* dengan udara yang melaluinya sehingga bagian belakang *photovoltaic* yang lebih sedikit terkena aliran udara akan menjadi lebih panas dari bagian yang terkena udara hal ini dapat dilihat pada gambar 4.16a, dimana suhu pada bagian belakang *frame* berwarna merah hal ini terjadi karena udara yang melewati bagian depan PV akan mengalami turbulensi karena efek dari *frame* aluminium sehingga terjadi perubahan arah udara serta penurunan kecepatan udara sehingga panas yang dipindahkan menjadi lebih sedikit karena sedikitnya massa udara yang melewati pada bagian tersebut, fenomena ini terlihat pada bagian antara *frame* PV dengan PV dimana pada bagian tersebut suhu PV lebih

tinggi daripada bagian yang lainnya. Dari gambar 4.16 distribusi suhu *photovoltaic* terdapat suhu maksimum pada bagian belakang *frame* aluminium. Suhu maksimum untuk masing masing *photovoltaic* dapat dilihat pada gambar 4.17



Gambar 4.17. Grafik suhu maksimum pada jarak 0,12m dengan variasi susunan 4 modul

Gambar 4.17 didapatkan suhu maksimum pada masing masing *photovoltaic* suhu maksimum pada PV no 4 yaitu pada bagian belakang memiliki suhu yang lebih besar daripada pada PV bagian depan hal ini dikarenakan suhu udara yang melalui PV pada bagian belakang lebih besar karena membawa panas yang ada pada PV di depannya, hal ini dapat dilihat pada gambar 4.15 dimana distribusi kontur suhu warna biru tua semakin berkurang saat melalui PV dari depan ke belakang. Pengurangan ini terjadi karena suhu yang melalui *photovoltaic* semakin tinggi. Pada gambar 4.16d menunjukkan kontur distribusi suhu pada bagian belakang *photovoltaic* lebih kecil daripada bagian depan modul PV, hal ini terjadi karena aliran udara pada bagian belakang PV lebih besar sehingga energi panas yang ditransfer dari *photovoltaic* semakin banyak. Pada bagian tengah PV seperti gambar 4.16c distribusi

suhu lebih dingin hal ini terjadi karena kecepatan udara pada bagian bawah PV tidak terkena halangan dari *frame*.

Halaman ini memang dikosongkan

BAB V

PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi analisis data yang telah dilakukan, kesimpulan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- 1 Desain sistem bangunan terintegrasi *photovoltaic* pada wilayah di Surabaya dengan menggunakan modul *photovoltaic* sebesar 10,4kWp dengan kebutuhan pertahun 16MWh, pemasangan *photovoltaic* digunakan dengan cara menghadap keatas dan jarak antara atap ke *array* modul sebesar 0,12m variasi ini dapat meningkatkan performansi *photovoltaic* sebesar 3% dengan celah 0,06m.
- 2 Celah udara pada pemasangan *photovoltaic* pada atap bangunan perlu diperhatikan karena akan menghasilkan suhu yang berbeda pada *photovoltaic* dimana semakin besar jarak maka penurunan suhu akan semakin besar.
- 3 Jarak minimal yang diperlukan oleh *photovoltaic* agar performansinya bertambah sebesar 0,12m untuk variasi 4 modul dan 5 modul serta 0,14 m untuk variasi 3 modul.

5.2. Saran

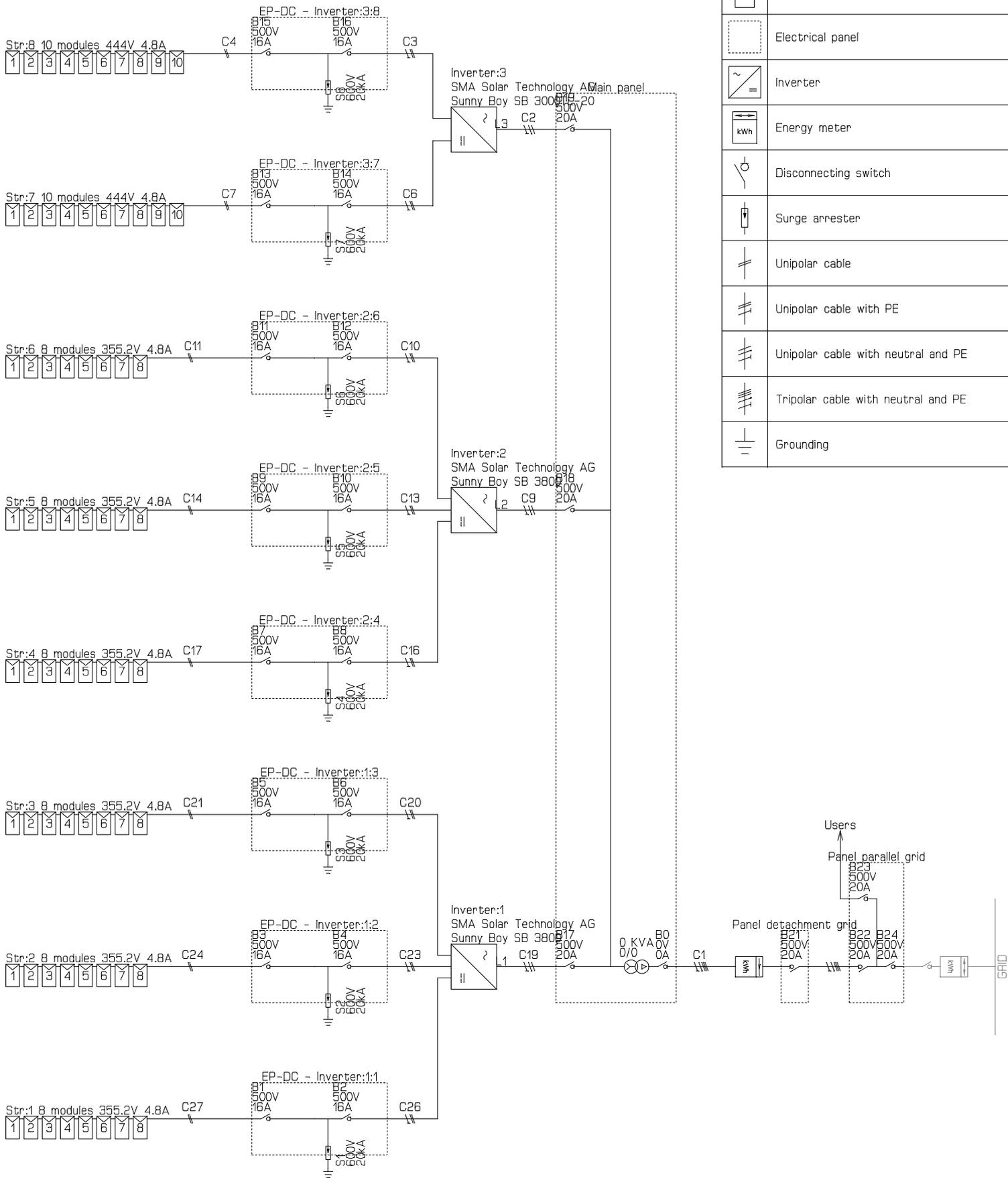
Disarankan untuk penelitian berikutnya guna memaksimalkan pemasangan pada bagian komponen yang lain serta pada pengaruh jarak antar modul *photovoltaic*.

Halaman ini memang dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Alsayid, B. A., Alsadi, S. Y., Jallad, J. S., & Dradi, M. H. (2013). Partial Shading of PV System Simulation with Experimental Results. *Scientific Reasearch*, 429-435.
- Chatzipanagi, A., Frontini, F., & Virtuani, A. (2016). BIPV-temp: A demonstrative Building Integrated Photovoltaic Installation. *Applied Energy* 173, 1-12.
- Duffie, J., & Beckman, W. (2006). *Solar Engineering of Thermal Processes*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Gatot. (2011). *Perancangan Sistem Hibrid PLTS dengan Jala-Jala*.
- Ghosh, S. K., Shawon, M. H., & Rahman, A. (2013). Modeling of PV Array and Analysis of Different Parameters. *In ternational Journal of Advancements in Research & Technology*, 358 -363.
- Hirunlabh, J., Wachirapuwadon, S., Pratinthong, N., & Khedari, J. (2001). New configuration of a roof solar collector maximizing natural ventilation. *Building and Environment* 36, 383-391.
- Ireland, S. E. (n.d.). *Best Practica Guide Photovoltaics*. Ireland: SEAI.
- Khedari, J., Hirunlabh, J., & Bunnag, T. (1997). Experimental study of a roof solar collector towards the natural ventilation of new habitations. *Energy and Building* 26, 159-164.
- Khedari, J., Mansirisub, W., Chaima, S., Pratinthong, N., & Hirunlabh, J. (2000). Field measurement of performance of roof solar collector. *Energy and Buildings* 31, 171-178.
- Kurtz, S., Whitfield, K., Tamizhmani, G., & et al. (2011). Evaluation of high-temperature exposure of photovoltaic modules. *Prog. Photovoltaic. Res Appl*, 954-965.

- Nguyen, X. H. (2015). Matlab/Simulink Based Modeling to Study Effect of Partial Shadow on Solar Photovoltaic Array. *Environmental System Research*, 4:20.
- Preetham Goli, W. S. (2015). Control and Management of PV Integrated Charging Facilities for PEVs. *Springer*, 23-52.
- Rajitha Reddy, A. V. (2015). Design and Implementation of Maximum Power Point Tracking Using Fuzzy Logic Controller for Photovoltaic for Cloudy Weather Conditions. *IJRREEE*, II(2), 130 - 135.
- Setiawan. (2014). Analisis Unjuk Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (Plts) Satu MWP Terinterkoneksi Jaringan di Kayubih. *Bangli*.
- Sunaryo. (2014). *Analisis Daya Listrik yang Dihasilkan Panel Surya Ukuran 216 cm x 121 cm Berdasarkan Intensitas Cahaya*. Riau: Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Riau.
- Upadhyay, P., Kumar, V., & Vairagi, B. D. (2014). Fuzzy Logic Based Maximum Power Point Tracking System for Solar Energy Conversion System. *IJERT*, III(7), 1436 -1441.
- Wulandari, T. (2010). *Rancang Bangun Sistem Penggerak Pintu*. Surabaya: Jurusan Teknik Elektro Industri PPNS.
- maps.google.co.id(diakses tgl 20 Desember 2016)



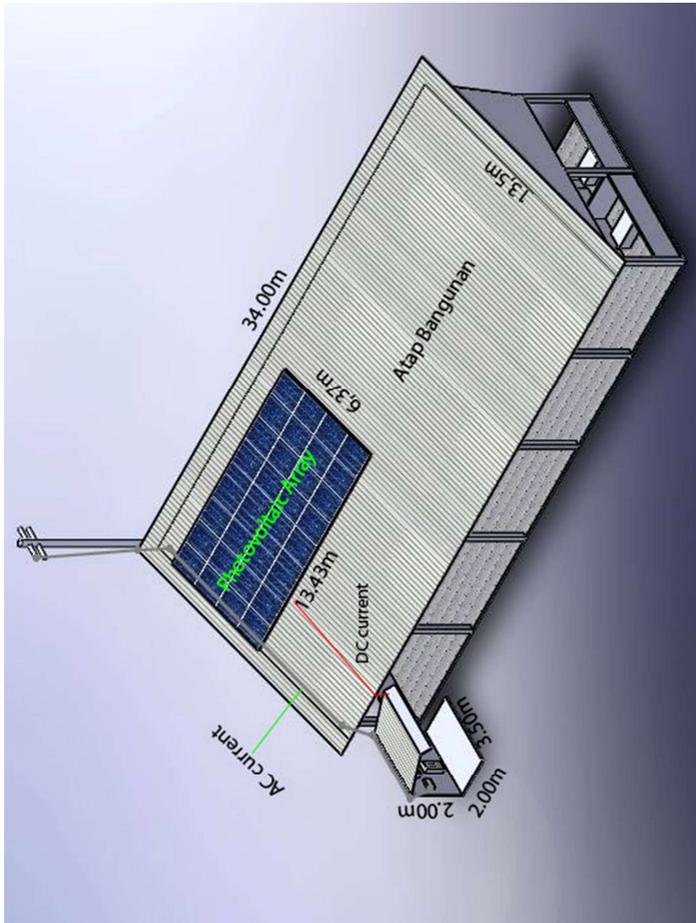
Legend symbols	
	PV Module
	Electrical panel
	Inverter
	Energy meter
	Disconnecting switch
	Surge arrester
	Unipolar cable
	Unipolar cable with PE
	Unipolar cable with neutral and PE
	Tripolar cable with neutral and PE
	Grounding

LAMPIRAN A DESAIN KONFIGURASI ARRAY DAN KOMPONEN SYSTEM

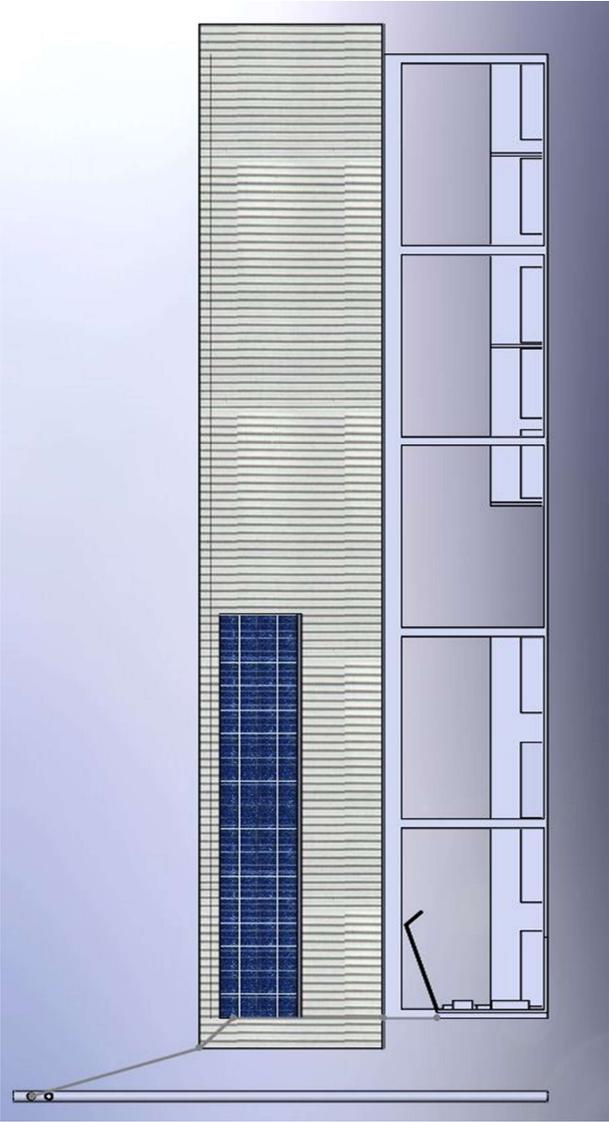
Electrical single line scheme		
System Food Court Surabaya		Project Code FOOD COURT
Customer		
Designer		
Phone: e-mail:		
Nominal power 10.5 KW	Composition 3 Inverter 8 strings 68 modules	Date 04/01/2017

LAMPIRAN B

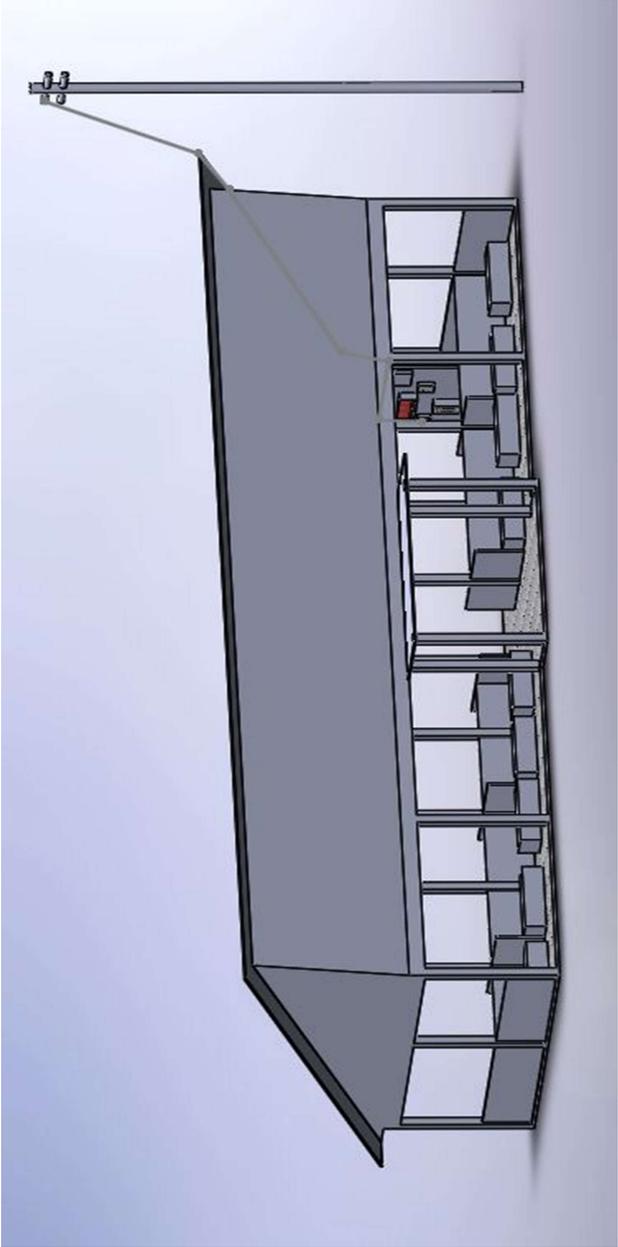
DESAIN *BUILDING INTEGRATED PHOTOVOLTAIC*



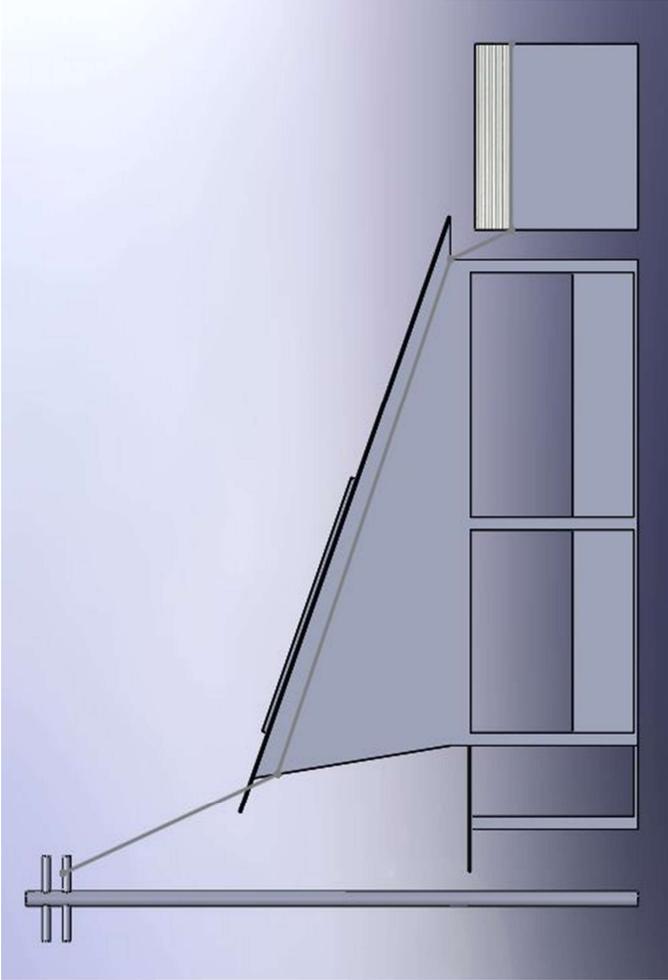
Gambar 1. Desain bangunan tampak atas



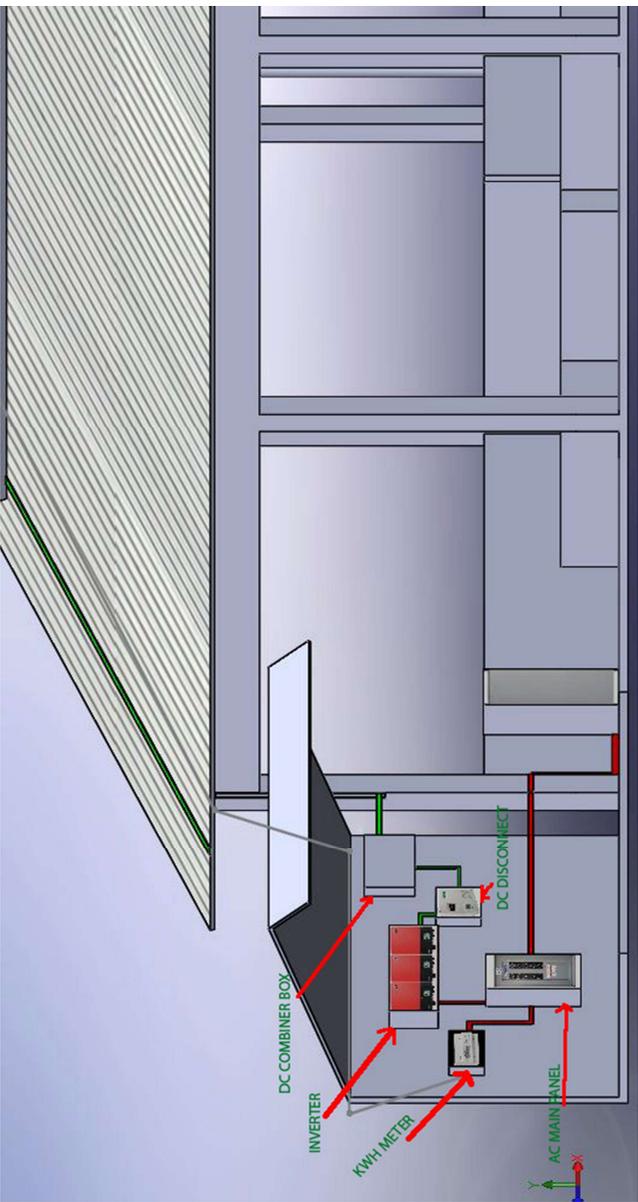
Gambar 1. Desain bangunan tampak atas



Gambar 2. Desain bangunan tampak depan



Gambar 3. Desain bangunan tampak samping



Gambar 4. Desain bangunan tampak samping(ruang *control*)

LAMPIRAN C

DATASHEET KOMPONEN SISTEM YANG DIGUNAKAN

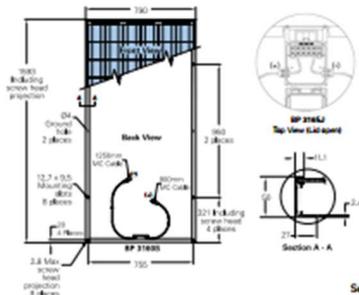
Technical data	Sunny Boy 3000TL	Sunny Boy 4000TL	Sunny Boy 4000TL/V	Sunny Boy 5000TL
Input (DC)				
Max. DC power (@ cos φ =1)	3200 W	4200 W	4200 W	5300 W
Max. DC voltage	550 V	550 V	550 V	550 V
MPP voltage range	188 V - 440 V	175 V - 440 V	175 V - 440 V	175 V - 440 V
DC nominal voltage	400 V	400 V	400 V	400 V
Min. DC voltage / start voltage	125 V / 150 V			
Max. input current / per string	17 A / 17 A	2 x 15 A / 15 A	2 x 15 A / 15 A	2 x 15 A / 15 A
Number of MPP trackers / strings per MPP tracker	1 / 2	2 / A: 2, B: 2	2 / A: 2, B: 2	2 / A: 2, B: 2
Output (AC)				
AC nominal power (@ 230 V, 50 Hz)	3000 W	4000 W	3680 W	4600 W
Max. AC apparent power	3000 VA	4000 VA	4000 VA	5000 VA
Nominal AC voltage, range	220, 230, 240 V; 180 - 280 V			
AC grid frequency, range	50, 60 Hz; ± 5 Hz			
Max. output current	16 A	22 A	22 A	22 A
Power factor (cos φ)	1	1	1	1
Phase conductors / connection phases	1 / 1	1 / 1	1 / 1	1 / 1
Efficiency				
Max. efficiency / Euro-eta	97.0 % / 96.3 %	97.0 % / 96.4 %	97.0 % / 96.4 %	97.0 % / 96.5 %
Protection devices				
DC reverse-polarity protection	●	●	●	●
ESS switch-disconnector	●	●	●	●
AC short circuit protection	●	●	●	●
Ground fault monitoring	●	●	●	●
Grid monitoring (SMA Grid Guard)	●	●	●	●
Galvanically isolated / all-pole sensitive fault current monitoring unit	-/●	-/●	-/●	-/●
Protection class / overvoltage category	I / III	I / III	I / III	I / III
General data				
Dimensions [W / H / D] in mm	470 / 445 / 180	470 / 445 / 180	470 / 445 / 180	470 / 445 / 180
Weight	22 kg	25 kg	25 kg	25 kg
Operating temperature range	-25 °C ... +60 °C			
Noise emission (typical)	≤ 25 dB(A)	≤ 29 dB(A)	≤ 29 dB(A)	≤ 29 dB(A)
Internal consumption (night)	< 0.5 W	< 0.5 W	< 0.5 W	< 0.5 W
Topology	transformerless	transformerless	transformerless	transformerless
Cooling concept	Convection	OptiCool	OptiCool	OptiCool
Electronics protection rating / connection area (as per IEC 60529)	IP65 / IP54	IP65 / IP54	IP65 / IP54	IP65 / IP54
Climatic category [per IEC 60721-3-4]	4K4H	4K4H	4K4H	4K4H

Datasheet inverter sunny boy 3000TL(www.sma.de)

Technical data	Sunny Boy 3300	Sunny Boy 3800	Sunny Boy 3800/V
Input (DC)			
Max. DC power (@ $\cos \varphi = 1$)	3820 W	4040 W	3900 W
Max. DC voltage	500 V	500 V	500 V
MPP voltage range	200 V - 400 V	200 V - 400 V	200 V - 400 V
DC nominal voltage	200 V	200 V	200 V
Min. DC voltage / start voltage	200 V / 250 V	200 V / 250 V	200 V / 250 V
Max. input current / per string	20 A / 16 A	20 A / 16 A	20 A / 16 A
Number of MPP trackers / strings per MPP tracker	1 / 3	1 / 3	1 / 3
Output (AC)			
AC nominal power (@ 230 V, 50 Hz)	3300 W	3800 W	3680 W
Max. AC apparent power	3600 VA	3800 VA	3680 VA
Nominal AC voltage; range	220, 230, 240 V; 180 V - 265 V	220, 230, 240 V; 180 V - 265 V	220, 230, 240 V; 180 V - 265 V
AC grid frequency; range	50, 60 Hz; ± 4.5 Hz	50, 60 Hz; ± 4.5 Hz	50, 60 Hz; ± 4.5 Hz
Max. output current	18 A	18 A	16 A
Power factor ($\cos \varphi$)	1	1	1
Phase conductors / connection phases	1 / 1	1 / 1	1 / 1
Efficiency			
Max. efficiency / Euro-eta	95.2 % / 94.4 %	95.6 % / 94.7 %	95.6 % / 94.7 %
Protection devices			
DC reverse-polarity protection	●	●	●
ESS switch-disconnector	●	●	●
AC short circuit protection	●	●	●
Ground fault monitoring	●	●	●
Grid monitoring (SMA Grid Guard)	●	●	●
Galvanically isolated / all-pole sensitive fault current monitoring unit	●/-	●/-	●/-
Protection class / overvoltage category	I / III	I / III	I / III
General data			
Dimensions (W / H / D) in mm	450 / 352 / 236	450 / 352 / 236	450 / 352 / 236
Weight	38 kg	38 kg	38 kg
Operating temperature range	-25 °C ... +60 °C	-25 °C ... +60 °C	-25 °C ... +60 °C
Noise emission (typical)	≤ 40 dB(A)	≤ 42 dB(A)	≤ 42 dB(A)
Internal consumption (night)	< 0.1 W	< 0.1 W	< 0.1 W
Topology	LF transformer	LF transformer	LF transformer
Cooling concept	OptiCool	OptiCool	OptiCool
Electronics protection rating / connection area (as per IEC 60529)	IP65 / IP65	IP65 / IP65	IP65 / IP65
Climatic category (per IEC 60721-3-4)	4K4H	4K4H	4K4H

Datasheet inverter Sunny Boy 3800(www.sma.de)

Module Diagram



Self-tapping grounding screw, instruction sheet and warranty document included with each module.

Typical Electrical Characteristics

	BP 3165	BP 3155*
Rated Power (P_{max}) ¹	165W	155W
Warranted minimum power	160W	150.4W
Voltage at P_{max} (V_{mp})	35.2V	34.9V
Current at P_{max} (I_{mp})	4.7A	4.5A
Short circuit current (I_{sc})	5.1A	4.8A
Open circuit voltage (V_{oc})	44.2V	43.9V
Temperature coefficient of I_{sc}	(0.065±0.015)%/°C	
Temperature coefficient of V_{oc}	-1.60±0.20(mV)/°C	
Temperature coefficient of P_{max}	-0.5±0.05)%/°C	
NOCT ²	47±2°C	
Maximum series fuse rating	15A (BP 3165S) / 20A (BP 3165J)	
Maximum system voltage	600V (IEC 61215 rating) 1000V (TUV Rheinland rating)	

Mechanical Characteristics

	BP 3165S / BP 3165J ⁴
Dimensions (mm) (Mount tolerance ±0.5mm)	1593 x 790 x 50
Weight (kg)	15.4
Frame	Clear anodised aluminium alloy type 6063T6. Colour: silver.
Solar cells	72 cells (125mm x 125mm) configured geometrically for a 12 x 6 matrix connected in series.
Output cables (BP 3165S)	RHVV AUV# 12 (4mm ²) cable with polarised weatherproof DC rated Multicontact (MC) connectors; asymmetrical lengths 1250 (-) and 800mm (+).
Junction box (BP 3165J)	IP65 junction box with 4 terminal screw connection block, accepts PG 13.5, M20, 13mm conduit, or cable fittings accepting 6–12mm diameter cable. Terminals accept 2.5–10mm ² (8 to 14 AUV) wire.
Diodes	Three 5A, 45V Schottky by-pass diodes included.
Construction	Front: High transmission 3mm tempered glass Rear: White polyester; Encapsulant: EVA.

- Standard test conditions (STC), irradiance of 1000W/m² at an AM1.5G solar spectrum and a cell temperature of 25°C.
- Normal Operating Cell Temperature (NOCT), air temperature of 20°C, irradiance 800W/m², wind speed 1m/s.
- Power of solar cells varies in the normal course of production; the BP 3155 is assembled using cells of slightly lower power than the BP 3165.
- The mechanical characteristics of the BP 3155 and BP 3165 are identical.

This publication summarises product variability and specifications which are subject to change without notice.
Printed on recyclable paper stock.

Your BP Solar Distributor:



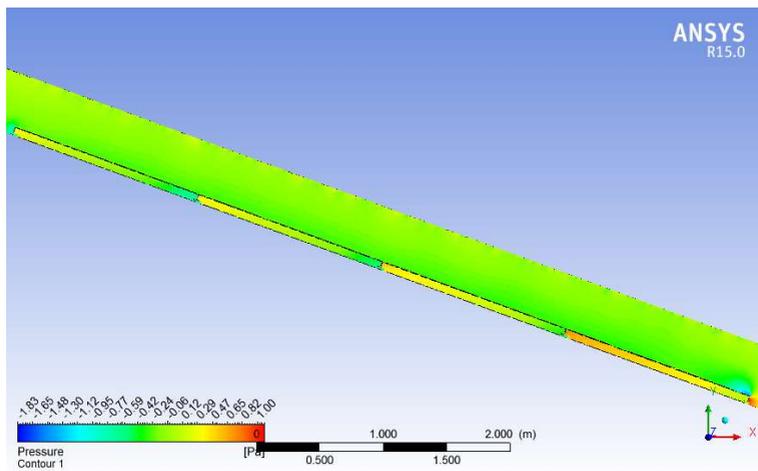
www.bpsolar.com.au
BP3165-A 1/2008

©BP Solar Pty Ltd 2008

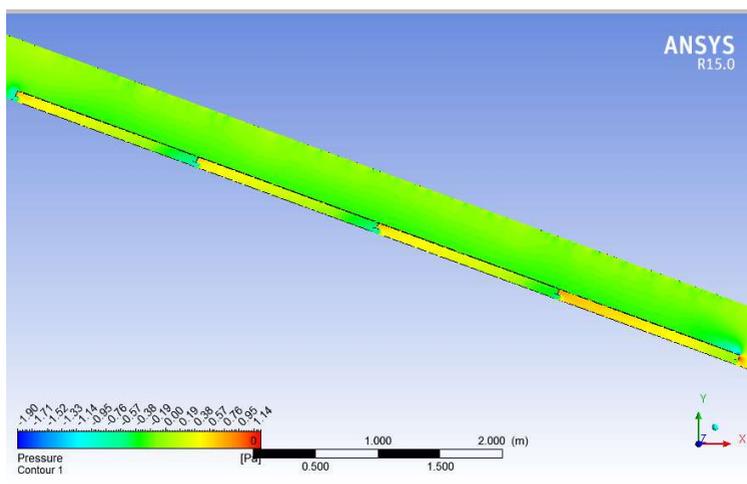
Datasheet *Photovoltaic* panel BP155(www.bpsolar.com)

LAMPIRAN D

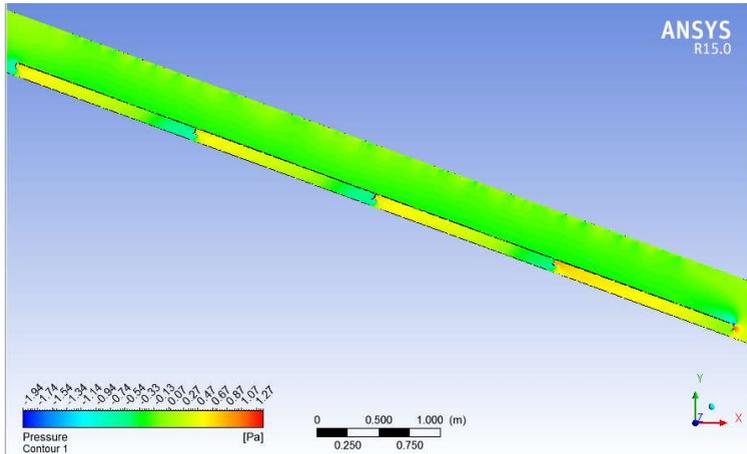
Lampiran D.1 Gambar kontur tekanan pada variasi jarak celah udara



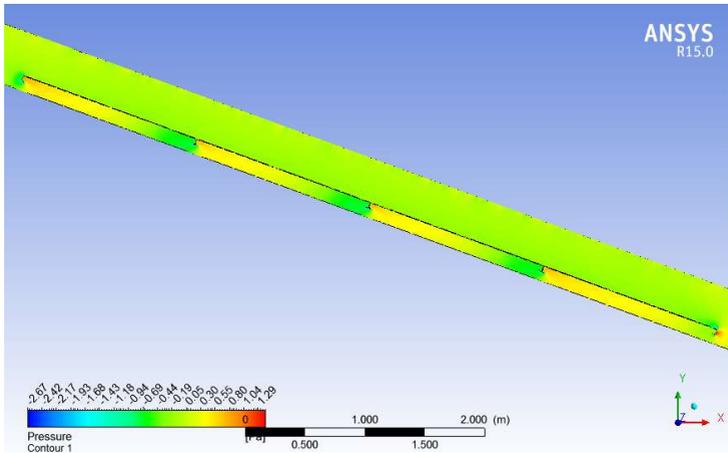
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,06m



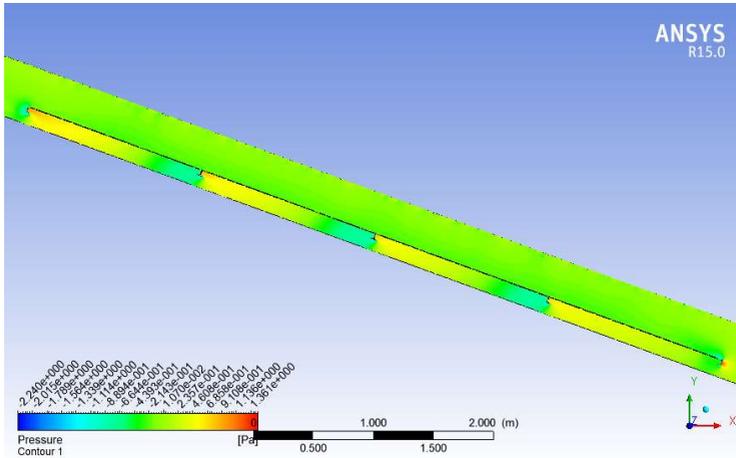
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,08m



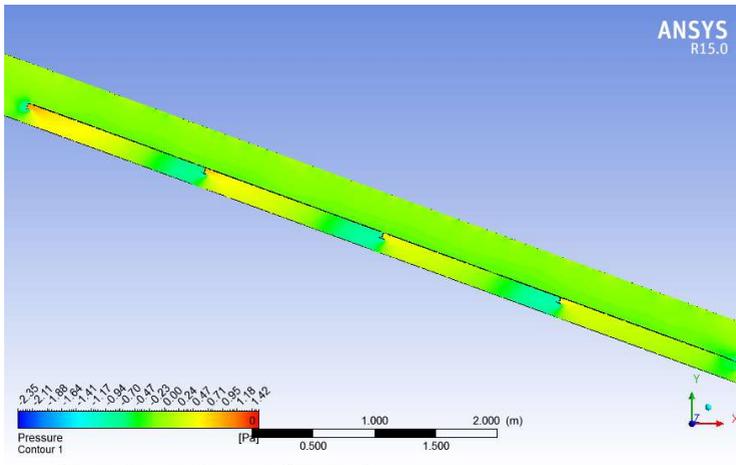
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,1m



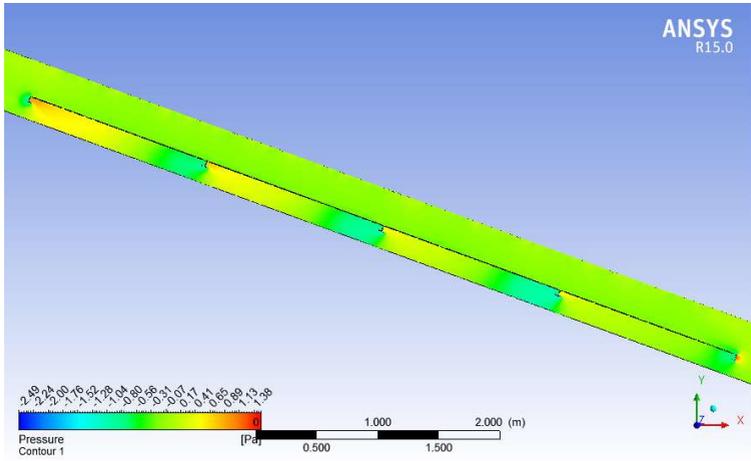
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,12m



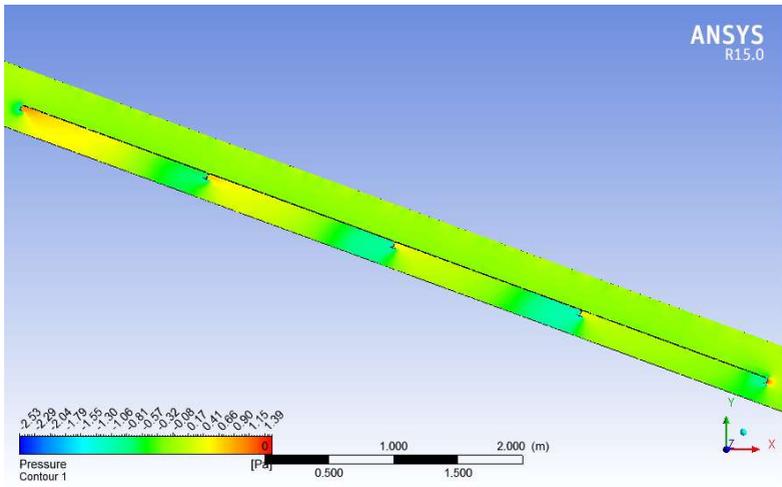
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,14m



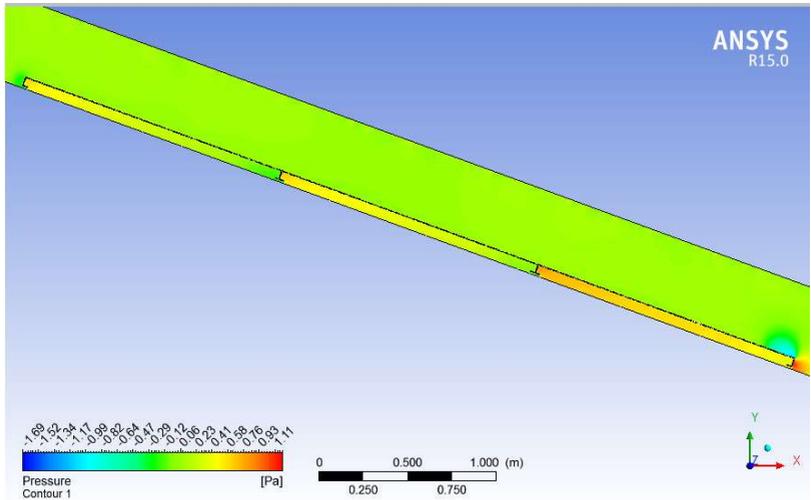
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,16m



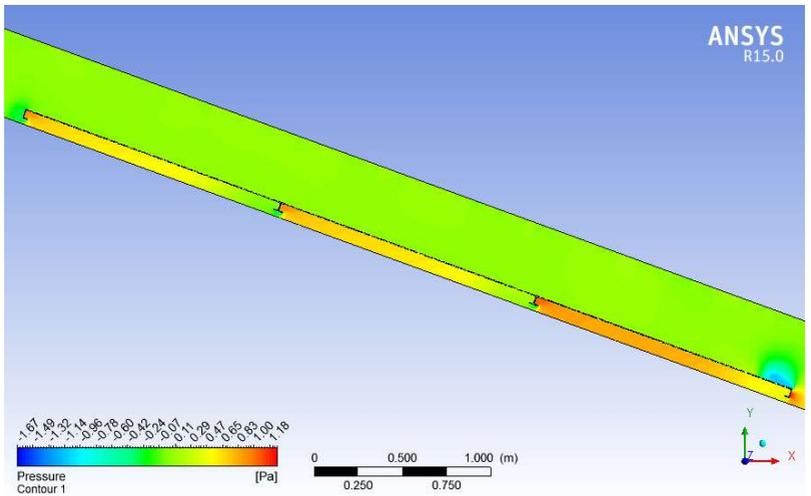
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,18m



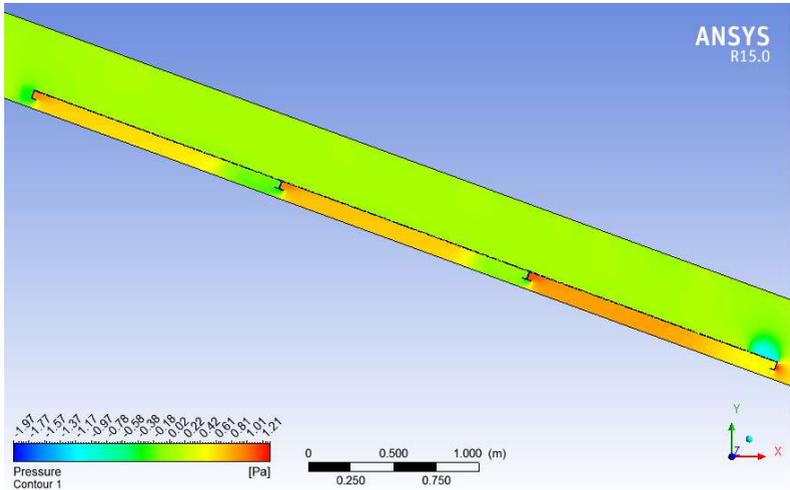
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,2m



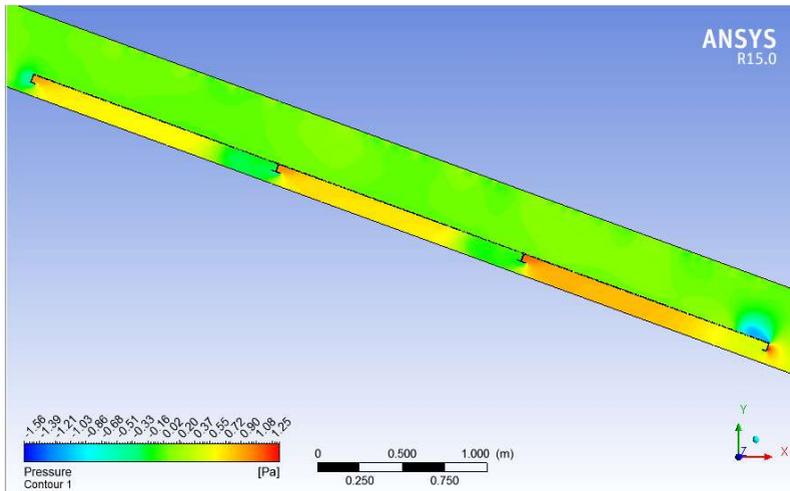
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,06m



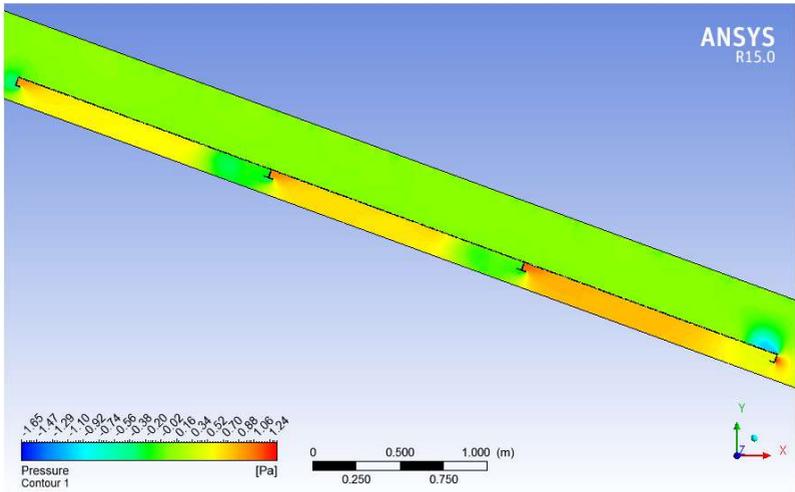
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,08m



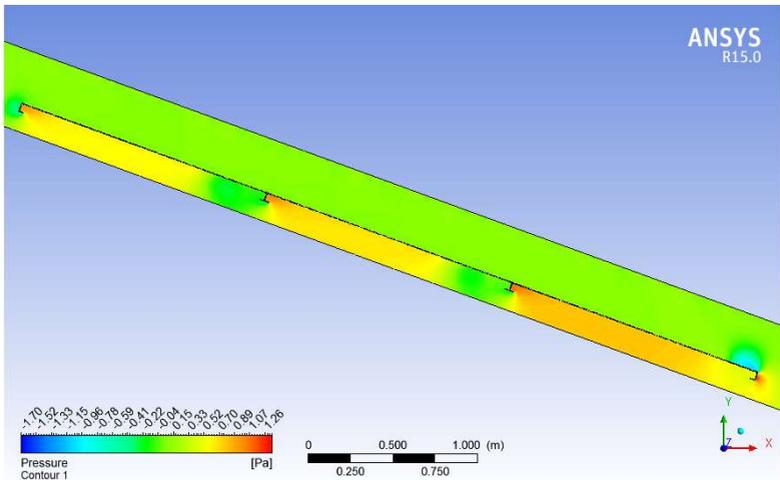
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,1m



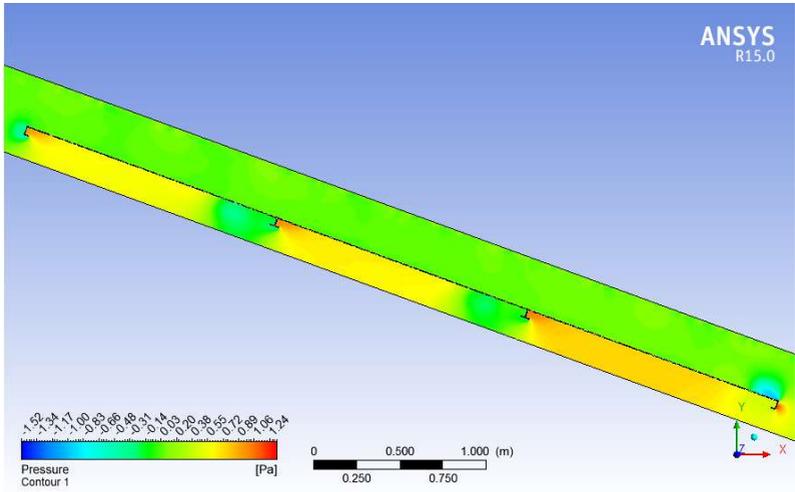
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,12m



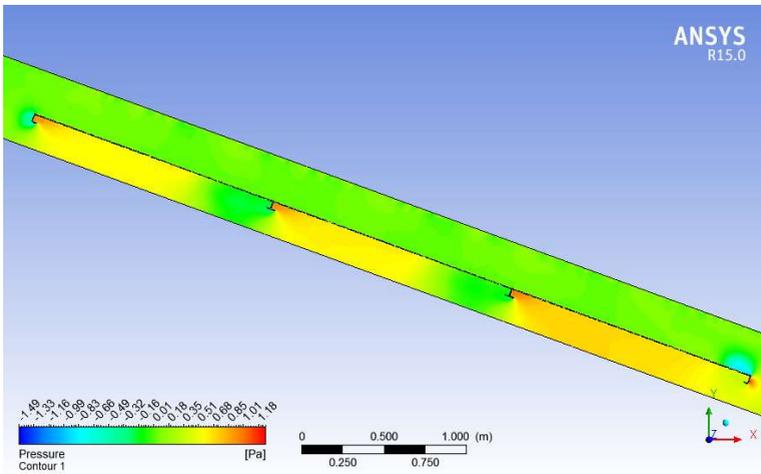
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,14m



Kombinasi 3 modul dan jarak 0,16m

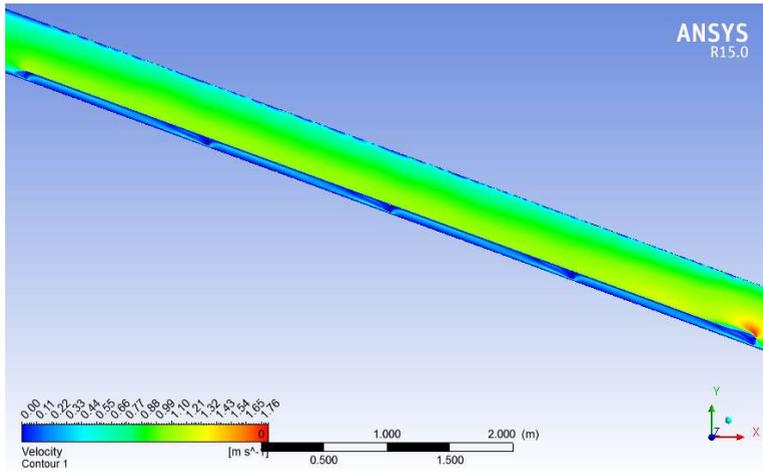


Kombinasi 3 modul dan jarak 0,18m

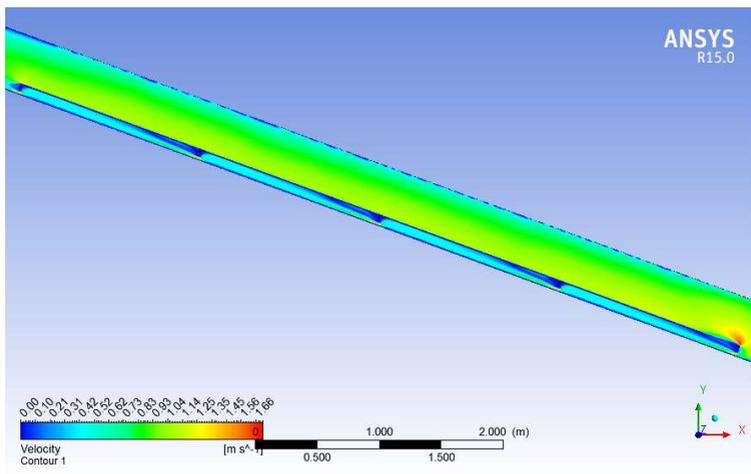


Kombinasi 3 modul dan jarak 0,2m

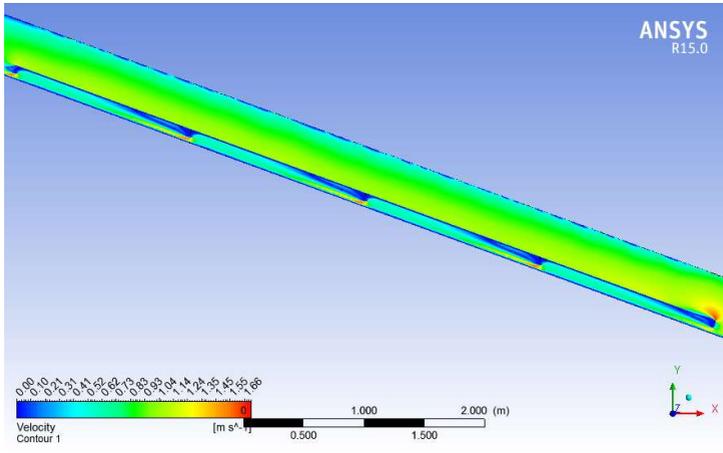
Lampiran D.2 Gambar kontur kecepatan pada variasi jarak celah udara



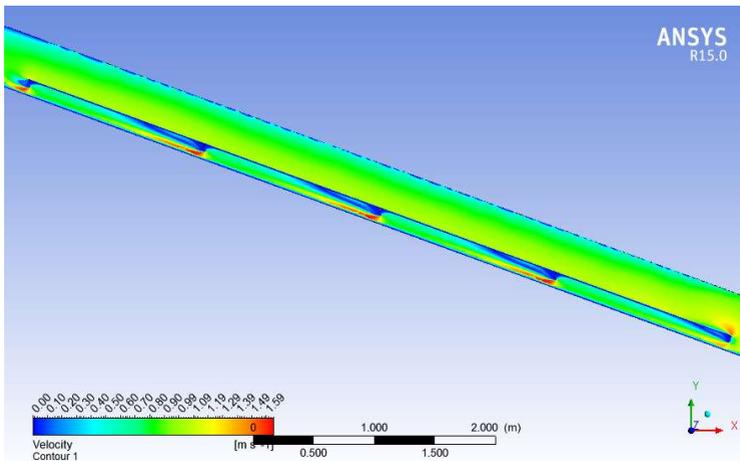
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,06m



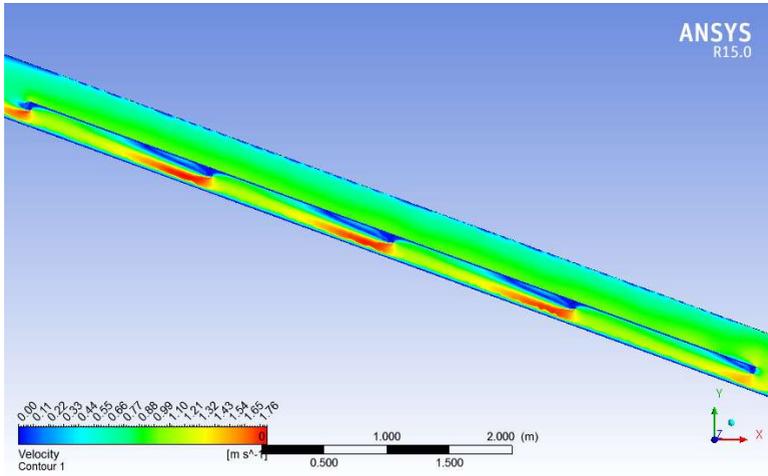
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,08m



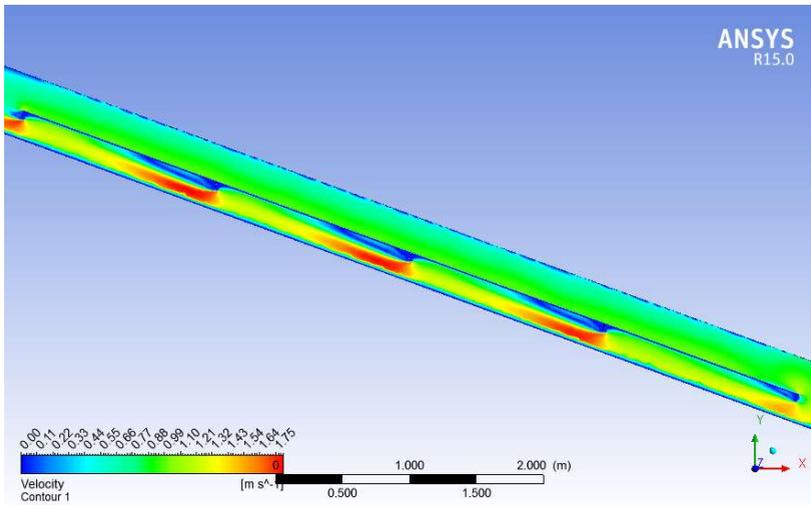
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,1m



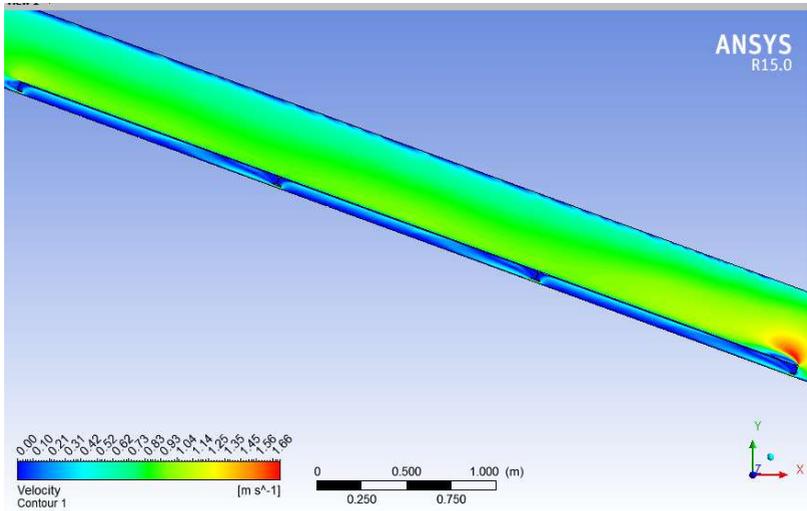
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,12m



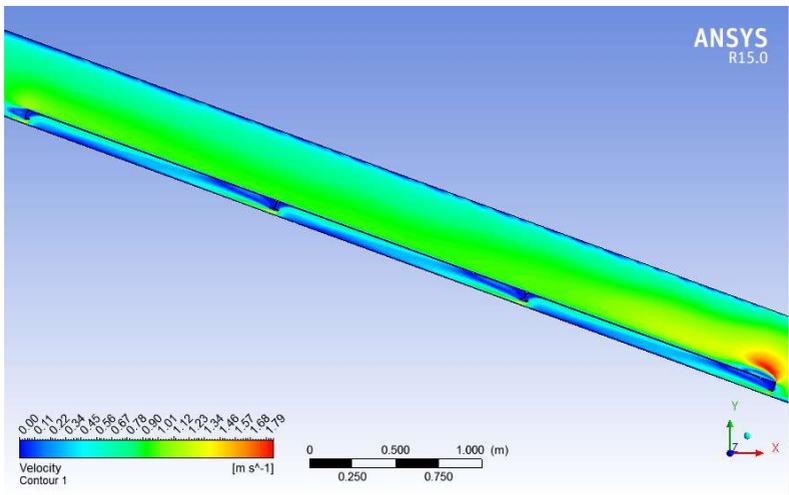
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,18m



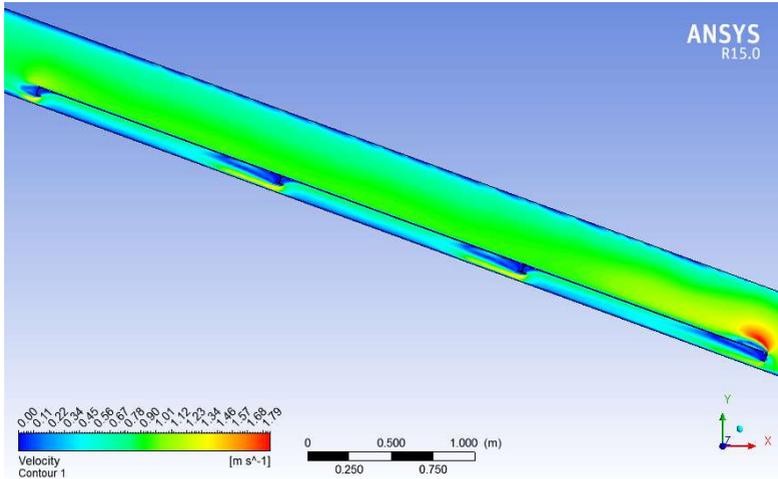
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,2m



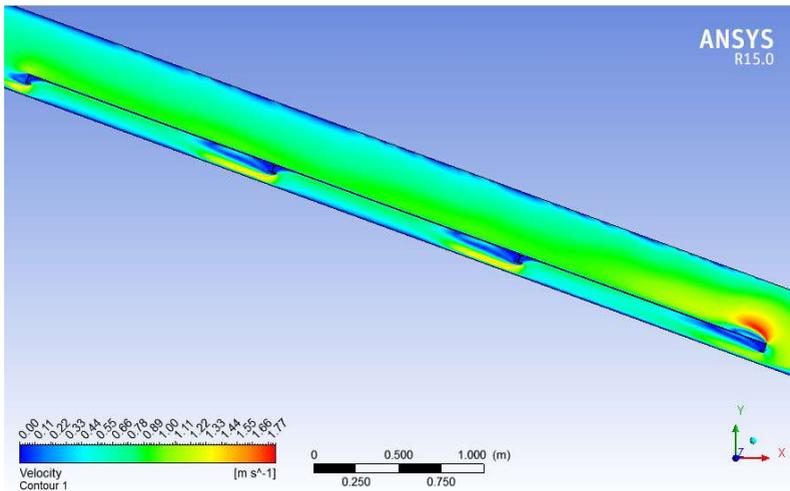
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,06m



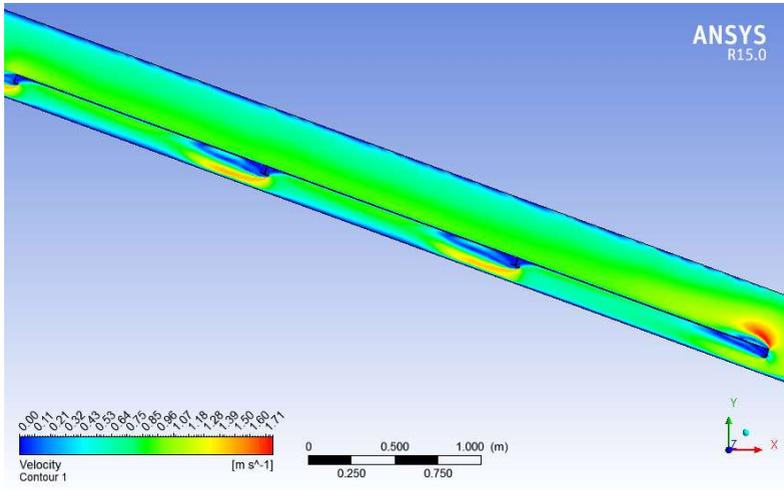
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,08m



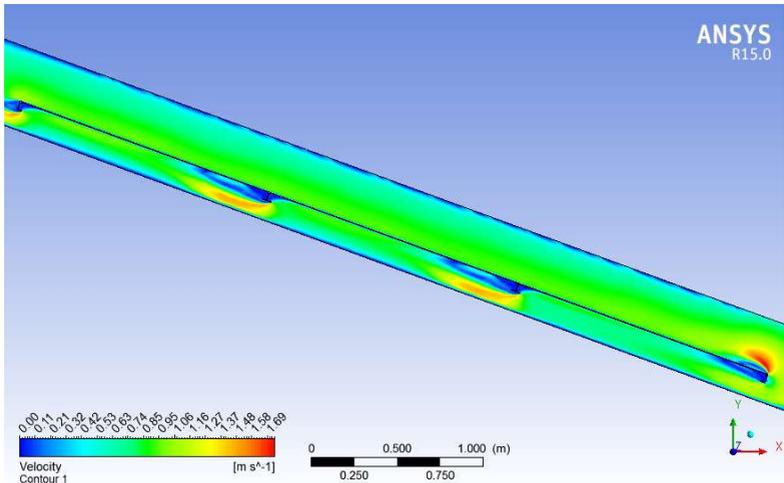
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,1m



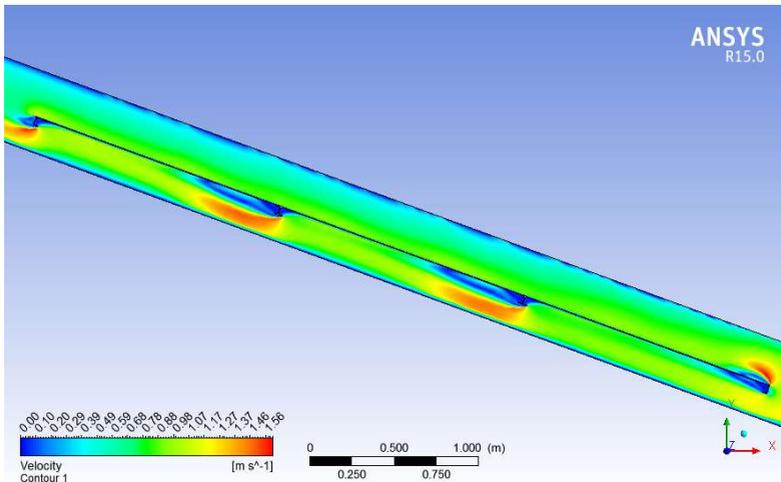
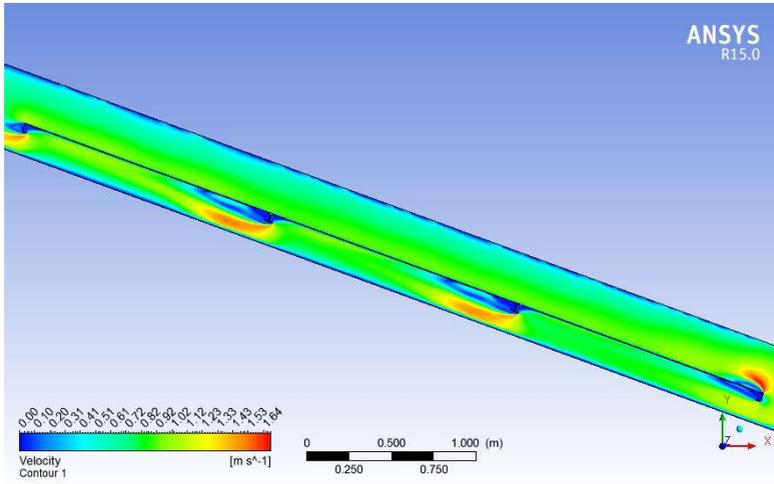
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,12m



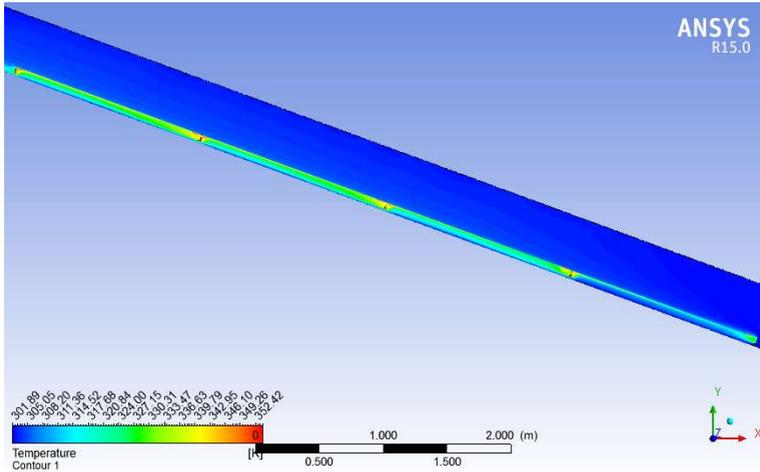
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,14m



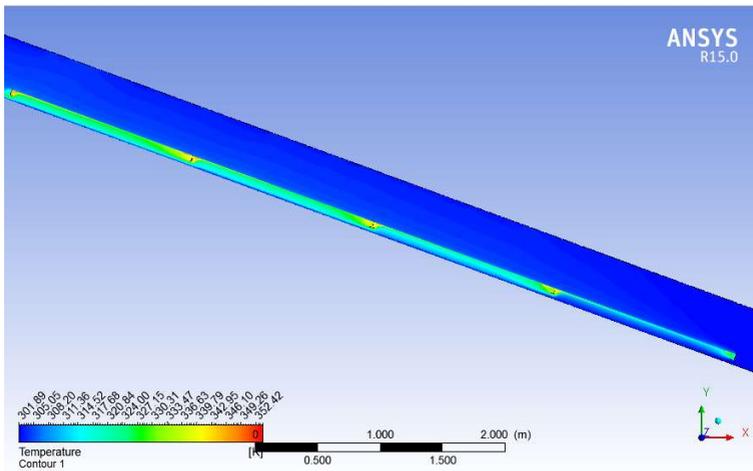
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,16m



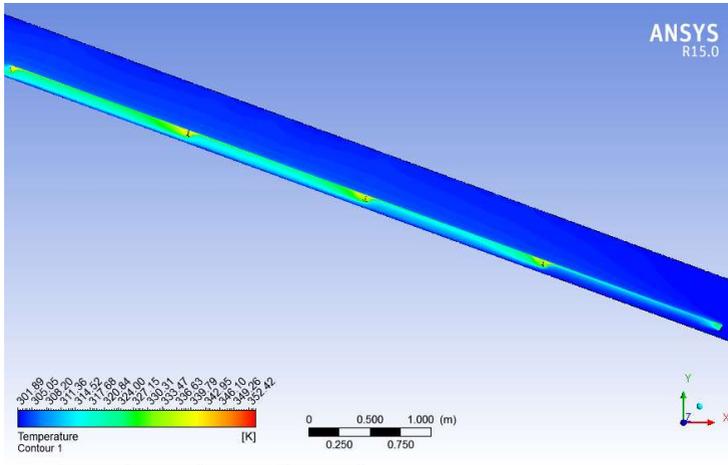
Lampiran D.3 Gambar kontur suhu pada variasi jarak celah udara



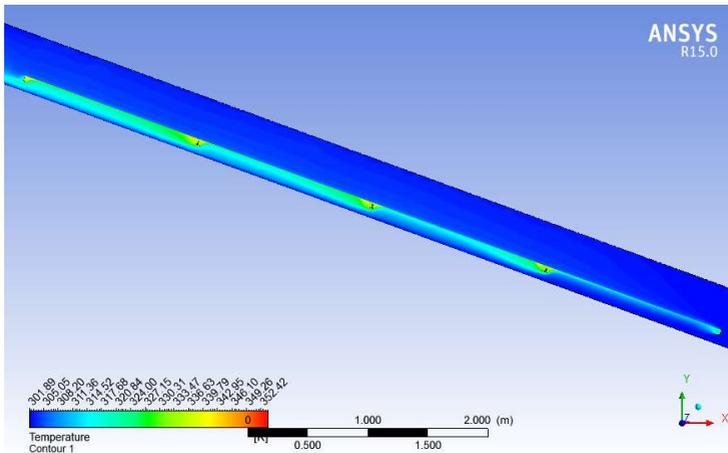
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,06m



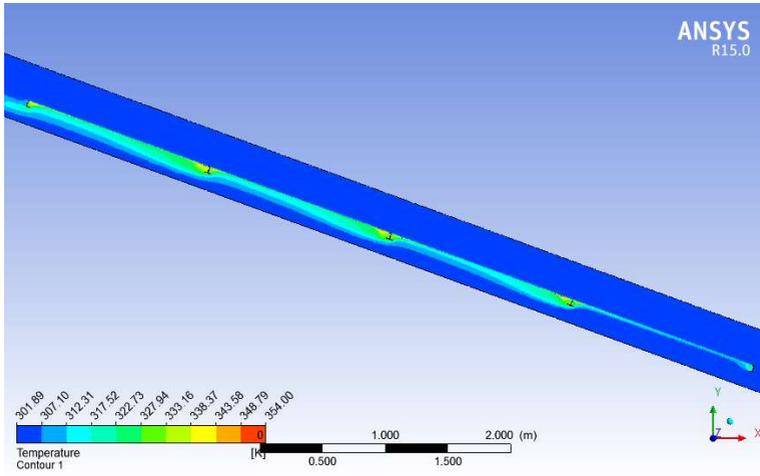
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,08m



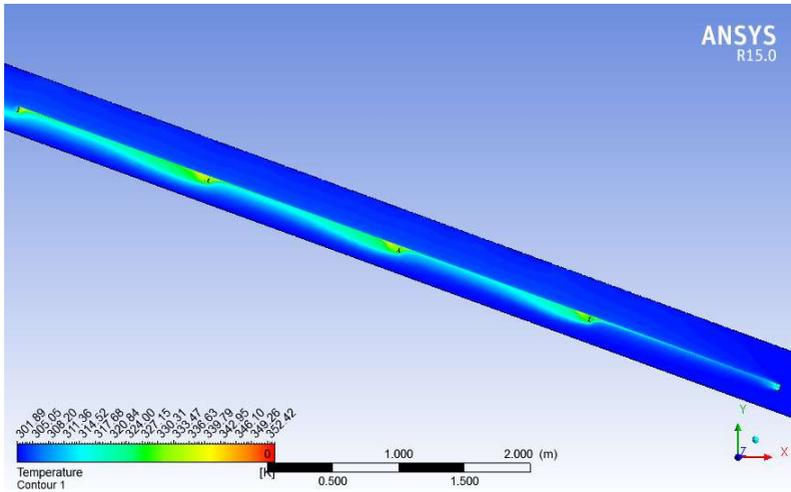
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,1m



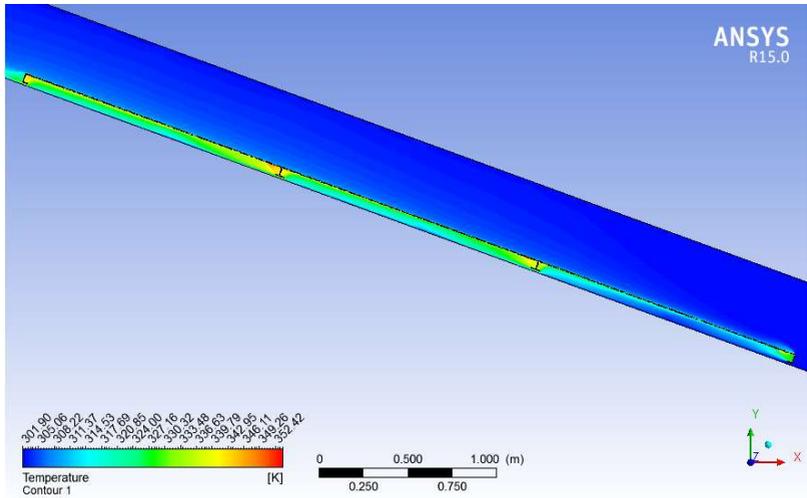
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,12m



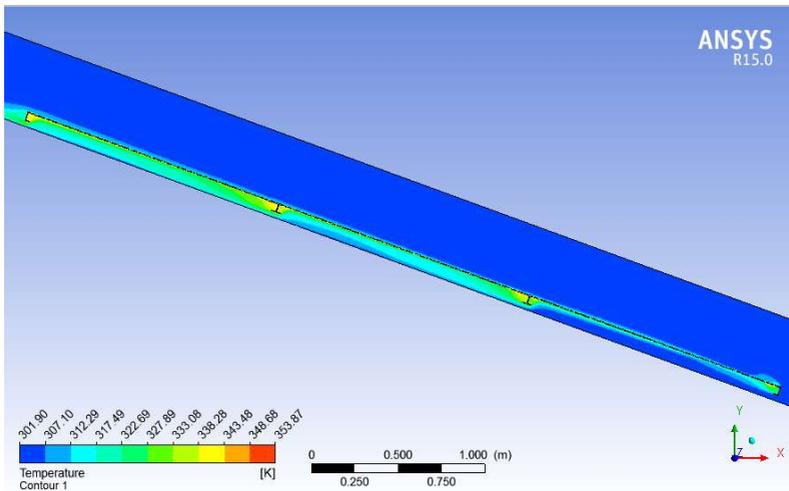
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,18m



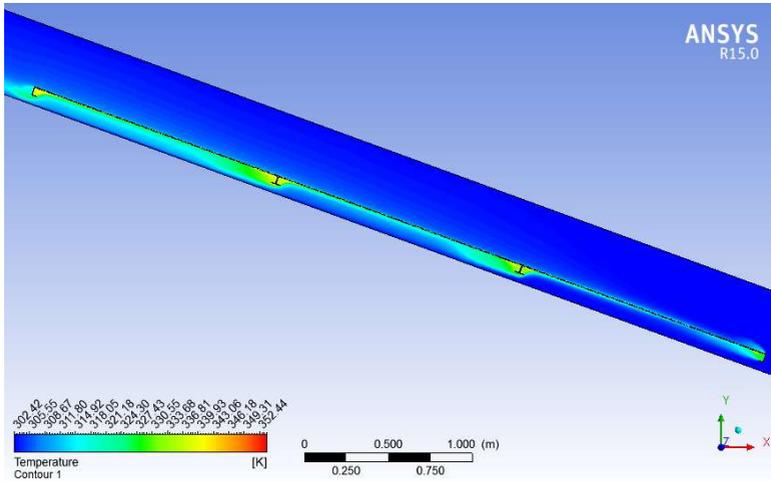
Kombinasi 4 modul dan jarak 0,2m



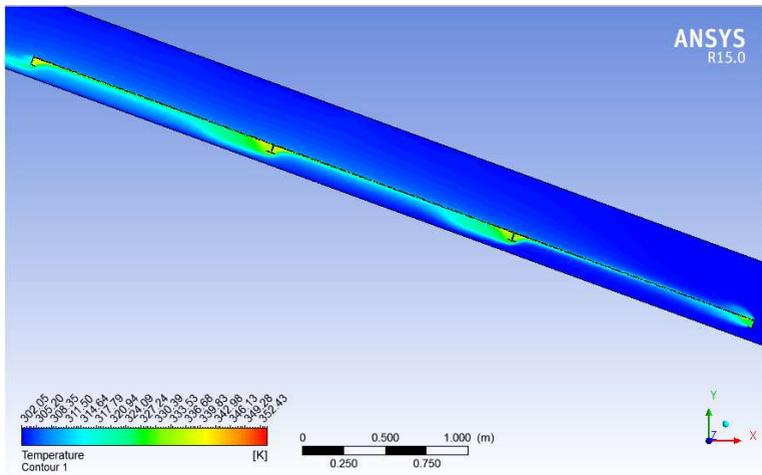
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,06m



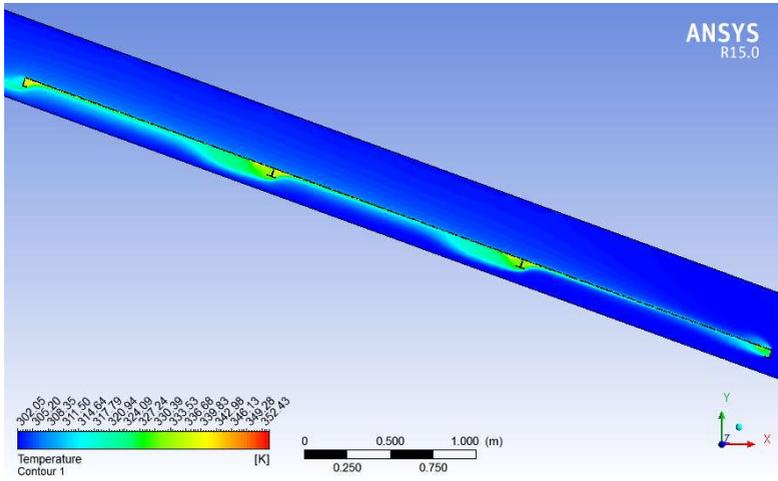
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,08m



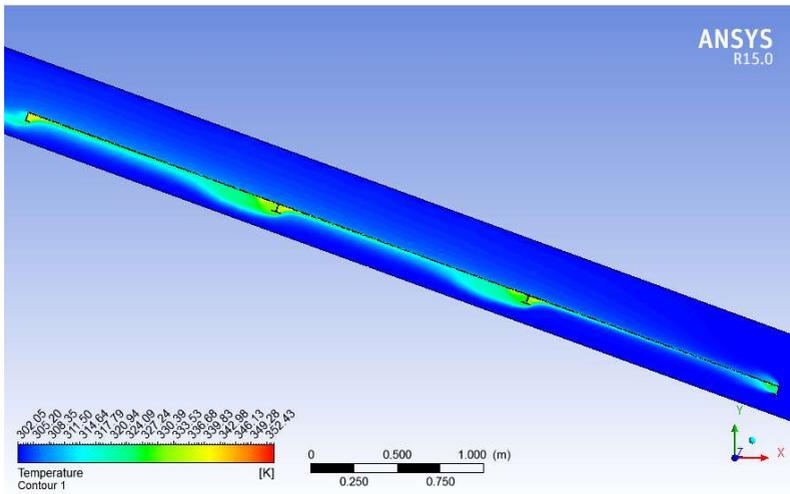
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,1m



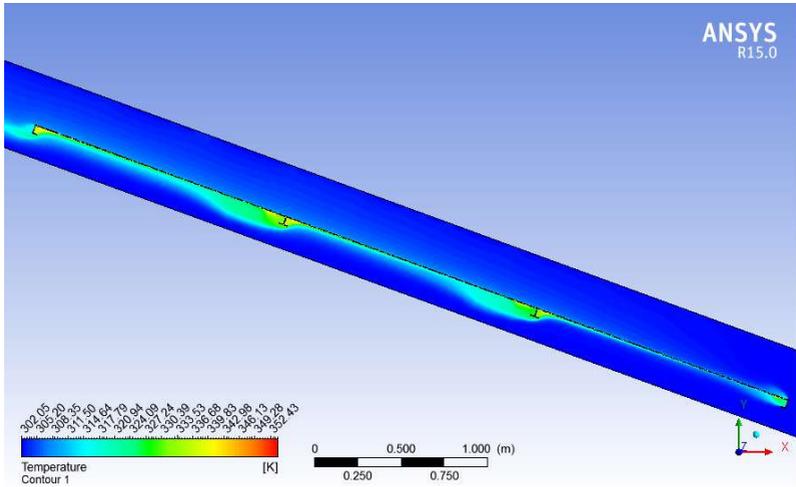
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,12m



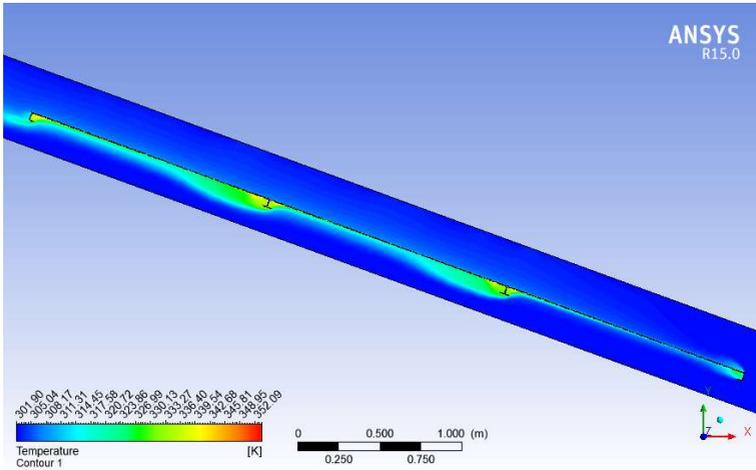
Kombinasi 3 modul dan jarak 0,14m



Kombinasi 3 modul dan jarak 0,16m



Kombinasi 3 modul dan jarak 0,18m



Kombinasi 3 modul dan jarak 0,2m

BIODATA PENULIS



MUHAMMAD JAMALUDDIN merupakan nama lengkap penulis. Penulis dilahirkan di kota Lamongan, Jawa Timur pada tanggal 24 Juni 1994 sebagai anak kelima dari enam bersaudara pasangan Wardji dan Umsiyah. Riwayat pendidikan penulis adalah MI Darul Ulum Datinawong (2000-2006), SMP Negeri 1 Babat (2006-2009), SMA Negeri 2 Lamongan (2009-2012). Penulis diterima sebagai mahasiswa S1 Teknik Fisika ITS pada tahun

2012, kemudian fokus pada bidang minat rekayasa energi dan pengkondisian lingkungan untuk menyelesaikan tugas akhirnya. Penulis dapat dihubungi melalui email: muhammadjamaluddin@hotmail.com.