



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KARAKTERISTIK POLA ALIRAN RESIRKULASI  
BACKWARD - FACING STEP DI BAWAH PENGARUH  
INJEKSI GAS PANAS PADA ZONA REATTACHMENT**

**SKRIPSI**

**DIPO ANDIKA SYARIEF  
0606073096**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2010**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**KARAKTERISTIK POLA ALIRAN RESIRKULASI  
BACKWARD - FACING STEP DI BAWAH PENGARUH  
INJEKSI GAS PANAS PADA ZONA REATTACHMENT**

**SKRIPSI**

**Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

**DIPO ANDIKA SYARIEF  
0606073096**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI 2010**

## HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

**Nama : Dipo Andika Syarief**

**NPM : 0606073096**

**Tanda Tangan :**



**Tanggal : 12 Juli 2010**



## HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :  
Nama : Dipo Andika Syarief  
NPM : 06 06 07 30 96  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul Skripsi : KARAKTERISTIK POLA ALIRAN  
RESIRKULASI BACKWARD - FACING STEP  
DI BAWAH PENGARUH INJEKSI GAS  
PANAS PADA ZONA REATTACHMENT

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

### DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Harinaldi, M. Eng.

Penguji : Ardiyansyah, S.T., M. Eng.

Penguji : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, M. T.

Penguji : Dr. Ir. Warjito, M. Eng.

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 12 Juli 2010

## UCAPAN TERIMA KASIH

Pertama – tama penulis ingin memanjatkan puji dan syukur kepada Allah SWT atas segala rahmat dan karunia-Nya yang telah dilimpahkan sehingga skripsi dengan judul *Karakteristik Pola Aliran Resirkulasi Backward - Facing Step Di Bawah Pengaruh Injeksi Gas Panas Pada Zona Reattachment* dapat diselesaikan. Hanya dengan ijin dan kehendak-Nya, penyusunan skripsi ini dapat terjadi.

Penulis menyadari sepenuhnya dan tidak dapat memungkiri bahwa penyusunan skripsi ini dapat diselesaikan dengan baik melalui bantuan dan dukungan dari berbagai pihak, baik dukungan moril dan materil. Oleh karena itu, dengan segala ketulusan dan kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar – besarnya kepada kepada yang terhormat :

- Bapak Dr. Ir. Harinaldi, M. Eng selaku dosen pembimbing dan sekaligus sebagai Kepala Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia
- Para staf dosen dan karyawan Jurusan Teknik Mesin Universitas Indonesia
- Priya dan Damora yang telah menjadi tim yang terus bekerja sama selama melakukan penelitian
- Seluruh keluarga tercinta, ayah, ibu, kakak, dan adik yang tak henti – hentinya memberikan dukungan moril dan materil
- Panci, Maulana, dan sahabat – sahabat yang tidak dapat disebutkan satu per satu yang selalu mendukung dan memberi semangat
- Rekan – rekan di Program Reguler Jurusan Teknik Mesin, khususnya angkatan 2006

Semoga penyusunan skripsi ini dapat bermanfaat bagi siapa pun yang membacanya atau bahkan memberi inspirasi di kemudian hari. Namun, kami juga tidak terlepas dari segala kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu mohon dimaklumi, kritik dan saran yang membangun sangat kami harapkan.

Depok, Juli 2010

Penyusun



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

---

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

Nama : Dipo Andika Syarief  
NPM : 0606073096  
Program Studi : Teknik Mesin  
Departemen : Teknik Mesin  
Fakultas : Teknik  
Jenis Karya : Skripsi

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

**KARAKTERISTIK POLA ALIRAN RESIRKULASI BACKWARD - FACING STEP DI BAWAH PENGARUH INJEKSI GAS PANAS PADA ZONA REATTACHMENT**

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok  
Pada tanggal : 12 Juli 2010

Yang menyatakan



(Dipo Andika)

## ABSTRAK

Nama : Dipo Andika Syarief  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : KARAKTERISTIK POLA ALIRAN RESIRKULASI  
BACKWARD - FACING STEP DI BAWAH PENGARUH  
INJEKSI GAS PANAS PADA ZONA REATTACHMENT

Salah satu sifat yang nampak jelas dari karakteristik aliran resirkulasi adalah sifat turbulensi yang dapat dikendalikan secara aktif menggunakan eksitasi eksternal. Pada penelitian ini, eksitasi eksternal yang digunakan sebagai kontrol aktif yaitu berupa injeksi udara panas melalui sebuah celah pada dasar kanal. Dengan adanya injeksi udara panas, maka dapat diketahui pengaruhnya terhadap karakteristik aliran resirkulasi yang terjadi. Dengan kebutuhan untuk mempelajari karakteristik aliran resirkulasi tersebut secara lebih komprehensif, maka digunakanlah metode visualisasi berkecepatan tinggi dengan basis lembar cahaya (*light sheet based high speed visualization*). Metode visualisasi ini akan menggambarkan baik secara kualitatif maupun secara kuantitatif karakteristik aliran resirkulasi yang hendak dipelajari. Melalui penggunaan metode ini diharapkan dapat diperoleh data berupa visualisasi aliran yang secara lebih jauh dapat dianalisa baik secara kualitatif maupun kuantitatif.

Kata kunci :  
Aliran Resirkulasi, Injeksi Udara Panas, Visualisasi Berkecepatan Tinggi



## ABSTRACT

Name : Dipo Andika Syarief  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : CHARACTERISTICS OF RECIRCULATION PATTERN  
BEHIND A BACKWARD – FACING STEP UNDER  
INFLUENCE OF HEATED GAS AT REATTACHMENT  
ZONE

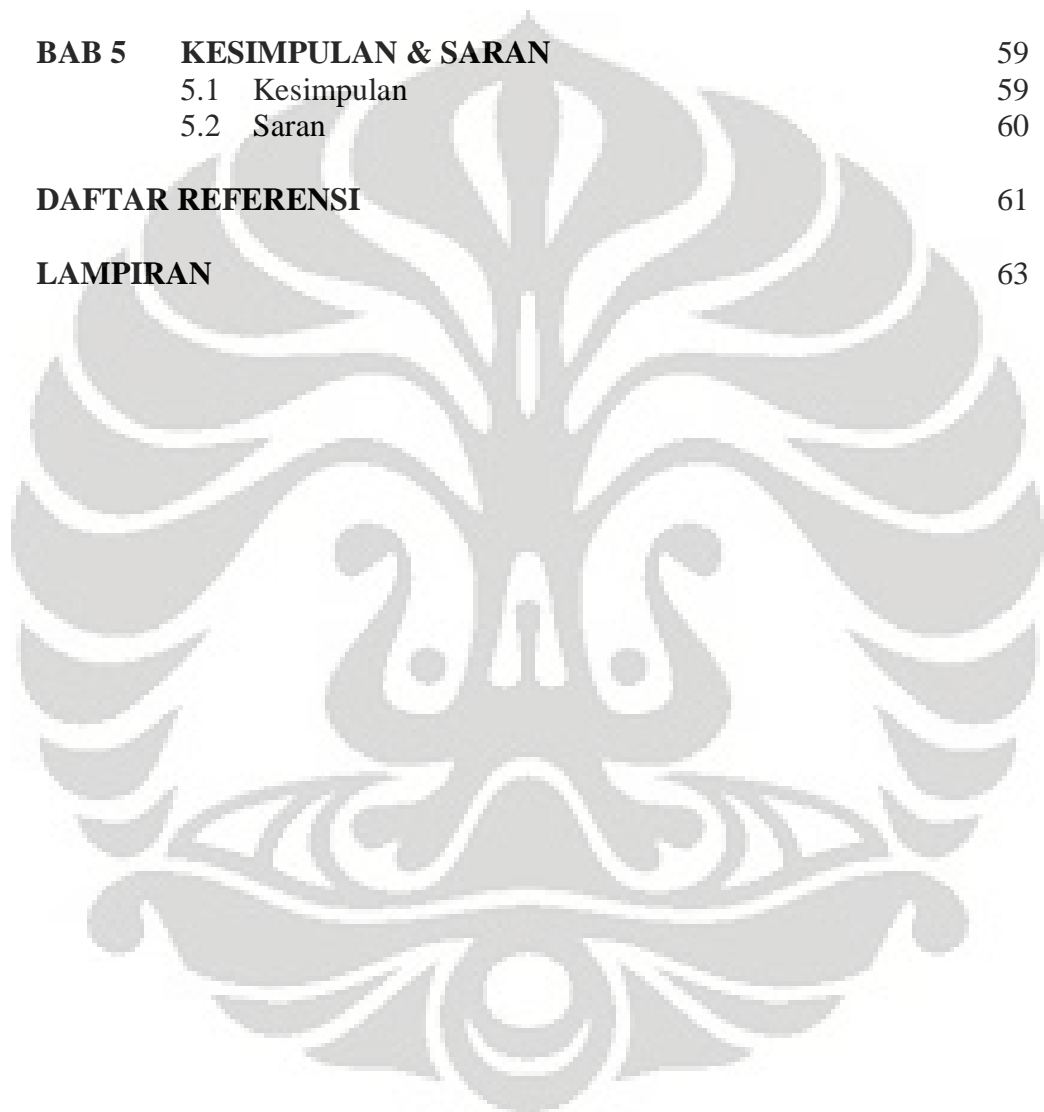
One of the most important characteristic from recirculation flow is the turbulence characteristic which can be modified by using active control. In this experiment, the active control which will be used is an injection of hot gas through a slot at the bottom of the flow canal. By using an injection of hot gas, we can learn about the effect of active control on the recirculation flow. There are a lot of method which can be used to learn about this issue. By the needs of understanding about the recirculation flow to be more comprehend, then the use of light sheet based high speed visualization is needed. This method will give us an illustration about the effect of control active on the recirculation flow by both qualitative and quantitative. The purpose of this method is to obtain a visualization data base which going to be analyzed thoroughly.

Keywords :  
Recirculation Flow, Hot Gas Injection, High Speed Visualization

# DAFTAR ISI

JUDUL	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
UCAPAN TERIMA KASIH	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	vi
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SIMBOL	xiv
<b>BAB 1 PENDAHULUAN</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Pembatasan Masalah	4
1.5 Metodologi Penelitian	4
1.6 Sistematika Penulisan	5
<b>BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA</b>	<b>6</b>
2.1 Separated – Reattaching Flow	6
2.2 Backward – Facing Step	8
2.3 Lapisan Batas dan Lapisan Geser	10
2.4 Separasi	11
2.5 Pengertian Sistem dan Volume Kendali	12
2.6 Eksitasi Eksternal	13
2.7 Visualisasi Berkecepatan Tinggi Berbasis Lembar Cahaya	15
<b>BAB 3 METODE PENELITIAN</b>	<b>17</b>
3.1 Peralatan Penelitian	18
3.1.1 Blower Sentrifugal	18
3.1.2 <i>Wind Tunnel</i> Skala Kecil	19
3.1.3 <i>Test Section</i>	21
3.1.4 Kompresor	21
3.1.5 Heater	22
3.1.6 <i>Nebulizer</i>	22
3.1.7 <i>High Speed Video Camera</i>	23
3.1.8 <i>Voltage Regulator</i>	24
3.1.9 <i>Dark Room</i>	25
3.2 Peralatan Pengukuran	26
3.2.1 Manometer Kapiler	26
3.2.2 Termokopel Digital	26
3.2.3 <i>Hot Wire Anemometer</i>	27
3.3 Prosedur Penelitian	27

3.4	Kondisi Percobaan	30
<b>BAB 4</b>	<b>PEMBAHASAN</b>	31
4.1	Analisa Kualitatif	31
4.1.1	Ketinggian Step 20 mm	32
4.1.2	Ketinggian Step 40 mm	37
4.2	Analisa Kuantitatif	41
4.2.1	Ketinggian Step 20 mm	42
4.2.1	Ketinggian Step 40 mm	50
<b>BAB 5</b>	<b>KESIMPULAN &amp; SARAN</b>	59
5.1	Kesimpulan	59
5.2	Saran	60
	<b>DAFTAR REFERENSI</b>	61
	<b>LAMPIRAN</b>	63



## DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 1.1 Struktur Aliran Pada Geometri <i>Backward – Facing Step</i>	2
Gambar 2.1 <i>Backward – Facing Step</i>	8
Gambar 2.2 Sistem dan Volume Kendali	13
Gambar 2.3 <i>Light Sheet Based High Speed Visualization</i>	16
Gambar 3.1 Set up visualisasi kecepatan tinggi berbasis lembar cahaya	17
Gambar 3.2 Foto alat penelitian secara keseluruhan	18
Gambar 3.3 Blower Sentrifugal	18
Gambar 3.4 <i>Wind Tunnel</i> skala kecil	19
Gambar 3.5 <i>Test Section</i>	21
Gambar 3.6 <i>Heater</i>	22
Gambar 3.7 <i>Nebulizer</i>	23
Gambar 3.8 <i>High speed video camera</i>	24
Gambar 3.9 <i>Voltage Regulator</i>	24
Gambar 3.10 <i>Dark room</i>	25
Gambar 3.11 Kalibrasi Manometer Kapiler	26
Gambar 4.1 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 100 °C	32
Gambar 4.2 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 300 °C	33
Gambar 4.3 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 100 °C	35
Gambar 4.4 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 300 °C	36
Gambar 4.5 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 100 °C	37
Gambar 4.6 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 300 °C	38
Gambar 4.7 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 100 °C	39
Gambar 4.8 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 300 °C	40

Gambar 4.9	Titik – titik Pengukuran RGB Value Ketinggian Step H	42
Gambar 4.10	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 1	43
Gambar 4.11	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 2	43
Gambar 4.12	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 3	44
Gambar 4.13	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 4	44
Gambar 4.14	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 5	44
Gambar 4.15	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream y = 1	45
Gambar 4.16	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream y = 2	46
Gambar 4.17	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream y = 3	46
Gambar 4.18	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream y = 4	47
Gambar 4.19	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream y = 5	47
Gambar 4.20	Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 1	48
Gambar 4.21	Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 2	48
Gambar 4.22	Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 3	49
Gambar 4.23	Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 4	49
Gambar 4.24	Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 5	49
Gambar 4.25	Titik – titik Pengukuran RGB Value Ketinggian Step 2H	50
Gambar 4.26	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 1	51
Gambar 4.27	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 2	51
Gambar 4.28	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 3	51
Gambar 4.29	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 4	52
Gambar 4.30	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 5	52
Gambar 4.31	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream y = 1	53
Gambar 4.32	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream y = 2	54
Gambar 4.33	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream y = 3	54
Gambar 4.34	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream y = 4	55
Gambar 4.35	Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream y = 5	55
Gambar 4.36	Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 1	56
Gambar 4.37	Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 2	56
Gambar 4.38	Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 3	57
Gambar 4.39	Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 4	57
Gambar 4.40	Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 5	57

## DAFTAR TABEL

Hal		
Tabel 3.1	Spesifikasi <i>Nebulizer</i>	23
Tabel 3.2	Kondisi Percobaan	30
Tabel 3.3	Densitas Udara	30



## DAFTAR SIMBOL



$h$	:	Ketinggian fluida (mm)
$H$	:	Ketinggian step (mm)
$l_f$	:	Jarak letak injeksi dari step (mm)
$I$	:	Rasio spesifik momentum injeksi (mm)
$SD_T$	:	Standar deviasi (%)
$T_i$	:	Temperatur udara injeksi ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_o$	:	Temperatur udara suplai dari blower ( $^{\circ}\text{C}$ )
$V_i$	:	Kecepatan udara injeksi (m/s)
$V_o$	:	Kecepatan udara suplai dari blower (m/s)
$\rho_i$	:	Massa jenis udara injeksi ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$\rho_o$	:	Massa jenis udara suplai dari blower ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

# BAB 1

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Seiring berjalannya waktu, sumber daya energi tak terbaharukan juga semakin menipis persediaannya, sedangkan kebutuhan akan energi akan terus meningkat seiring dan tidak perlu kita pertanyakan lagi. Oleh karena itu, kajian ilmu pengetahuan menjadi suatu hal yang penting dan ikut membantu di dalam usaha pemanfaatan energi secara lebih efisien. Salah satu bentuk kajian ilmu yang dapat diterapkan adalah kajian mengenai pola aliran resirkulasi. Kajian mengenai aliran resirkulasi ini sering kali dilakukan karena aplikasinya yang luas serta peranannya yang penting di berbagai aplikasi keteknikan. Sebagai contoh adalah aliran resirkulasi di dalam *combustor* (ruang bakar).

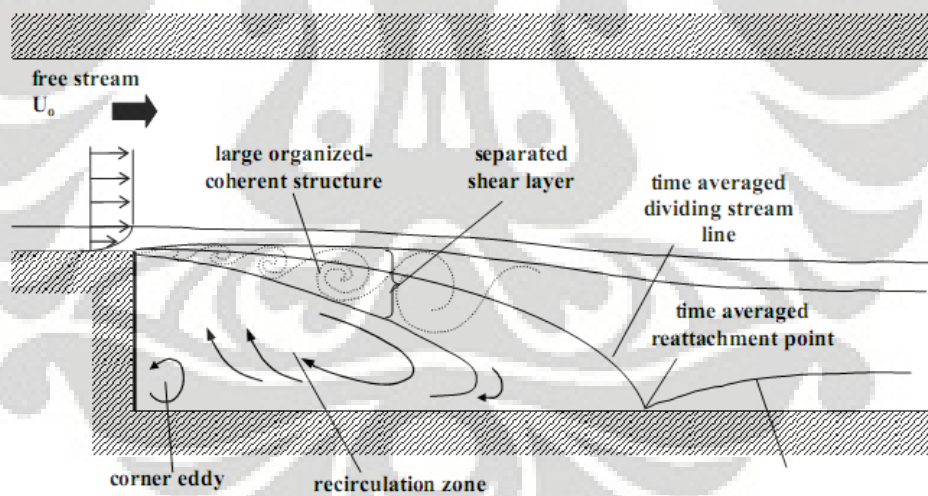
Sejak dahulu, sumber energi, terutama bahan bakar minyak dan gas Bumi, telah menjadi sumber bahan bakar utama di dalam hidup manusia. Dikarenakan kebutuhan akan bahan bakar utama ini terus meningkat, maka jumlah minyak dan gas Bumi yang tersedia pun semakin menipis. Oleh karena itu, penghematan energi dalam penggunaan bahan bakar utama ini sangat dibutuhkan dan terus dikampanyekan pada waktu belakangan ini. Suatu pemanfaatan energi yang efisien sangat diperlukan.

Efisiensi dalam penggunaannya pun menjadi hal yang penting untuk diperhatikan. Hal ini terkait erat dengan efisiensi dalam proses konversi energi, dari bentuk bahan bakar ke dalam bentuk energi lain, lebih khusus lagi dalam proses pembakaran. Selain efisiensi terhadap penggunaan bahan bakar, efisiensi proses konversi energi juga memiliki keuntungan yang lain, yaitu penekanan emisi dan polusi yang ditimbulkan dari proses pembakaran. Melalui penekanan emisi dan polusi yang ditimbulkan sebagai salah satu hasil dari proses pembakaran, maka dapat mengurangi dampak penipisan lapisan ozon dan efek pemanasan global.



Berdasarkan pemikiran tersebut, maka kalangan peneliti melakukan berbagai penelitian dan eksperimen untuk meningkatkan efisiensi proses pembakaran. Salah satu penelitian dan eksperimen tersebut adalah dengan menggunakan suatu bentuk ruang bakar sederhana berkontur tangga/pembesaran tiba – tiba (*sudden expansion flow – based gas burner*) yang dapat menjaga nyala api (*flame holding*) dalam medan aliran kecepatan tinggi.

Struktur daerah aliran yang terdapat di dalam jenis ruang bakar *backward – facing step* beranekaragam. Udara yang mengalir melalui mekanisme pembesaran tiba – tiba (*sudden expansion*), menghasilkan aliran separasi yang di dalamnya terdapat *recirculation flow*, *shear layer*, dan *re – developing boundary layer*. Selain itu juga terdapat zona aliran resirkulasi yang merupakan suatu daerah tertutup yang terbentuk dari adanya aliran yang melewati suatu ekspansi mendadak di mana aliran tersebut terperangkap di dalam daerah tersebut.



Gambar 1.1 Struktur Aliran Pada Geometri *Backward – Facing Step*

Meskipun *free stream* memiliki kecepatan yang sangat tinggi namun zona resirkulasi memiliki kecepatan yang rendah. Di dalam zona resirkulasi timbul turbulensi aliran yang dapat dimanfaatkan untuk memfasilitasi pencampuran bahan bakar dan udara dengan kerugian tekanan yang kecil dalam aliran kecepatan tinggi karena dibentuk di dalam daerah aliran kecepatan

rendah. Hal ini menyebabkan bentuk ruang bakar seperti ini banyak digunakan di dalam penelitian karena kestabilan dan kemudahan di dalam mengendalikan api difusi.

## 1.2 Perumusan Masalah

Di dalam penelitian kali ini, tidak melibatkan penggunaan injeksi bahan bakar, melainkan injeksi udara panas sebagai eksitasi eksternal. Meskipun tidak melibatkan reaksi kimia, proses pencampuran antara udara lingkungan (*ambient*) dengan udara panas pada medan aliran turbulen sangatlah rumit dan belum sepenuhnya terkarakterisasi pada tingkat fundamental sehingga aplikasi praktek harus bergantung pada informasi empiris melalui penelitian. Bentuk – bentuk penelitian serupa telah dilakukan sebelumnya, yaitu dengan menggunakan injeksi udara panas berupa celah. Untuk semakin mempelajari fenomena pencampuran yang terjadi, maka dilakukan lah penelitian ini.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk memperoleh basis data eksperimental dan mempelajari secara lebih mendalam mengenai pengaruh eksitasi eksternal terhadap karakteristik fenomena zona resirkulasi melalui suatu ekspansi mendadak dengan menggunakan metode visualisasi kecepatan sangat tinggi berbasis lembar cahaya (*light sheet based high speed visualization*). Data yang nantinya akan diperoleh melalui penelitian ini, kemudian akan dianalisa secara lebih mendalam baik secara kualitatif maupun secara kuantitatif.

Diharapkan, penelitian ini dapat memperkaya kajian – kajian ilmu yang mempelajari struktur aliran resirkulasi yang telah dilakukan oleh peneliti – peneliti di seluruh dunia selama ini. Pada akhirnya, hasil penelitian dapat

menjadi suatu referensi di dalam aplikasi aliran resirkulasi di berbagai bidang keteknikan.

#### 1.4 Pembatasan Masalah

Di dalam melaksanakan penelitian ini, terdapat beberapa batasan yang dipakai berupa kondisi percobaan dan asumsi. Hal ini untuk lebih menyederhanakan masalah yang hendak diteliti tanpa menghilangkan keterkaitannya sebagai pendekatan mendasar dari kondisi realita pada aplikasi di lapangan. Batasan – batasan tersebut antara lain :

- Penelitian dilakukan dalam keadaan adiabatik (tanpa ada reaksi kimia)
- Perbandingan momentum yaitu 0,1 dan 0,5 pada temperatur injeksi  $100^{\circ}\text{C}$  dan  $300^{\circ}\text{C}$  serta jarak celah injeksi 40 mm dan 80 mm
- Aliran yang akan dianalisa di dalam *test section* dengan injeksi gas panas adalah dua dimensi
- Aliran udara yang keluar dari *nozzle* adalah seragam dan telah mencapai profil *tophead*
- Distribusi temperatur yang terjadi diasumsikan tidak menyebabkan terjadinya proses evaporasi partikel aliran (tidak ada perubahan fase)

#### 1.5 Metodologi Penelitian

Penelitian yang hendak dilakukan kali ini, menggunakan pendekatan eksperimental. Penelitian dilakukan di ruang Laboratorium Mekanika Fluida. Penelitian dilaksanakan secara tim, yang terdiri dari seorang mahasiswa jenjang S2 dan dua orang mahasiswa jenjang S1. Di dalam melaksanakan penelitian, terdapat beberapa parameter penting yang menjadi variasi dalam melakukan pengambilan data. Variasi tersebut antara lain perbedaan rasio momentum injeksi, perbedaan temperatur injeksi, dan perbedaan ketinggian step dari geometri backward - facing step yang digunakan. Proses

pengambilan data sendiri memerlukan konfigurasi pencahayaan dan *dark room* untuk menunjang penggunaan *high speed video camera*. Peralatan - peralatan tersebut diperlukan karena penelitian kali ini merupakan pengembangan dari peralatan penelitian yang sudah ada sebelumnya.

## **1.6 Sistematika penulisan**

### **BAB 1 PENDAHULUAN**

Berisi latar belakang, tujuan penelitian, pembatasan masalah, serta sistematika penulisan.

### **BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA**

Merupakan penjabaran dari teori dasar fluida yang mendukung mengenai hal pembahasan aliran separasi dan resirkulasi pada *backward – facing step*.

### **BAB 3 PERALATAN DAN PROSEDUR PENELITIAN**

Berisi tentang penjelasan dari masing – masing alat yang digunakan di dalam pelaksanaan penelitian beserta prosedur yang dilakukan selama berlangsungnya penelitian.

### **BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN**

Berisi mengenai pengolahan dari data yang diperoleh beserta analisa dari hasil pengolahan data tersebut.

### **BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN**

Berisi kesimpulan yang diambil dari seluruh rangkaian proses penelitian yang telah dilakukan.

## BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Separated – Reattaching Flow

*Separated – reattaching flow* merupakan suatu fenomena aliran fluida yang terseparasi dekat dengan batas padatnya dan kemudian bertaut kembali dengan batas padatnya (*reattachment*) di mana fenomena ini menghasilkan aliran fluida dengan karakteristik tertentu. Fenomena ini dapat dikaitkan dengan fenomena – fenomena kompleks fluida lain dan mempunyai aplikasi yang sangat luas. Contoh praktek aplikasi fenomena ini dalam bidang keteknikan antara lain perancangan keluaran pompa, perancangan geometri kendaraan, peralatan sistem energi, *airfoil*, ruang bakar,dll. Yang paling umum dilakukan yaitu pada aplikasi sistem pembakaran yang memanfaatkan karakteristik aliran resirkulasi aliran yang terjadi untuk menstabilkan pembakaran.

Penelitian – penelitian terhadap aliran *separated – reattaching* sudah banyak dilakukan, baik menggunakan tidak hanya pendekatan secara eksperimen dan komputasional, akan tetapi juga numerik. Salah satu contoh penelitian yang menggunakan pendekatan numerik yaitu kajian mengenai aliran laminar pada geometri *backward facing step*. Penelitian ini ditujukan untuk menganalisa pola aliran laminar yang terjadi. Sebagai hasil, penelitian ini mampu memprediksikan profil kecepatan aliran dan letak titik *reattachment* <sup>[1]</sup>. Pendekatan numerik yang pernah dilakukan juga memperhatikan ketinggian step dalam geometri *vackward – facing step* sebagai faktor yang berpengaruh terhadap pembentukan aliran *separated – reattaching*. Perubahan ketinggian *step* menyebabkan perubahan panjang titik *reattachment* <sup>[17]</sup>.

Dalam bidang aerodinamika juga dapat ditemui fenomena *separated – reattaching flow*. Terdapat beberapa hal sering kali menjadi kajian pada bidang ini, sebagai contoh yaitu mengenai kontrol aerodinamis dan pencampuran aliran yang terjadi. Injeksi mampu mempengaruhi karakteristik

aliran resirkulasi yang terjadi <sup>[2]</sup>. Keberadaan efek hisap (*suction*) dan tiup (*blowing*) terhadap aliran separasi juga telah dikaji. Efek hisap dan tiup dapat mempengaruhi pola aliran serta perpindahan kalor pada aliran separasi. Efek hisap (*suction*) akan menyebabkan peningkatan perpindahan kalor akan tetapi akan mengurangi panjang titik *reattachment*. Hal yang sebaliknya akan disebabkan oleh efek tiup (*blowing*) <sup>[16]</sup>. Contoh aplikasi pada bidang lain yaitu fenomena *film cooling* (pendingin dengan lapisan film). Aliran *separated – reattaching* pada geometri *backward – facing step* juga dapat menjadi sarana pendinginan. Umumnya menggunakan alas *step* berpori dan telah dikaji secara komputasi sebelumnya <sup>[3]</sup>.

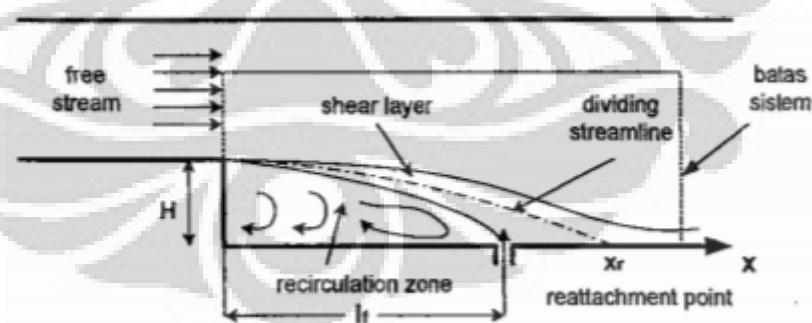
Pemanfaatan *separated – reattaching flow* dalam menstabilkan pembakaran dilakukan karena dapat daerah turbulen yang terjadi dapat digunakan untuk memfasilitasi pencampuran bahan bakar dan udara dalam ruang lingkup aliran super cepat. Kecepatan aliran yang terjadi sama besarnya dengan kecepatan propagasi pembakaran dari pencampuran antara udara dengan bahan bakar. Didasari oleh hal tersebut, umumnya metode yang banyak digunakan di dalam berbagai kombinasi sistem pembakaran adalah dengan cara menginjeksikan bahan bakar ke dalam daerah resirkulasi kecepatan rendah dari *separated – reattaching flow*. Hal ini dilakukan agar dapat diperoleh *diffusion flame*. Apabila kita pelajari, *diffusin flame* memiliki karakteristik aliran yang jauh lebih kompleks bila dibandingkan dengan aliran jet sederhana. Hal ini sangat mungkin terjadi karena di dalam melakukan suatu proses pembakaran, struktur dan karakteristik aliran yang terjadi sangat dipengaruhi oleh metode dan karakteristik dari susunan udara masuk, bahan bakar, geometri ruang bakar dan struktur dari medan aliran. Oleh karena itu, hasil yang diperoleh akan bervariasi. Pengaruh dari faktor – faktor tersebut mungkin terjadi karena proses pencampuran antara udara *ambient* dengan bahan bakar yang diinjeksikan dikendalikan oleh perpindahan massa dan panas secara konveksi.

Aliran ekspansi mendadak pada kanal berkontur tangga (*backward – facing step*) adalah salah satu konfigurasi yang mendapat perhatian di antara

variasi metode yang digunakan untuk mendapatkan *separated – reattaching flow*. Hal ini dikarenakan, geometri semacam ini memberikan bentuk yang sederhana untuk menghasilkan separasi aliran dan *reattachment* dari *shear layer turbulent*. Daerah resirkulasi kecepatan rendah terbentuk walaupun aliran udara utama merupakan aliran berkecepatan tinggi.

## 2.2 Backward – Facing Step

Di dalam geometri *backward – facing step*, terdapat fenomena aliran yang cukup kompleks yang dapat dipelajari dalam beberapa cara, salah satunya melalui penggambaran kompleksitas aliran secara dua dimensi seperti gambar 2.1 di bawah. Aliran udara melalui *backward – facing step* menghasilkan aliran separasi yang memuat zona resirkulasi, lapisan geser (*shear layer*) dan lapisan batas (*boundary layer*) yang berkembang kembali. Aliran separasi mulai terjadi tepat pada titik ujung tinggi *step* dan membentuk lapisan geser bebas. Garis *streamline* hampir paralel dengan dinding pada titik separasi. Dikarenakan geometri yang semacam ini, maka timbul daerah aliran resirkulasi kecepatan rendah pada bagian bawah separasi.



Gambar 2.1 *Backward – Facing Step*

*Backward – facing step* merupakan suatu bentuk geometri yang paling sederhana untuk menghasilkan aliran separasi dan *reattachment* di antara

variasi geometri aliran dua dimensi. Dikarenakan alasan tersebut, *backward – facing step* sering kali dimanfaatkan untuk mengembangkan model aliran turbulen. Meskipun *backward – facing step* merupakan model aliran *reattaching* yang paling sederhana, daerah aliran yang terjadi masih sangat kompleks. Akan terbentuk transisi secara cepat setelah separasi dengan lapisan batasnya laminar walaupun bilangan Reynoldnya sangat rendah. Separasi dari lapisan geser akan terlihat lebih besar ketika melewati bagian pertama dari zona aliran separasi.

Garis putus – putus pada Gambar 2.1 menggambarkan garis aliran pembagi (*dividing streamline*). Lapisan geser yang terjadi cukup tipis dan tidak dipengaruhi oleh keberadaan dinding sekitarnya. Untuk aliran dua dimensi, *reattachment point* ( $X_r$ ) didefinisikan sebagai tempat dimana gesekan permukaan local rata – rata sama dengan nol. Pada daerah *reattachment*, kecepatan searah aliran rata – rata terbobot waktu (*time – average streamwise velocity*) sangat kecil dan membalikkan secara tiba – tiba arah aliran yang terjadi, kemudian menjadi aliran turbulen. Untuk tekanan dan gaya geser, pengaruh dari momentum searah aliran relative diabaikan, hal ini menyebabkan gradient tekanan searah aliran kira – kira seimbang dengan gradient tegangan geser normal fluida total permukaan. Meskipun nilai dari geseran total rata – rata pada permukaan di daerah *reattachment* kecil (pada *reattachment point*), namun nilainya akan berubah menjadi besar pada lapisan geser di atas permukaan. Hal ini menyebabkan terjadi kenaikan tekanan yang besar pada daerah *reattachment*.

Aplikasi geometri *backward – facing step* pada ruang bakar, telah umum dikaji dan terus mengalami perkembangan. Terdapat perbedaan persebaran temperatur antara ruang bakar yang memanfaatkan geometri *backward – facing step* dengan yang tidak memanfaatkan. Ruang bakar dengan geometri *backward – facing step* mampu meningkatkan pencampuran udara dengan bahan bakar sehingga distribusi temperatur dan proses pembakaran jadi sangat efektif <sup>[4]</sup>. Tidak hanya temperatur, tekanan juga menjadi hal sangat dipengaruhi oleh keberadaan eksitasi eksternal. Injeksi



bahan bakar yang bercampur dengan udara akan menghasilkan proses pembakaran sehingga tekanan di daerah aliran resirkulasi di dekat *step* dan tekanan di sekitar dinding *step* meningkat. Eksitasi eksternal juga akan menyebabkan timbulnya efek *bow shock* dan *barrel shock* terhadap pola aliran [18].

Geometri yang umum diaplikasikan untuk ruang bakar selain *backward – facing step* adalah dengan menggunakan *bluff body* (benda di dalam aliran). Wilayah terbentuknya api pembakaran yang ditimbulkan oleh kedua geometri ini akan berbeda. Meskipun dari segi energi kalor yang ditimbulkan tidak terlalu jauh berbeda, namun perbedaan pola aliran yang terbentuk dapat dianalisa secara kualitatif untuk kemudian hasilnya dikembangkan lebih lanjut [5]. Pemanfaatan ruang bakar dengan geometri *backward – facing step* juga dapat digunakan untuk mempelajari stabilitas nyala api pembakaran. Pola susunan struktur aliran bahan bakar, udara, dan bentuk geometri menghasilkan stabilitas nyala api yang berbeda – beda. Peningkatan volume zona resirkulasi yang terbentuk akan meningkatkan juga batas jumlah massa bahan bakar agar api tetap menyala [6].

### 2.3 Lapisan Batas dan Lapisan Geser

Di dekat batas padat, kecepatan berubah sangat cepat dari nol pada perbatasan (kondisi tanpa slip) sampai suatu nilai yang relatif besar dalam jarak yang pendek dari perbatasan. Perubahan yang sangat cepat dari kecepatan menyebabkan kenaikan besar pada gradien kecepatan normal terhadap perbatasan dan menghasilkan tegangan geser yang cukup berarti, meskipun viskositasnya kecil. Akan terdapat sebuah lapisan (umumnya sangat tipis) di dekat setiap permukaan tetap dalam arus yang bergerak di mana tegangan gesernya tidak dapat diabaikan. Lapisan ini disebut dengan lapisan batas.

Tegangan geser menyebabkan akan cenderung memperlambat lebih banyak partikel – partikel fluida sepanjang lapisan batas, akhirnya

menyebabkan semakin tebalnya lapisan batas seiring dengan bertambahnya jarak dari titik separasi. Di dalam lapisan batas yang semakin bertambah tebal tersebut, muncul lapisan geser yang berfungsi sebagai pemisah antara aliran ke arah *upstream* dan aliran yang menuju ke arah *downstream*. Lapisan geser dapat berfungsi sebagai lapisan percampuran, hal ini disebabkan karena terciptanya struktur aliran yang koheren dan bergerak ke arah *downstream*.

Pendekatan menggunakan komputasi dapat memprediksikan karakteristik pola aliran yang terbentuk. Karakteristik yang juga meliputi lapisan batas serta lapisan geser dapat disimulasikan dengan menggunakan model – model dalam perangkat lunak (*software*). Lebih jauh lagi, hasil komputasi sering kali dibandingkan dengan hasil eksperimental, tidak jarang bahwa hasil yang diperoleh tidak berbeda jauh <sup>[20]</sup>. Pendekatan menggunakan komputasi lain juga membuktikan bahwa pendekatan yang cukup memadai untuk mempelajari karakteristik pola aliran resirkulasi yaitu dengan analisa dua dimensi. Analisa hanya dengan satu dimensi tidak cukup memenuhi kebutuhan akan data yang komprehensif <sup>[7]</sup>.

Pada geometri *backward – facing step* yang ditunjukkan pada gambar 2.1, lapisan geser digambarkan dengan garis putus - putus yang bergerak menuju *reattachment zone* dan mengenai dasar *step*. Sebagian dari partikel – partikel fluida dalam lapisan geser ini bergerak ke arah aliran resirkulasi. Hal ini disebabkan karena adanya pengaruh dari *adverse pressure gradient*. Lapisan batas akan terbentuk kembali apabila aliran telah melewati *reattachment point* lalu berkembang dan bergerak searah dengan arah gerakan *free stream*.

## 2.4 Separasi

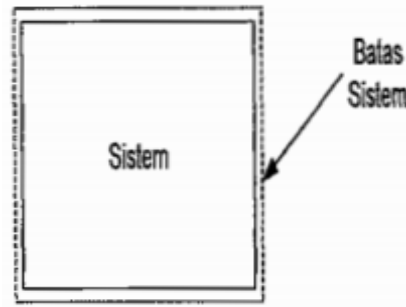
Di luar dari lapisan batas, distribusi kecepatan dan distribusi tekanan dapat diperkirakan cukup dekat dengan penyelesaian aliran potensial. Namun demikian, di daerah – daerah medan aliran di mana aliran mengalami perlambatan (daerah pembesaran tiba – tiba dari suatu kanal aliran), tekanan di

dekat sebuah batas padat akan meningkat dalam arah aliran. Apa yang disebut dengan gradien tekanan berlawanan (*adverse pressure gradient*) dapat menyebabkan terjadinya separasi aliran, yaitu suatu fenomena yang dapat menyebabkan perubahan yang dramatis dalam suatu medan aliran

Pada umumnya separasi dapat didefinisikan sebagai peristiwa terpisahnya lapisan batas dari batas permukaan padatnya. Fluida yang mengalir melewati *backward – facing step* mengalami separasi karena terjadi pembesaran secara tiba – tiba pada ujung *step*. Pada titik inilah dapat dikatakan bahwa titik separasi terjadi. *Adverse pressure gradient* akan menyebabkan aliran utama (*free stream*) terbagi menjadi dua, aliran yang pertama bergerak searah dengan *free stream* – nya, sedangkan aliran yang kedua bergerak berlawanan arah. Aliran yang kedua bergerak secara acak dengan kecepatan yang lambat menuju ke arah hulu dari *step* dan akhirnya membentuk aliran resirkulasi.

## 2.5 Pengertian Sistem dan Volume Atur

Sistem dapat didefinisikan sebagai kumpulan dari materi - materi dengan identitas yang tetap (atom – atom atau partikel – partikel fluida yang sama), yang dapat bergerak, mengalir, dan berinteraksi dengan lingkungannya. Sedangkan, volume atur adalah sebuah volume di dalam ruang (suatu entitas geometri, tidak tergantung massa) yang dapat dilalui oleh fluida. Sistem dapat terdiri dari massa yang relatif besar (sebagai contoh seluruh danau), tapi sistem juga dapat berukuran sangat kecil (seperti partikel). Meskipun partikel – partikel fluida di dalam sistem bergerak dan berubah – ubah, namun massa yang terdapat tetaplah konstan. Hal ini berkaitan dengan hukum Newton yaitu hukum kekekalan massa yang menyatakan bahwa massa dari suatu sistem adalah konstan ( $dm / dt = 0$ ). Pada penelitian ini, sistem yang didefinisikan berisikan partikel – partikel fluida yang bergerak di dalam geometri *backward – facing step*.



Gambar 2.2 Sistem dan Volume Kendali

Yang menjadi batas dari volume atur adalah permukaannya. Geometri dari volume kendali dapat berupa apa saja. Seringkali batas dari volume atur dibuat berhimpit dengan batas sistem. Volume atur dapat digunakan untuk menganalisa aliran fluida di dalam geometri *backward – facing step*. Umumnya, volume atur dapat berupa volume yang bergerak, berdeformasi, maupun yang tetap. Volume atur yang digunakan dalam penelitian ini berupa volume atur yang tetap, hal ini berarti volume atur tersebut dianggap memiliki nilai yang selalu tetap.

## 2.6 Eksitasi Eksternal

Pada hasil penelitian – penelitian yang telah dilakukan sebelumnya, suatu keberadaan eksitasi eksternal akan berpengaruh terhadap struktur aliran resirkulasi. Yang dimaksud dengan eksitasi eksternal adalah suatu halangan atau interupsi yang berasal dari luar sistem.

Pemanfaatan eksitasi eksternal sebagai alat kontrol aktif aliran telah banyak dipelajari sebelumnya, sebagai contoh adalah pemanfaatan pada aplikasi landas terbang pada kapal laut. Geometri dari landasan terbang tersebut akan menghasilkan aliran *separated – reattaching* sehingga penting untuk mempelajari manfaat alat kontrol aktif aliran resirkulasi yang terjadi. Hal yang dapat dilakukan yaitu dengan memanfaatkan injeksi jet sintetis pada landasan terbang berporos. Aplikasi ini terbukti bermanfaat mengurangi

ketidakstabilan aliran resirkulasi yang terjadi sehingga mampu mempermudah pendaratan<sup>[14]</sup>. Contoh aplikasi lain adalah pada geometri *airfoil*. Gaya *lift* dan *drag* yang dihasilkan dari geometri *airfoil* sangat berkaitan erat dengan aliran separasi yang terjadi. Oleh karena itu keberadaan eksitasi eksternal sebagai alat kontrol aktif akan memberi pengaruh terhadap aliran separasi yang terjadi. Aplikasi ini terbukti mampu meningkatkan gaya *lift* yang sangat bermanfaat dalam penggunaan *airfoil*<sup>[8]</sup>.

Masih sangat banyak pemanfaatan aplikasi eksitasi eksternal yang telah dikaji, contohnya pemanfaatan eksitasi eksternal sistem tertutup. Aplikasi ini memanfaatkan injeksi sebagai alat kontrol aktif aliran separasi dalam sebuah geometri terowongan lurus. Aplikasi ini mampu mempengaruhi tidak hanya karakteristik aliran separasi, tapi juga letak titik *reattachment*<sup>[15]</sup>. Eksitasi eksternal berupa injeksi berupa alas berpori juga telah dikaji sebelumnya. Variasi luas injeksi berupa alas berpori serta rasio momentum injeksi akan berpengaruh terhadap kerugian tekanan, jarak titik *reattachment*, serta profil kecepatan dan karakteristik aliran yang terbentuk<sup>[9]</sup>.

Penelitian mengenai aplikasi eksitasi eksternal pada bidang *mixing* juga telah sering dilakukan. Melalui pendekatan simulasi, terbukti bahwa proses pencampuran antara hidrogen ( $H_2$ ) dan udara dapat meningkat dan dapat juga menurun akibat adanya eksitasi eksternal. Eksitasi eksternal diinjeksikan dalam berbagai variasi sudut untuk kemudian diperoleh karakteristik yang mampu meningkatkan proses pencampuran<sup>[10]</sup>. Pada aplikasinya di ruang bakar dengan geometri *backward – facing step*, eksitasi eksternal mampu mempengaruhi proses pencampuran bahan bakar dengan udara dan daerah resirkulasi yang dihasilkan. Eksitasi eksternal yang letaknya semakin mendekati step akan mengurangi interaksi antara daerah resirkulasi yang terjadi. Letak injeksi menjadi hal yang penting untuk memfasilitasi pencampuran pada daerah resirkulasi<sup>[11]</sup>.

Dalam penelitian kali ini, yang menjadi eksitasi eksternal yaitu injeksi udara panas. Telah diketahui bahwa eksitasi eksternal ini dapat berfungsi sebagai alat kontrol aktif terhadap sifat transpor turbulen dari aliran

resirkulasi. Oleh karena itu, dengan menggunakan eksitasi eksternal berupa injeksi udara panas maka fenomena kontrol aktif terhadap sifat transpor turbulen pada aliran resirkulasi dapat dipelajari secara lebih jauh lagi.

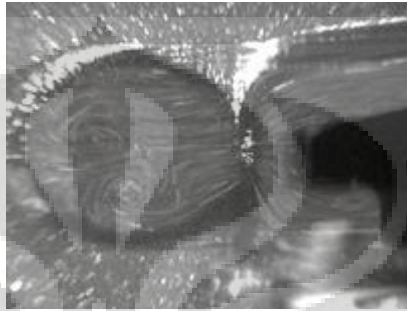
## 2.7 Visualisasi Berkecepatan Tinggi Berbasis Lembar Cahaya (*Light Sheet Based High Speed Visualization*)

Demi memperoleh basis data yang bersifat empiris dan lebih komprehensif mengenai struktur aliran resirkulasi, maka pada penelitian kali ini digunakan metode visualisasi berkecepatan tinggi berbasis lembar cahaya. Metode ini menggunakan lembar cahaya dan alat yang memungkinkan untuk menghasilkan visualisasi dari suatu gerakan dengan kecepatan yang tinggi, dalam hal ini adalah gerakan aliran fluida pada geometri *backward – facing step*.

Metode visualisasi bukan lagi menjadi pendekatan eksperimen yang langka dijumpai seiring dengan perkembangan teknologi. Telah banyak peralatan pendukung yang diciptakan hingga saat ini. Sebagai contohnya adalah *Digital Particle Image Velocimetry* (DPIV). Dengan menggunakan alat ini, maka data berupa citra partikel aliran dapat diperoleh. Penggunaan metode yang memanfaatkan peralatan seperti ini, dapat mengkaji karakteristik pola aliran separasi lebih jauh lagi <sup>[12]</sup>. Selain itu, pencitraan partikel aliran juga dapat dilakukan dengan menggunakan *Laser Doppler Anemometer*. Dengan menggunakan alat ini, maka pencitraan partikel aliran menjadi mungkin untuk dilakukan. Besar ukuran suplai partikel pun berpengaruh terhadap distribusi kecepatan rata – rata dalam pola aliran yang terbentuk <sup>[19]</sup>. Hasil pencitraan partikel pun dapat diilustrasikan berdasarkan data gambar atau video yang diperoleh. Ilustrasi ini bertujuan untuk mengetahui secara kualitatif pola aliran yang terbentuk <sup>[21]</sup>.

Untuk mendukung metode ini, maka dibutuhkan suatu sumber cahaya yang intensitas cahayanya memadai dan alat yang mampu menangkap gerakan kecepatan tinggi (*high speed video camera*). Diharapkan, melalui bantuan

peralatan – peralatan tersebut, dapat diperoleh visualisasi dari gerakan aliran yang terjadi di dalam geometri *backward – facing step*. Visualisasi yang diperoleh kemudian secara lebih lanjut dianalisa dengan bantuan perangkat lunak (*software*).

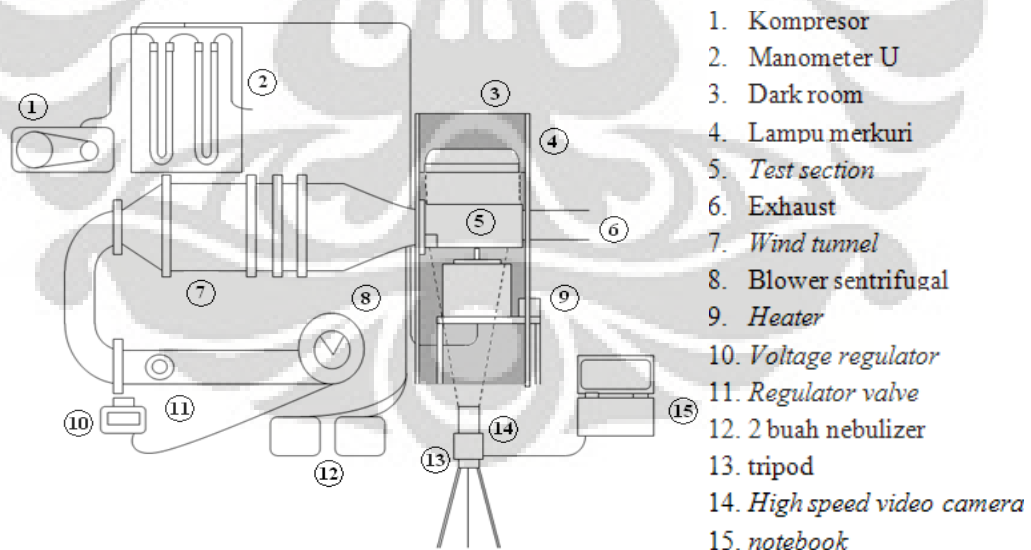


Gambar 2.3 *High Speed Visualization*

### BAB 3

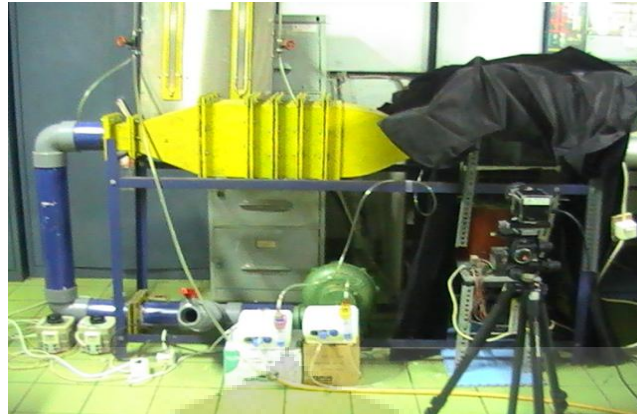
## METODE PENELITIAN

Penelitian yang dilakukan kali ini merupakan pengembangan dari penelitian – penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya. Untuk kondisi penelitian yang dilakukan, kurang lebih sama dengan salah satu penelitian terdahulu yaitu menggunakan kondisi adiabatik (tanpa reaksi kimia). Kondisi tersebut meliputi injeksi udara panas dengan temperatur 100°C dan 300°C yang diatur menggunakan *heater*. Sedangkan untuk peralatan penelitian mengalami beberapa perubahan. Hal ini dikarenakan penggunaan metode pengambilan data yang berbeda bila dibandingkan dengan metode penelitian yang terdahulu. Penelitian kali ini menggunakan metode visualisasi kecepatan sangat tinggi berbasis lembar cahaya (*light sheet based high speed visualization*). Dengan memadukan metode ini dengan data dari pengukuran kecepatan dan temperatur yang telah dilakukan oleh peneliti pada penelitian terdahulu, diharapkan dapat diperoleh basis data yang lebih komprehensif mengenai karakteristik medan aliran.



Gambar 3.1 Set up visualisasi berkecepatan tinggi berbasis lembar cahaya





Gambar 3.2 Foto alat penelitian secara keseluruhan

### 3.1 Peralatan Penelitian

#### 3.1.1 *Blower* Sentrifugal

Berfungsi untuk menyuplai udara *ambient* ke dalam sistem dengan kecepatan yang dapat diatur melalui besar sudut *suction* (dalam skala -1 sampai 10). *Blower* ini bekerja dengan spesifikasi 220v/2,5A dengan kecepatan 3000 – 3600 rpm. Udara dari *blower* disalurkan menuju sistem melalui pemipaan dari bahan PVC berdiameter 4 inchi.

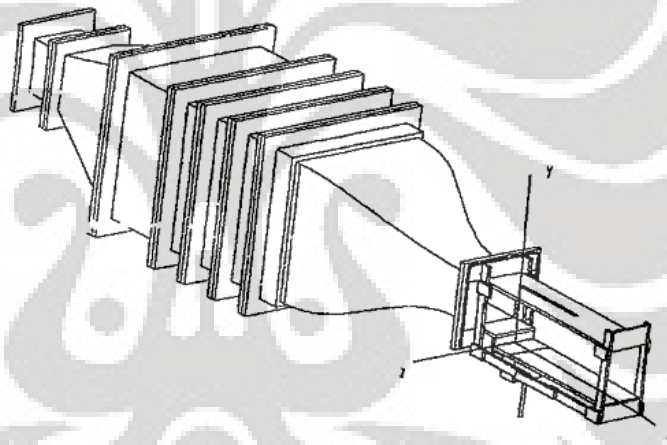


Gambar 3.3 *Blower* Sentrifugal

Untuk lebih memudahkan proses visualisasi, blower dihubungkan dengan sebuah *voltage regulator* sehingga mampu bekerja dalam *range* tegangan yang lebih luas (tegangan kurang dari 220v). Kemudian kecepatan blower dikalibrasi pada setiap perubahan bukaan sudut bagian *suction* dan setiap kenaikan 5v.

### 3.1.2 *Wind Tunnel* Skala Kecil

Selain untuk mengarahkan aliran udara dari *blower* menuju *test section*, alat ini juga berfungsi untuk menghasilkan aliran udara (*free stream*) dengan profil kecepatan yang seragam (*top head*) pada sisi keluarannya serta memiliki luasan yang telah disesuaikan dengan sisi masukan *test section*.



Gambar 3.4 *Wind Tunnel* skala kecil

Seperti halnya yang ditunjukkan pada Gambar 3.2, alat ini terdiri dari beberapa bagian, antara lain :

➤ Penyearah aliran (*straightener*)

Bagian ini berfungsi untuk menyearahkan aliran udara yang disuplai oleh *blower*. Terdapat dua bagian penyearah, bagian pertama terletak pada bagian awal yaitu saat udara memasuki *wind tunnel*, terjadi perubahan penampang dari lingkaran menjadi persegi, bagian kedua terletak setelah aliran udara melewati *diffuser*. Penyearah yang kedua memiliki dimensi yang lebih besar. Untuk menyearahkan

aliran ini, digunakan sedotan plastik yang disusun di dalam penyearah tanpa menyisakan jarak sehingga tidak ada ruang kosong.

➤ *Difusser*

Bagian ini berfungsi untuk mengurangi kecepatan aliran udara sehingga mengurangi sifat turbulensinya. Hal ini sengaja dilakukan agar udara yang akan memasuki *test section* diharapkan sudah tidak turbulen lagi melainkan laminar. Letak *diffuser* berada tepat setelah penyearah bagian pertama

➤ Lapisan Penyekat (*screens*)

Bagian ini berfungsi untuk mengurangi turbulensi aliran udara. Terletak di antara setiap bagian *wind tunnel*, berupa lapisan penyekat (*meshwire*) yang berukuran 18 lubang per inchi<sup>2</sup>. Diharapkan turbulensi udara yang memasuki *converging nozzle* cukup kecil sehingga dapat dikatakan dalam kondisi laminar.

➤ *Converging Nozzle*

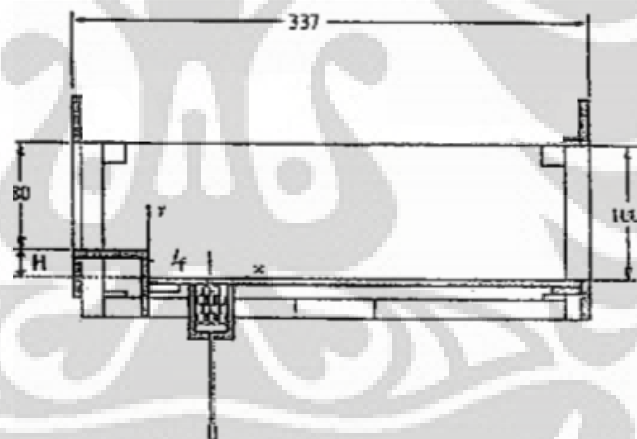
Bagian ini merupakan bagian paling akhir dan yang paling penting dari desain *wind tunnel* skala kecil ini. Diharapkan aliran udara yang telah melalui *wind tunnel* ini berada dalam kondisi laminar dengan kecepatan yang seragam. *Nozzle* ini memiliki *contraction ratio* sebesar 9,5 : 1.

➤ *Settling Chamber*

Bagian ini berisi segmen – segmen dari *wind tunnel* yang dipisahkan oleh lapisan penyekat (*screens*). Bagian – bagian ini dapat dibongkar pasang sehingga dapat memungkinkan untuk melakukan perbaikan maupun pembersihan secara berkala.

### 3.1.3 Test Section

Berfungsi sebagai tempat dilakukannya pengambilan data yang memanfaatkan visualisasi berkecepatan sangat tinggi berbasis lembar cahaya. Dibuat dari pelat kuningan dengan tebal 5 mm, memiliki panjang total 337 mm dengan luas penampang sisi *inlet*  $80 \times 80 \text{ mm}^2$  dan  $80 \times 125 \text{ mm}^2$  pada sisi *outlet*. Ketinggian tangga ( $H$ ) dapat diubah – ubah dengan menggunakan alat dongkrak ulir dan terdapat celah melintang pada bagian dasar dengan dimensi panjang 70 mm dan lebar 1,5 mm. Celah ini yang kemudian digunakan sebagai tempat injeksi udara panas dari *heater*. Jarak injeksi ( $l_f$ ) yaitu 40 mm ( $2H$ ) dan 80 mm ( $4H$ ) dari tangga, *reattachment point* terletak di jarak sekitar  $5,5H$ . Pada sisi kiri dan kanan dari *test section* digunakan kaca tahan panas (*pyrex*), sedangkan pada sisi atas digunakan kaca biasa.



Gambar 3.5 Test section

### 3.1.4 Kompresor

Kompresor digunakan untuk mengalirkan udara bertekanan yang hendak dipanaskan melalui *heater*. Kecepatan udara injeksi yang mengalir dengan bantuan kompresor diatur menggunakan manometer kapiler yang berisi air dan raksa. Sebelum melaksanakan penelitian, kecepatan udara injeksi telah dikalibrasi terlebih dahulu dengan menggunakan *hot wire anemometer*.

### 3.1.5 *Heater*

Injeksi udara panas yang nantinya akan dimanfaatkan sebagai eksitasi eksternal, dipanaskan menggunakan *heater* ini. *Heater* yang dirancang khusus ini mampu menghasilkan udara panas dengan temperatur hingga 800°C dengan daya 2000 W. Dengan menggunakan sebuah *thermocontrol analog* maka temperatur *heater* dapat diatur agar udara panas yang dihasilkan dapat sesuai dengan kondisi percobaan. Setelah melalui *heater*, injeksi udara panas akan melewati slot injeksi yang berupa wadah yang berisi bola – bola baja. Hal ini dimaksudkan agar aliran udara injeksi yang masuk ke dalam *test section* merata di sepanjang celah.



Gambar 3.6 *Heater*

### 3.1.6 *Nebulizer*

Alat ini pada umumnya digunakan pada bidang kesehatan, yaitu sebagai alat untuk mengkabutkan obat penyakit asma. Alat ini berfungsi untuk membuat droplet – droplet yang disuplai ke dalam *wind tunnel* dan nantinya akan diamati dengan visualisasi berkecepatan tinggi berbasis lembar cahaya menggunakan *high speed video camera* sebagai partikel dari aliran udara pada *test section*. Fluida yang digunakan untuk dibuat dropletnya pada penelitian ini adalah *olive oil* (minyak zaitun). Suplai droplet ini

diinjeksikan menggunakan kompresor tersendiri pada bagian *converging nozzle* menggunakan selang berukuran 1/8 inci.



Gambar 3.7 Nebulizer

Tabel 3.1 Spesifikasi *Nebulizer*

Model	OMRON, NE-C28
Type	Non-heating compressor nebulizer
Electrical	230V, 50Hz model; 230V, 60Hz model
Power Consumption	138VA
Nebulizer Rate	0,4 ml/min (without cap)
Particle Size	MMD approximately 5 $\mu$ m
Medication Cup Capacity	7 ml max.
Appropriate Medication Quantities	2 - 7 ml
Operating Temperatur/Humidity	10C to 40C, 30% to 85% RH
Storage Temperature/Humidity	20C to 60C, 10% to 95% RH
Weight	approx. 1,9kg (compressor only)
Dimensions	approx. 170mm (w) x 103mm (h) x 182mm (d)
Contents	compressor, nebulizer kit, air tube, 5 pcs. Replacement filters, mouthpiece, adult mask, vchild mask, carrying bag, instruction manual

### 3.1.7 *High Speed Video Camera*

Alat ini berfungsi untuk memperoleh visualisasi aliran kecepatan tinggi pada *test section*, dengan spesifikasi 4000 *frame/detik*, *shutter speed* 1/4000 detik. Visualisasi yang diperoleh berukuran 480x640 dalam bentuk format .avi dan resolusi 280 dpi. Diletakkan

menghadap *test section* dari sisi samping dan dihubungkan ke laptop untuk menampilkan visualisasi yang diperoleh. Untuk memproses hasil visual yang telah ditangkap, dibutuhkan perangkat lunak *VITCAM*



Gambar 3.8 *High speed video camera*

### 3.1.8 *Voltage Regulator*

Alat ini berfungsi untuk mengatur beda tegangan listrik yang hendak digunakan pada suatu alat. Jangkauan tegangan listrik yang dapat diatur dengan menggunakan alat ini menjadi lebih luas namun tetap tidak dapat melebihi jangkauan maksimum tegangan yang diperbolehkan pada alat yang diatur tegangannya oleh *voltage regulator*. Pada penelitian kali ini, *voltage regulator* digunakan pada alat *blower* untuk mempermudah mengatur kecepatan yang diinginkan.



Gambar 3.9 *Voltage regulator*

### 3.1.9 *Dark Room*

Bagian ini terdiri dari kerangka *dark room*, lampu merkuri, kain beludru, dan penampang bercelah Untuk memperoleh visualisasi yang memadai untuk diamati dan dianalisa, dibutuhkan suatu kondisi sistem tempat pengambilan visualisasi yang gelap gulita sehingga satu – satunya sumber cahaya hanya berasal dari lampu merkuri 400 W yang setara dengan lampu halogen 1000 W. Penampang bercelah yang terbuat dari alumunium/seng berfungsi untuk menciptakan lembar cahaya yang ketebalannya tidak lebih dari 1 mm. Hal ini dimaksudkan untuk memperoleh hasil visual yang cukup sederhana untuk melakukan analisa secara dua dimensi saja. Sedangkan kain beludru berfungsi untuk mencegah masuknya sumber cahaya lain dari luar sistem selain cahaya lampu halogen. Diharapkan melalui *dark room* yang diatur sedemikian rupa, diperoleh visualisasi berkecepatan tinggi berbasis lembar cahaya sesuai dengan tujuan dari penelitian ini sehingga memungkinkan untuk melakukan pengkajian secara lebih dalam.



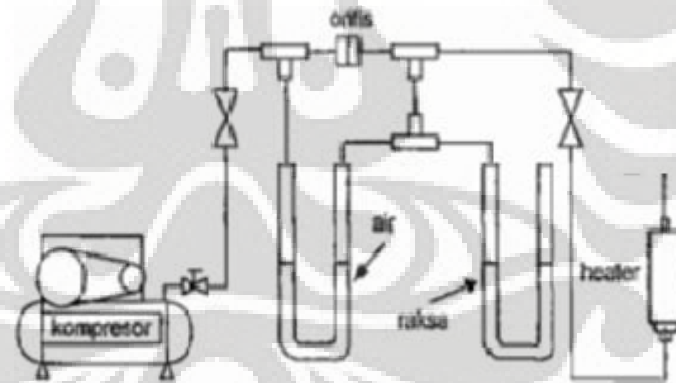
Gambar 3.10 *Dark room*



## 3.2 Peralatan Pengukuran

### 3.2.1 Manometer Kapiler

Berfungsi untuk mengukur kecepatan aliran udara dari kompresor yang akan dialirkan menuju *heater*. Sebelum melakukan proses pengambilan data, dilakukan kalibrasi terlebih dahulu dengan menggunakan *hot wire anemometer*. Udara yang akan dialirkan menuju *heater*, sebelumnya akan melalui manometer kapiler yang terdiri dari satu manometer berisi air dan satu manometer berisi raksa cair. Akan muncul perbedaan ketinggian permukaan air pada manometer yang dapat dibaca. Untuk memperoleh data kalibrasi, pada setiap terdapat perubahan perbedaan ketinggian permukaan air sebanyak 10 mm, maka akan terlihat nilai pada *hot wire anemometer*. Dari data kalibrasi tersebut, maka kemudian dapat dibuat grafik serta persamaan garisnya.



Gambar 3.11 Kalibrasi Manometer Kapiler

### 3.2.2 Termokopel Digital

Berfungsi untuk mengukur temperatur udara panas yang diinjeksikan melalui *heater*. Temperatur udara panas yang akan digunakan sebagai eksitasi eksternal, terlebih dahulu dikalibrasi menggunakan termokopel ini. Dengan menggunakan data hasil kalibrasi, maka dapat diketahui perbedaan antara temperatur yang

diatur dengan menggunakan *thermocontrol analog* dengan temperatur injeksi udara panas yang terukur.

### 3.2.3 *Hot Wire Anemometer*

Berfungsi untuk mengukur kecepatan udara yang dihasilkan oleh blower. Diletakkan pada bagian masukan *test section*.

## 3.3 **Prosedur Penelitian**

Di dalam penelitian ini, rasio momentum spesifik menjadi salah satu parameter yang sangat penting. Rasio tersebut merupakan perbandingan antara momentum spesifik injeksi udara panas dengan momentum spesifik udara suplai. Agar proses pengambilan data dapat dikatakan tepat, maka pengaturan kecepatan blower, kecepatan serta temperatur injeksi harus dilakukan sehingga didapatkan perbandingan momentum spesifik yang diharapkan. Rasio momentum spesifik tersebut dapat dilambangkan dengan persamaan berikut :

$$I = \frac{\rho_i x V_i^2}{\rho_o x V_o^2} \dots \dots \dots (3.1)$$

$I$  = *Rasio Momentum Spesifik*

$V_i$  = *Kecepatan Injeksi*                       $\rho_i$  = *Massa Jenis Udara Injeksi*

$V_o$  = *Kecepatan Udara Suplai*             $\rho_o$  = *Massa Jenis Udara Suplai*

Prosedur – prosedur yang perlu ditempuh sebelum melakukan pengambilan data, antara lain :

a) Pengaturan Kecepatan Blower dan Kecepatan Injeksi

Kecepatan *blower* didapatkan dengan mengatur sudut bukaan pada bagian *suction* dari *blower* dan ditambah dengan kombinasi dari penggunaan *voltage regulator*. Sebelumnya, telah dilakukan kalibrasi dengan menggunakan *hot wire anemometer*. Sedangkan untuk kecepatan injeksi udara panas diperoleh dengan mengatur ketinggian permukaan air pada manometer kapiler, yang sebelumnya juga telah dilakukan kalibrasi terlebih dahulu. Kedua nilai kecepatan ini yang kemudian divariasikan dan dimasukkan ke dalam persamaan 3.1 sehingga memperoleh nilai rasio momentum spesifik sebesar 0,1 dan 0,5.

b) Pengaturan Temperatur Injeksi

Udara panas dihasilkan oleh udara dari kompresor yang dialirkan melalui *heater*. *Heater* tersebut telah dilengkapi dengan *thermocontrol analog* sehingga memungkinkan untuk mengatur temperaturnya. Untuk memperoleh temperatur yang telah relatif stabil, maka perlu waktu untuk menunggu sekitar 15 s/d 30 menit apabila temperatur telah diatur menggunakan *thermocontrol analog*. *Thermocontrol analog* yang digunakan adalah jenis *on – off*, artinya *heater* akan bekerja dengan cara menyala pada saat mencapai temperatur batas bawah dan akan mati pada saat mencapai temperatur batas atas secara otomatis. Aliran udara yang berasal dari kompresor harus terus dialirkan selama *heater* menyala. Sebelumnya dilakukan kalibrasi dengan termokopel digital. Pengambilan data baru dapat dilakukan apabila temperatur sudah relatif stabil

c) Pengaturan *Nebulizer* dan Pencahayaan

*Nebulizer* sebagai penghasil partikel – partikel yang nantinya akan divisualisasikan, diharapkan dapat menghasilkan visualisasi partikel yang cukup pekat namun dengan pengaruh yang sangat kecil terhadap kecepatan *main air flow* sehingga dapat diabaikan. Hal ini untuk memudahkan analisa dan pengolahan data selanjutnya, oleh karena itu digunakanlah bantuan *voltage regulator*. Sedangkan untuk pencahayaan, harus diusahakan agar sumber cahaya yang ada hanyalah dari *light sheet* yang telah dibentuk dari konfigurasi *dark room*, tidak boleh terdapat sumber

cahaya yang lain. Hal ini dikarenakan dapat menyebabkan visualisasi yang dihasilkan terganggu oleh adanya sumber cahaya lain sehingga citra partikel aliran yang tertangkap tidak cukup kontras.

d) Pengaturan *High Speed Video Camera* Dan *Video Camera*

Konfigurasi baik dari *high speed video camera* maupun *video camera*, menjadi hal yang sangat penting dalam proses pengambilan data, oleh karena itu perlu dipersiapkan dengan sebaik mungkin. Konfigurasi ini antara lain meliputi jarak *camera* dari *test section*, tingkat fokus lensa, besar bukaan diafragma (digunakan bukaan yang paling besar), *shutter speed*, lama waktu pengambilan, serta pengaturan tampilan video pada *laptop*. Pada penelitian kali ini, *shutter speed* yang digunakan saat pengambilan data menggunakan *high speed video camera* yaitu 62 *fps* dengan jumlah *frame* yang hendak diambil masing – masing adalah 1000 *frame*. Sedangkan untuk pengambilan data menggunakan *video camera* biasa, *shutter speed* yang digunakan yaitu 25 *fps*. Apabila semua prosedur telah dilakukan, proses pengambilan data baru dapat dilakukan.

e) Pengolahan Citra

Data yang diperoleh dari hasil penelitian merupakan data berupa video. Data berupa video ini kemudian akan dipecah menjadi gambar atau citra sebelum dilakukan pengolahan data. Agar dapat diolah dan dianalisa secara lebih memadai, perlu dilakukan pengolahan citra (*image processing*) menggunakan perangkat lunak. Oleh karena pengambilan data citra menggunakan baik *video camera* biasa dan *high speed video camera*, maka pengolahan citra pun dilakukan untuk kedua jenis. Pengolahan citra yang dilakukan bertujuan untuk memperjelas pencitraan partikel aliran yang tertangkap, hal ini disebabkan karena akan sangat sulit untuk mengolah data tanpa memperjelas partikel asap terlebih dahulu karena citra yang dihasilkan dengan menggunakan pencahayaan yang digunakan menghasilkan citra partikel aliran yang relatif tipis sehingga sulit dilihat dengan kasat mata. Terlebih lagi untuk video yang ditangkap menggunakan *high speed video camera*, video yang dihasilkan memiliki

tingkat intensitas cahaya yang sangat rendah, akan sangat sulit untuk diolah lebih lanjut apabila partikel aliran tidak diperjelas terlebih dahulu.

### 3.4 Kondisi Percobaan

Kondisi percobaan dilakukan dengan menginjeksikan udara melalui celah sempit dari bagian bawah *test section*. Variasi dari pengujian ini dapat sebagai berikut :

Tabel 3.2 Kondisi Percobaan

Jarak Injeksi ( $I_f$ )	Rasio Spesifik Momentum ( $I$ )	Kec. Aliran Udara ( $v_0$ ) Temperatur Dingin ( $t_0$ )	Kec.Injeksi ( $v_i$ ) Temperatur Injeksi ( $t_{inj}$ )
80 mm	0,1	1,2 m/s dan 30 <sup>0</sup> C 2,5 m/s dan 30 <sup>0</sup> C	0,42 m/s dan 100 <sup>0</sup> C 0,78 m/s dan 300 <sup>0</sup> C
	0,5	1,2 m/s dan 30 <sup>0</sup> C 2,5 m/s dan 30 <sup>0</sup> C	0,94 m/s dan 100 <sup>0</sup> C 2,5 m/s dan 300 <sup>0</sup> C

Tabel 3.3 Densitas Udara

Temp ( <sup>0</sup> C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )
30° Celcius	1.165 kg/m <sup>3</sup>
100° Celcius	0.9461 kg/m <sup>3</sup>
300° Celcius	0.6159 kg/m <sup>3</sup>

## **BAB 4**

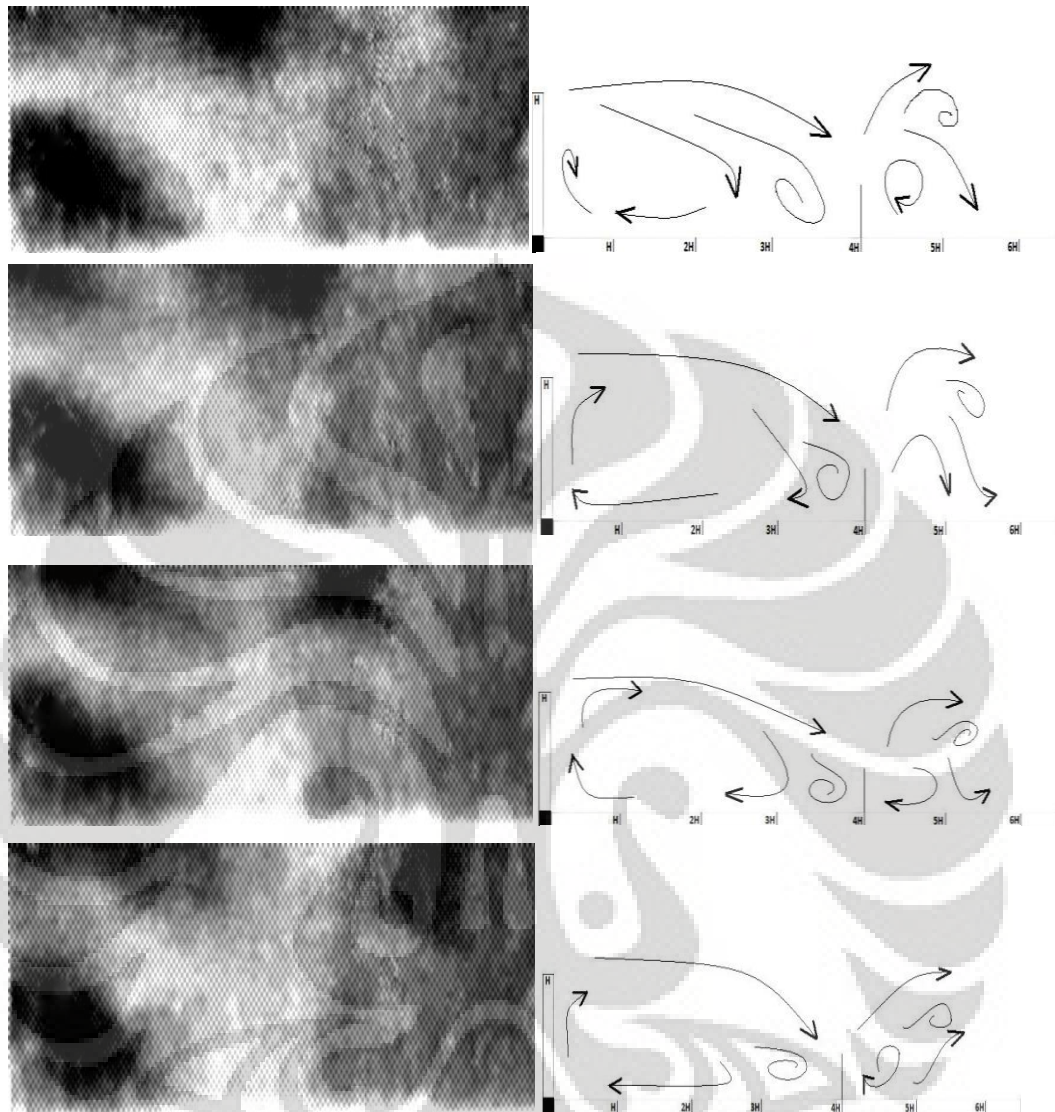
### **PEMBAHASAN**

Setelah melaksanakan eksperimen maka akan diperoleh hasil berupa data gambar, baik hasil dari penggunaan *video camera* biasa maupun *high speed video camera*. Gambar yang telah melalui proses pengolahan citra, lebih lanjut lagi akan dianalisa baik secara kualitatif maupun kuantitatif. Analisa akan dilakukan terhadap setiap parameter yang mempengaruhi kondisi percobaan, yaitu terhadap perubahan nilai rasio momentum injeksi, temperatur gas injeksi, dan perubahan ketinggian step. Dengan melakukan analisa baik secara kualitatif dan kuantitatif, maka dapat dipelajari secara lebih mendalam mengenai pola aliran resirkulasi yang terbentuk. Analisa secara garis besar akan dibedakan berdasarkan ketinggian step yang digunakan serta lebih memfokuskan pembahasan pada struktur aliran yang terjadi pada wilayah *upstream* (wilayah sebelum letak injeksi) dan wilayah *downstream* (wilayah setelah letak injeksi)

#### **4.1 Analisa Kualitatif**

Analisa secara kualitatif akan mengacu pada penilaian terhadap gambar pola aliran yang terbentuk yang dapat diamati. Dari gambar yang telah diproses tersebut kemudian dicoba untuk diilustrasikan secara garis besar aliran yang terbentuk. Bentuk serta arah pergerakan aliran akan menjadi hal - hal yang penting untuk diperhatikan. Lebih lanjut lagi, pembahasan mengenai analisa kualitatif akan dibedakan berdasarkan ketinggian step yang digunakan dalam kondisi percobaan.

### 4.1.1 Ketinggian Step 20 mm

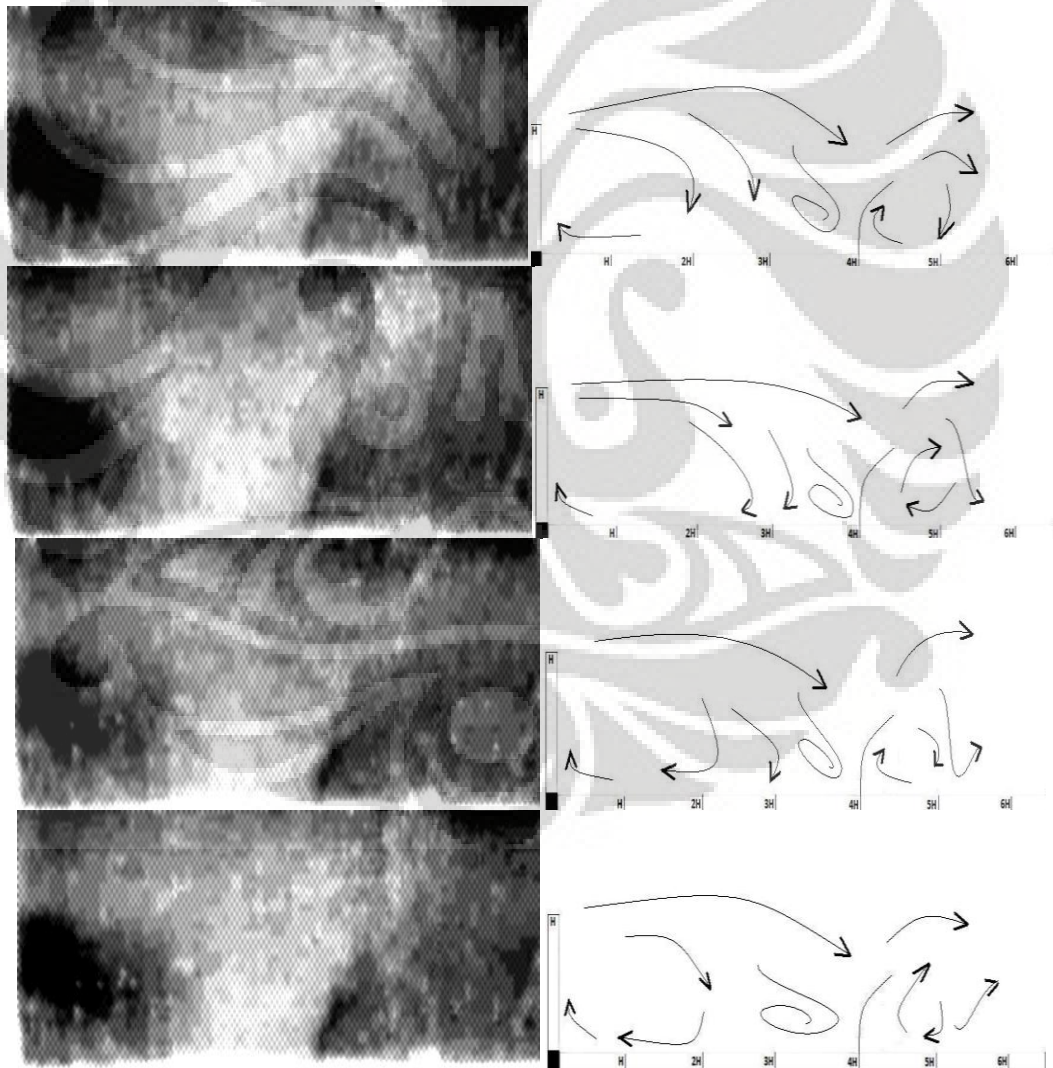


Gambar 4.1 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 100 °C

Pada kondisi eksperimen dengan rasio momentum injeksi 0,1 dan temperatur injeksi 100 °C, aliran resirkulasi yang terbentuk di daerah *upstream* tidak begitu kuat dan merata. Hal ini menyebabkan terbentuknya wilayah palung dimana partikel aliran tidak mencapai wilayah tersebut. Wilayah partikel aliran yang paling terang menunjukkan wilayah tempat terbentuknya pola

aliran dengan tingkat turbulen yang paling tinggi. Dalam kondisi ini, wilayah dengan tingkat turbulen yang paling tinggi yaitu di sekitar wilayah *shear layer*.

Aliran resirkulasi yang terbentuk di wilayah *downstream* cukup merata sehingga tidak terbentuk wilayah palung seperti yang terjadi pada wilayah *upstream*. Meskipun demikian, aliran resirkulasi di wilayah *downstream* dapat dikatakan tidak begitu kuat karena tidak terdapat wilayah dengan intensitas turbulen yang tinggi. Bentuk dari injeksi gas panas melengkung. Hal ini disebabkan oleh *bow effect* meskipun tidak begitu kuat.

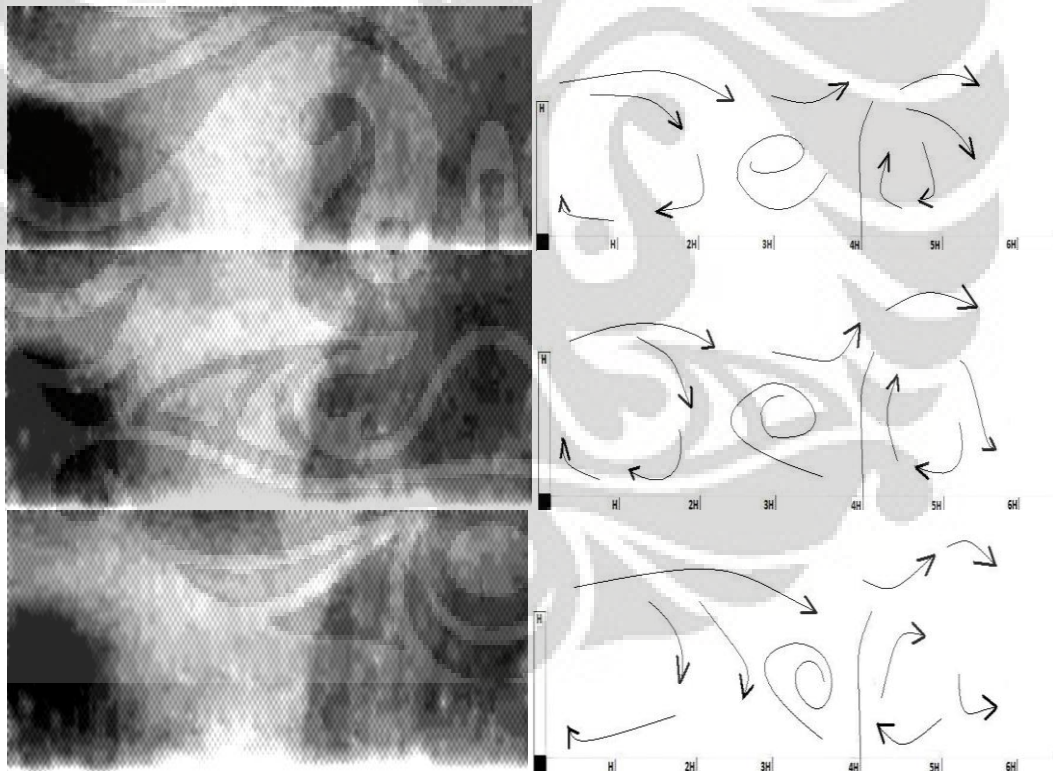


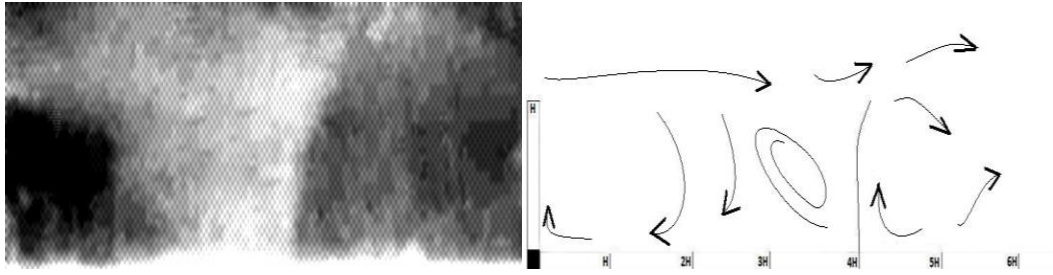
Gambar 4.2 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 300 °C



Kenaikan temperatur injeksi gas panas pada kondisi percobaan ini, menghasilkan aliran resirkulasi di wilayah *upstream* yang tidak begitu berbeda dengan kondisi percobaan dengan temperatur injeksi 100 °C. Masih terbentuk wilayah palung yang relatif luas. Sedangkan untuk wilayah dengan tingkat turbulen yang paling tinggi terdapat pada wilayah *shear layer* yang berada paling dekat dengan letak injeksi dan yang terletak di atas injeksi.

Seperti halnya pada kondisi percobaan dengan temperatur injeksi 100 °C, aliran resirkulasi yang terbentuk di wilayah *downstream* tidak jauh berbeda. Yang sedikit membedakan adalah meluasnya wilayah kosong yang terletak tepat setelah injeksi. Hal ini diakibatkan karena meningkatnya *barrel effect*, sedangkan kelengkungan serta tinggi aliran injeksi masih tidak jauh berbeda.

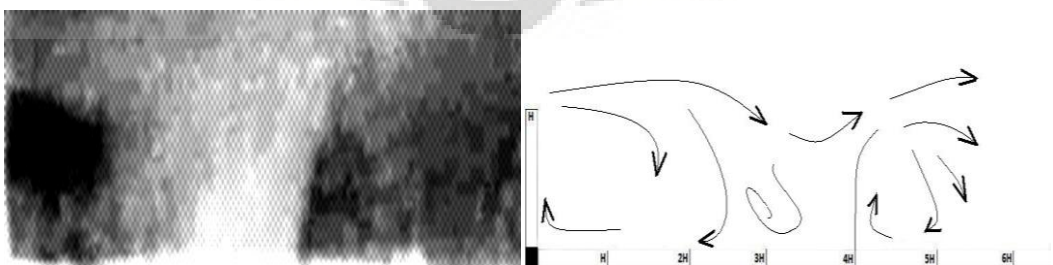


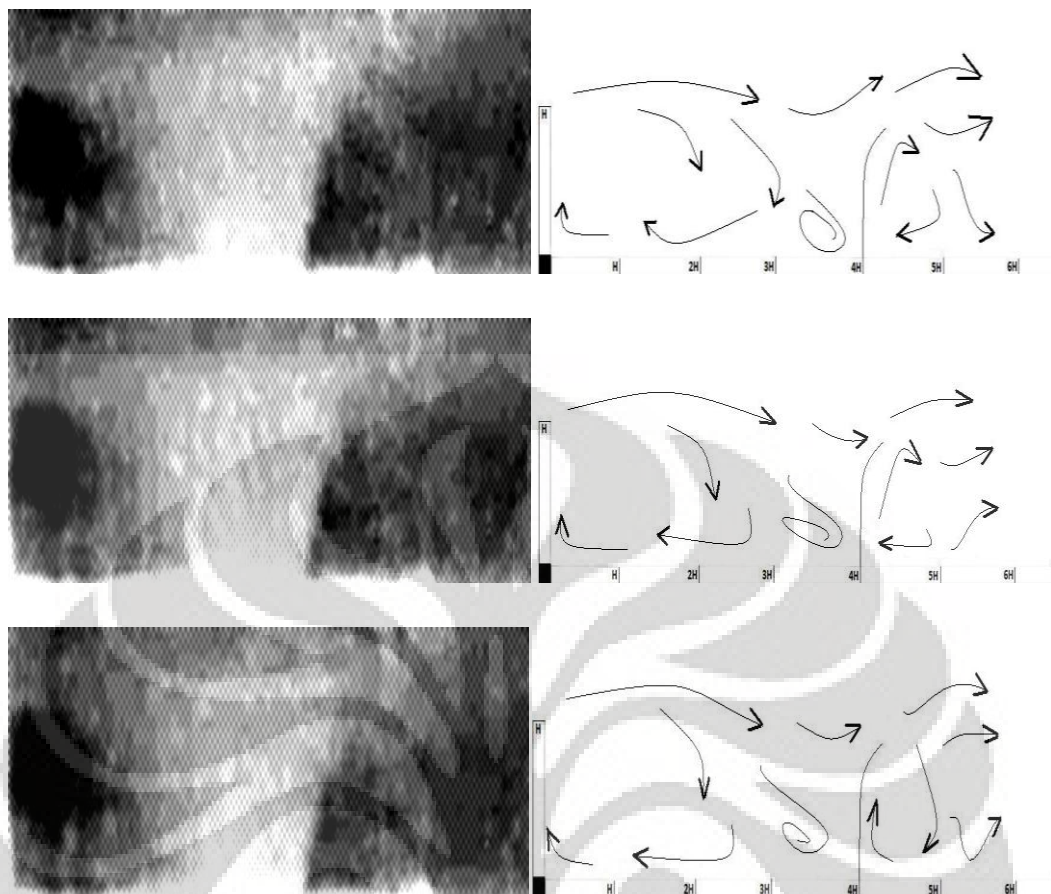


Gambar 4.3 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 100 °C

Kenaikan rasio momentum injeksi dari 0,1 ke 0,5 menyebabkan pola aliran resirkulasi yang terbentuk pada wilayah *upstream* akan menjadi lebih kuat. Hal ini diakibatkan karena *block effect* yang timbul semakin kuat, sehingga kemampuan aliran injeksi untuk menembus *shear layer* akan meningkat. Bila hal ini terjadi, maka akan semakin banyak partikel aliran yang tertahan dan kemudian mengarah ke wilayah *upstream* membentuk aliran resirkulasi. Lebih lanjut lagi, wilayah dengan tingkat turbulen yang tinggi semakin meluas.

Dengan menggunakan rasio momentum injeksi 0,5, maka partikel aliran yang bergerak menuju wilayah *downstream* akan berkurang. Oleh karena itu aliran resirkulasi yang terbentuk pun akan melemah. Bentuk aliran injeksi pun berubah menjadi lebih tegak. Dengan kata lain, *bow effect* menjadi berkurang.





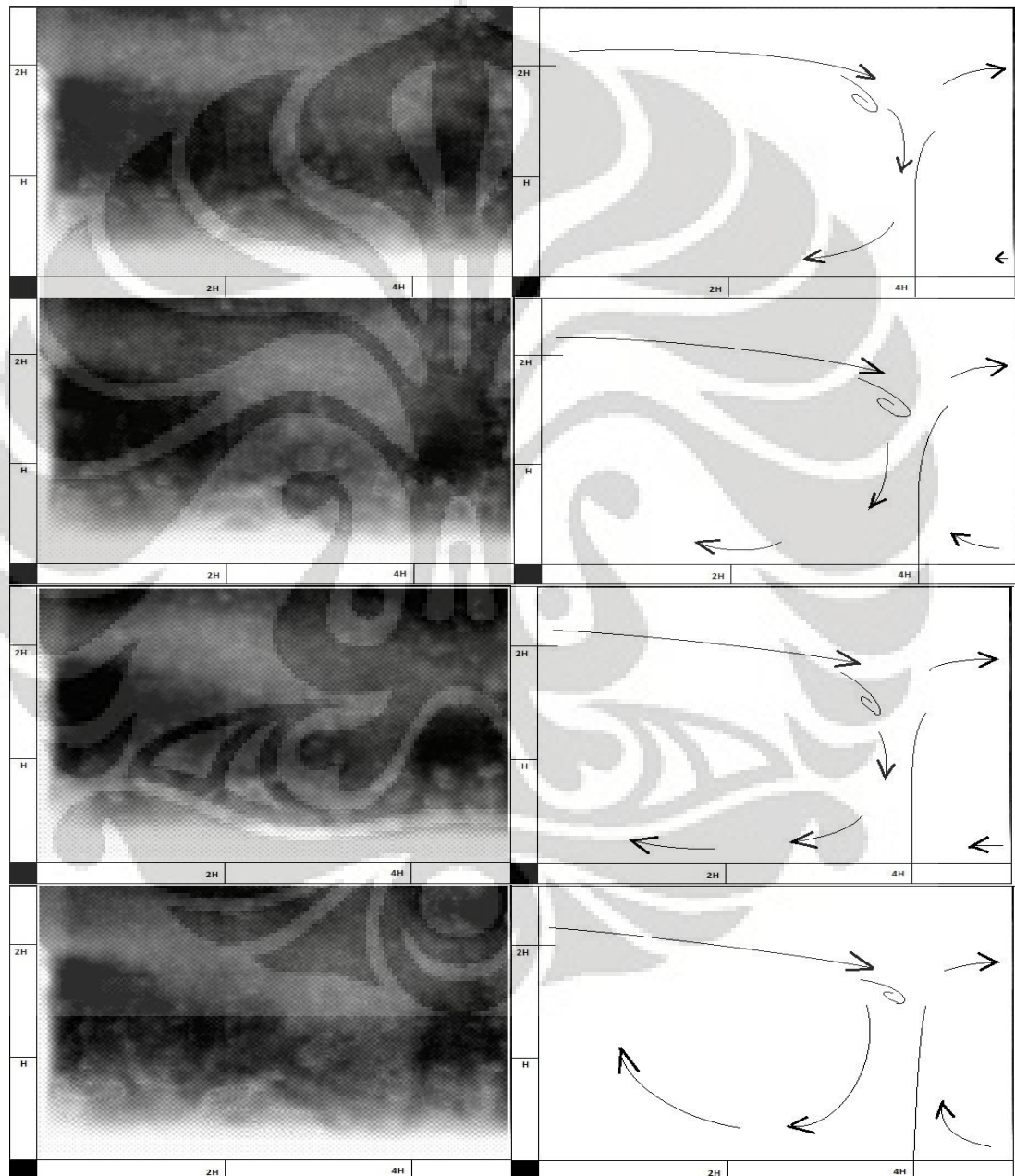
Gambar 4.4 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 300 °C

Di antara semua kondisi percobaan dengan menggunakan ketinggian step H, kondisi percobaan dengan rasio momentum injeksi 0,5 dan temperatur injeksi 300 °C akan menghasilkan aliran resirkulasi pada wilayah *upstream* yang paling kuat. Hal ini dapat diamati dari luas wilayah palung yang terbentuk serta tingkat kecerahan yang terbentuk di *shear layer*.

Berbanding terbalik dengan wilayah *upstream*, aliran resirkulasi yang terbentuk pada wilayah *downstream* merupakan yang paling lemah bila dibandingkan dengan kondisi percobaan dengan rasio momentum injeksi dan temperatur yang lebih rendah. Hal ini dapat terjadi karena aliran injeksi yang terjadi semakin

mampu menembus *shear layer (block effect)*, serta meningkatnya *barrel effect*. Bentuk dari aliran injeksi yang terbentuk juga semakin tegak.

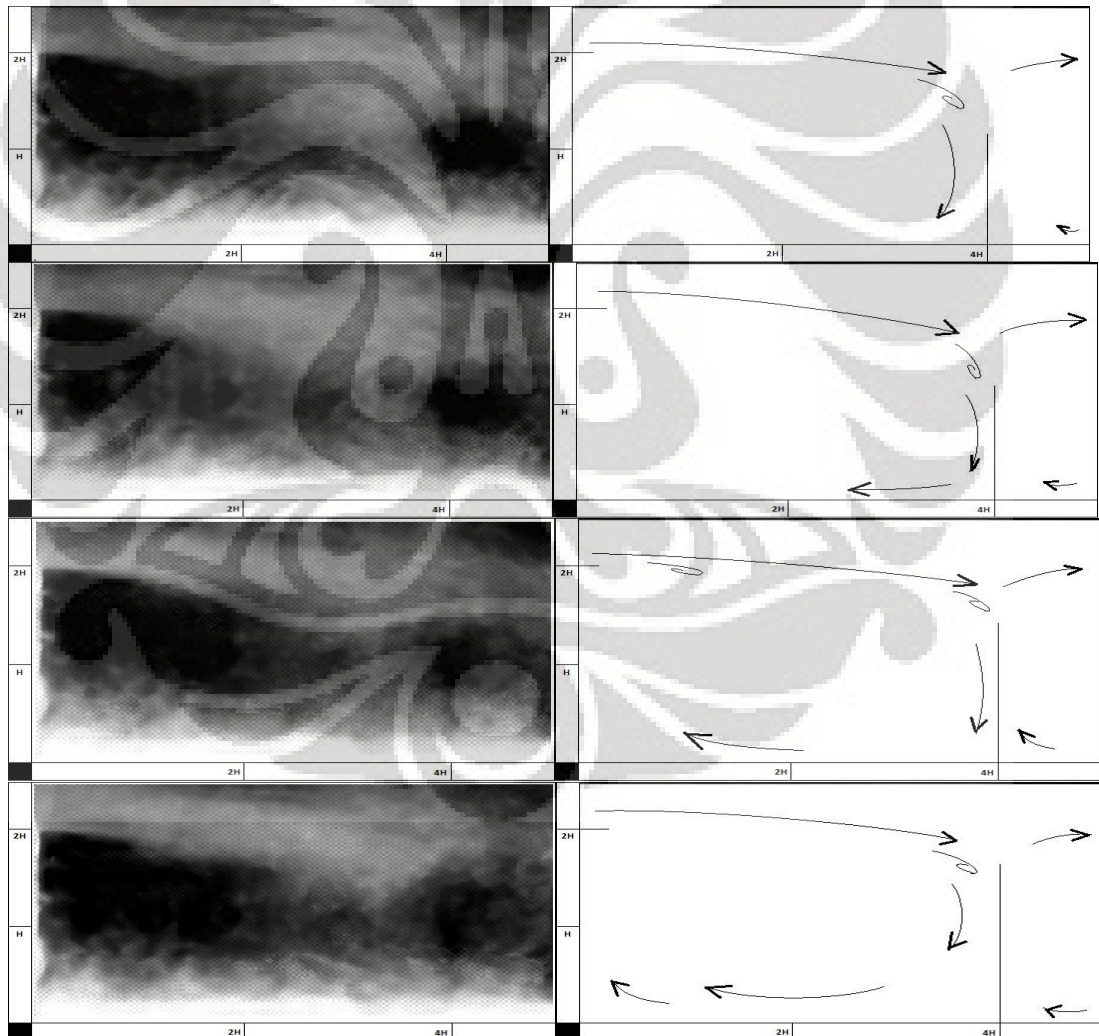
#### 4.1.2 Ketinggian Step 40 mm



Gambar 4.5 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 100 °C

Aliran resirkulasi yang terbentuk pada wilayah *upstream* dapat dikatakan lemah sebab wilayah palung yang terbentuk relatif luas. Selain itu, wilayah aliran *separated - reattaching* yang terbentuk memiliki tingkat intensitas turbulen yang relatif rendah hampir pada setiap bagian struktur aliran.

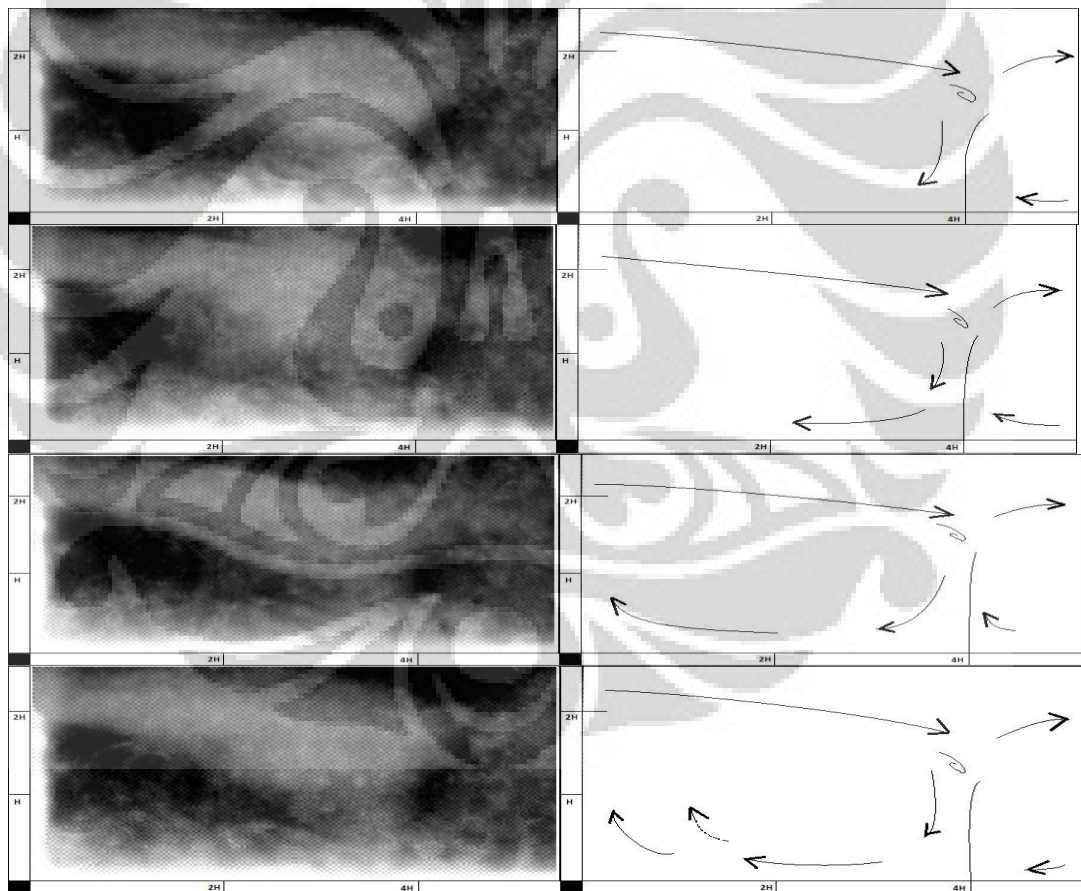
Pada wilayah *downstream*, terbentuk palung yang disebabkan oleh aliran resirkulasi yang tidak begitu kuat dan tidak merata. Pola dari aliran injeksi yang terbentuk cukup melengkung (*bow effect*).



Gambar 4.6 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 300 °C

Penggunaan temperatur injeksi yang lebih tinggi, menyebabkan tingkat intensitas turbulen yang terbentuk, baik pada aliran resirkulasi maupun *shear layer*, meningkat. Meskipun begitu, palung yang terbentuk pada wilayah *upstream*, masih dapat dikatakan relatif luas.

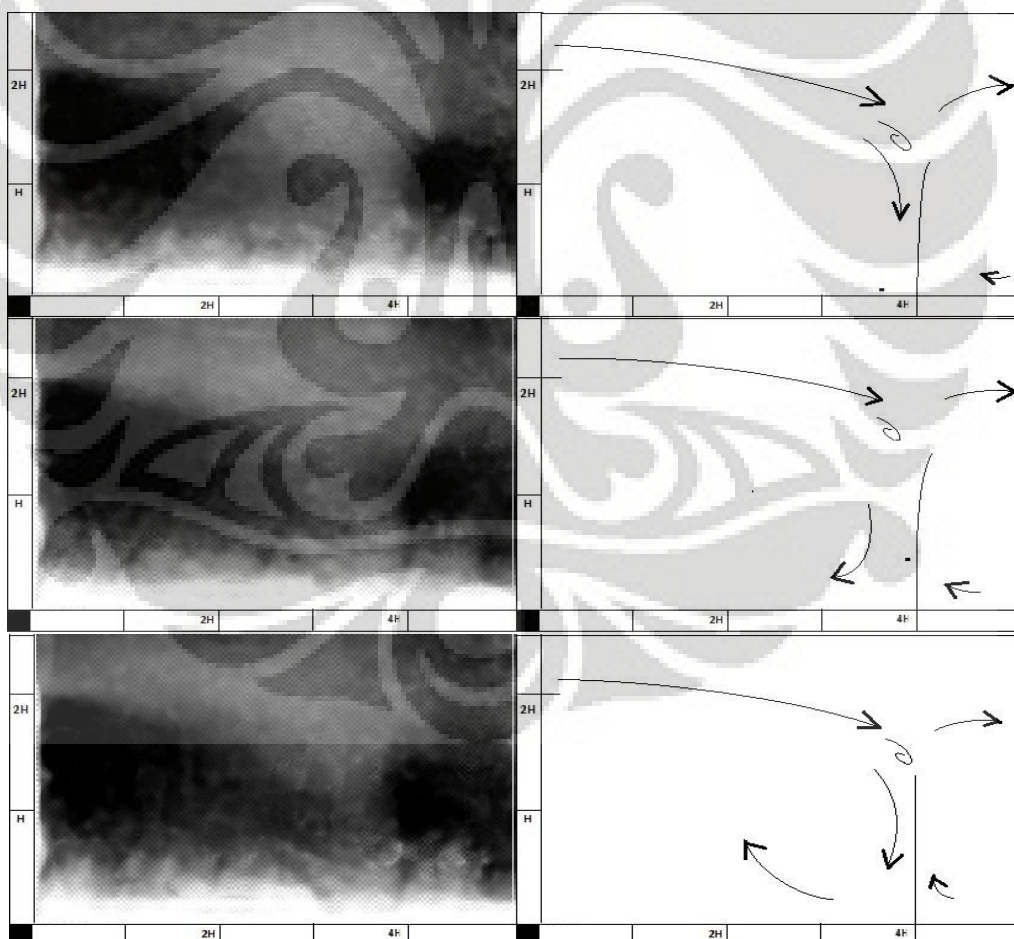
Bentuk dari aliran injeksi tidak begitu jauh berbeda dengan kondisi dengan temperatur 100 °C. Yang membedakan adalah terjadinya *barrel effect* yang lebih kuat. Hal ini menyebabkan wilayah palung yang terbentuk pada wilayah *downstream* menjadi semakin jelas terlihat.



Gambar 4.7 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 100 °C

Perubahan rasio momentum injeksi dari 0,1 menjadi 0,5 menyebabkan bentuk injeksi semakin tegak. Aliran injeksi akan semakin mampu untuk menembus *shear layer*, sehingga *block effect* akan meningkat. Terlihat bahwa aliran resirkulasi yang terbentuk pada wilayah *upstream* menjadi relatif lebih kuat.

Tingkat intensitas turbulen yang relatif paling tinggi, terdapat pada wilayah *shear layer*. Hal ini dapat terjadi karena semakin banyak partikel aliran yang terhalang oleh injeksi, kemudian bergerak menuju ke arah *upstream* membentuk aliran resirkulasi. Aliran resirkulasi yang terbentuk pada wilayah *downstream* menjadi semakin kuat sehingga wilayah palung yang terbentuk semakin mengecil.



Gambar 4.8 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 300 °C

Kondisi percobaan dengan memanfaatkan kenaikan rasio momentum injeksi dan temperatur injeksi menghasilkan aliran resirkulasi pada wilayah *upstream* yang cukup kuat. Meskipun begitu, wilayah palung yang terbentuk di wilayah *upstream* masih dapat dikatakan luas. Persebaran tingkat intensitas turbulen yang dihasilkan cukup merata.

Wilayah palung yang dihasilkan pun juga demikian, kondisi percobaan dengan rasio momentum injeksi 0,5 dan temperatur injeksi 300 °C semakin jelas dan relatif luas. Hal ini dapat terjadi karena terjadinya peningkatan *block effect* dan *barrel effect* pada aliran injeksi. Bentuk aliran injeksi menjadi lebih tegak karena aliran injeksi semakin mampu menembus *shear layer*, dan *barrel effect* mengakibatkan wilayah kosong yang terbentuk tepat setelah injeksi menjadi semakin luas.

## 4.2 Analisa Kuantitatif

Hasil yang diperoleh berupa data gambar yang telah mengalami pemrosesan kemudian akan dianalisa lagi dari segi kuantitatif. Analisa ini dapat untuk dilakukan karena memanfaatkan nilai tingkat kecerahan dari data gambar yang telah diperoleh. Nilai tingkat kecerahan yang akan diukur terdiri dari tiga unsur warna dasar, yaitu merah (*Red*), hijau (*Green*), dan biru (*Blue*) atau yang lebih dikenal dengan sebutan *RGB Value*.

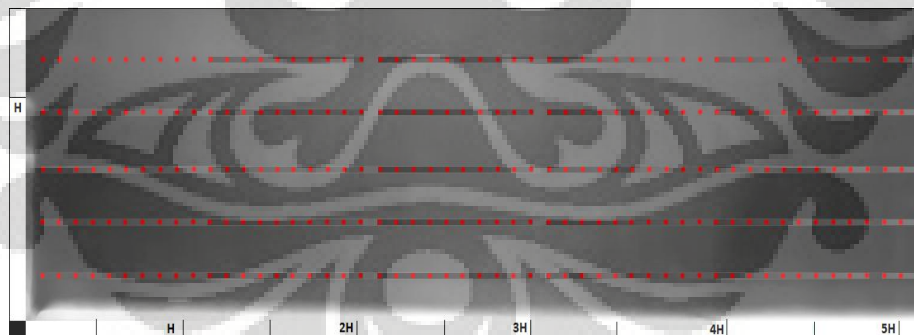
Yang akan menjadi acuan dasar perbandingan nilai *RGB Value* adalah kondisi percobaan dimana tidak memanfaatkan injeksi gas panas. *RGB Value* diperoleh melalui pengukuran pada titik - titik yang telah ditentukan terlebih dahulu ditentukan jarak dan jumlah titik pengukuran (*Scaling*). Jarak antar titik pengukuran adalah 2 mm secara horizontal dengan jumlah posisi secara vertikal yaitu lima buah posisi, yaitu posisi  $y = 1$ ,  $y = 2$ ,  $y = 3$ ,  $y = 4$ , dan  $y = 5$  (jarak  $x$  positif setiap 2



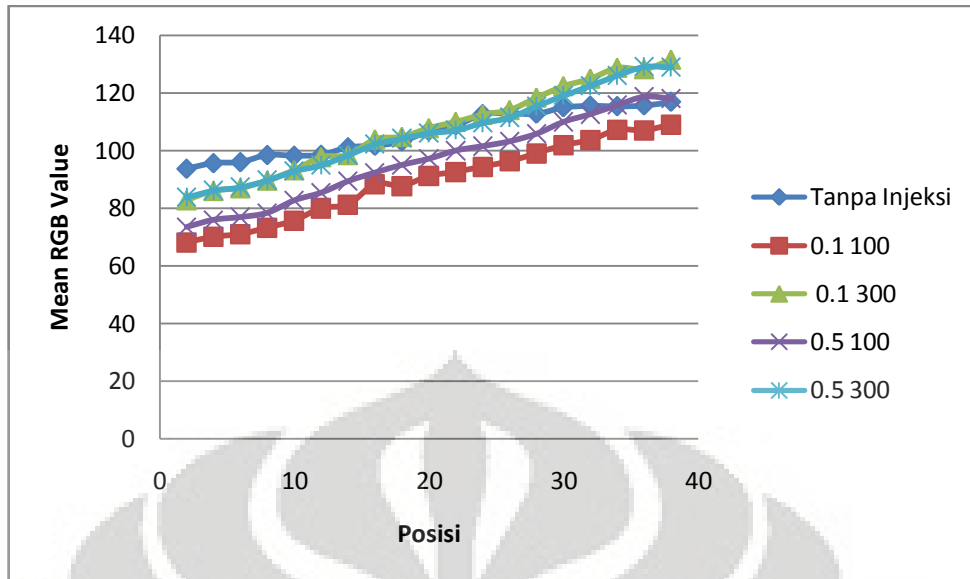
mm, jarak  $y$  positif setiap 4,5 mm untuk *step* 20 mm dan 8 mm untuk *step* 40 mm). Jumlah data yang digunakan dari masing - masing kondisi percobaan adalah 100 buah sampel data dari keseluruhan 1000 buah data. Dari 100 sampel data yang telah ditentukan, kemudian akan dilakukan *averaging*. Dengan menggunakan cara pengukuran dan *averaging* seperti yang telah disebutkan sebelumnya, hasil yang diperoleh telah dapat dianggap cukup representatif untuk kemudian dianalisa secara kuantitatif.

Seperti halnya pada analisa kualitatif, pembahasan pada analisa kuantitatif juga akan dibedakan berdasarkan ketinggian *step* yang digunakan. Nilai RGB hasil pengukuran kemudian diplot ke dalam grafik untuk dianalisa. Lima jumlah posisi diurutkan menjadi posisi  $y = 1$ ,  $y = 2$ ,  $y = 3$ ,  $y = 4$ , dan  $y = 5$  dengan  $y = 1$  merupakan posisi ketinggian yang paling atas. Posisi berikutnya berada di bawahnya secara berurutan.

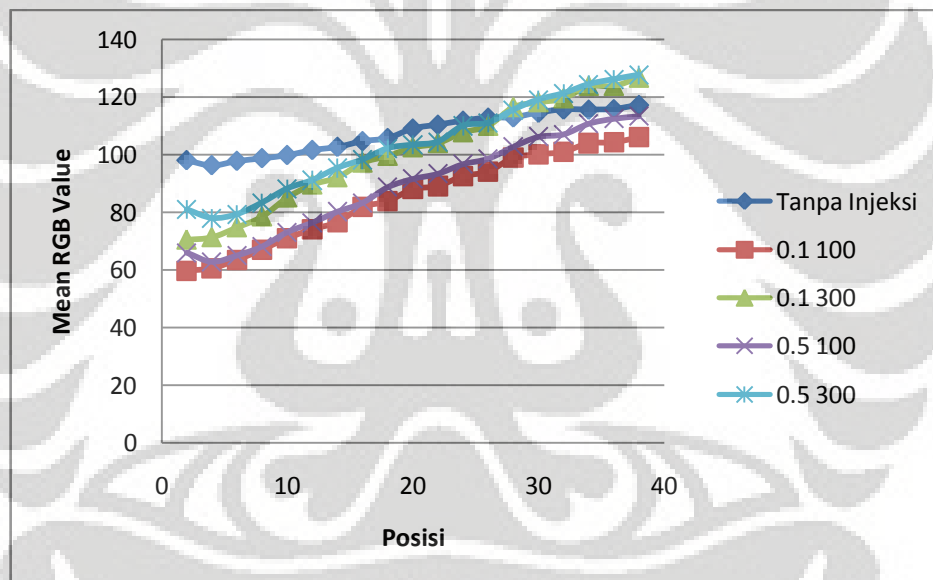
#### 4.2.1 Ketinggian Step 20 mm



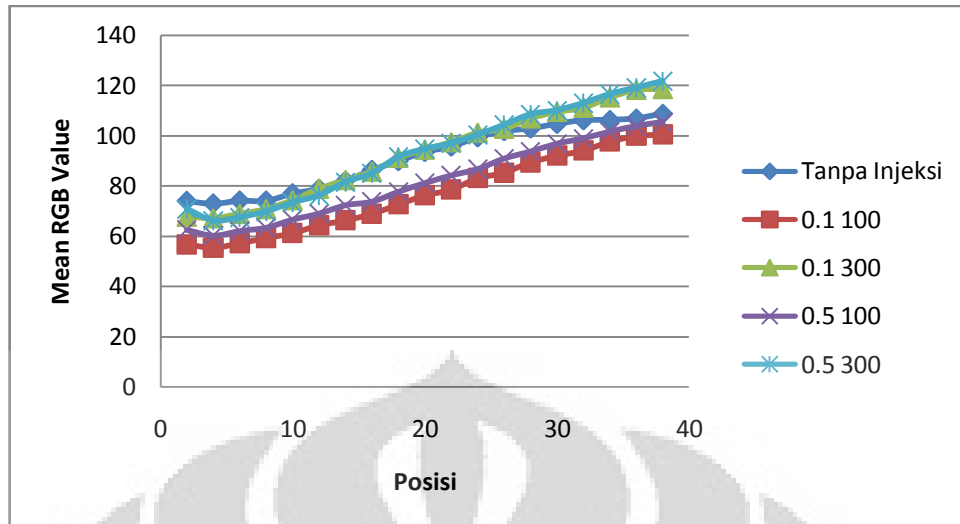
Gambar 4.9 Titik – titik Pengukuran RGB Value Ketinggian Step 20 mm



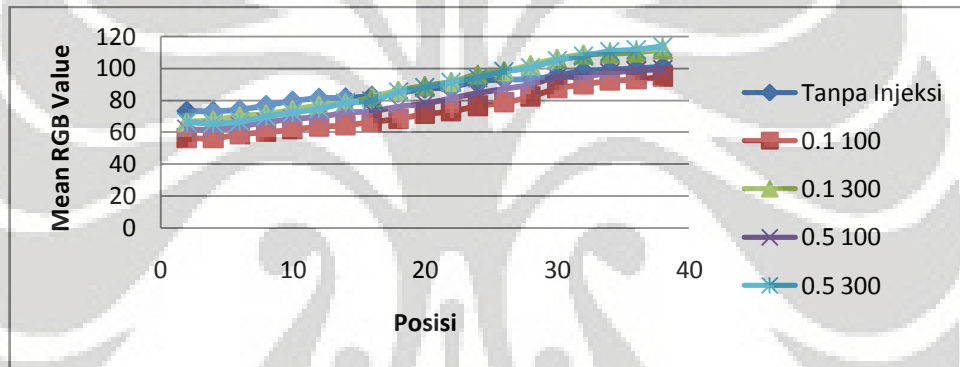
Gambar 4. 10 Grafik RGB Mean Value vs Posisi *Upstream y = 1*



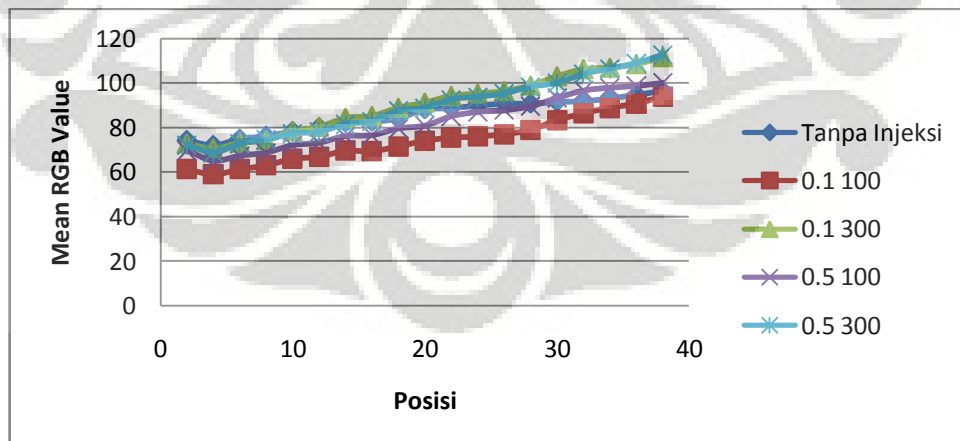
Gambar 4. 11 Grafik RGB Mean Value vs Posisi *Upstream y = 2*



Gambar 4. 12 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 3



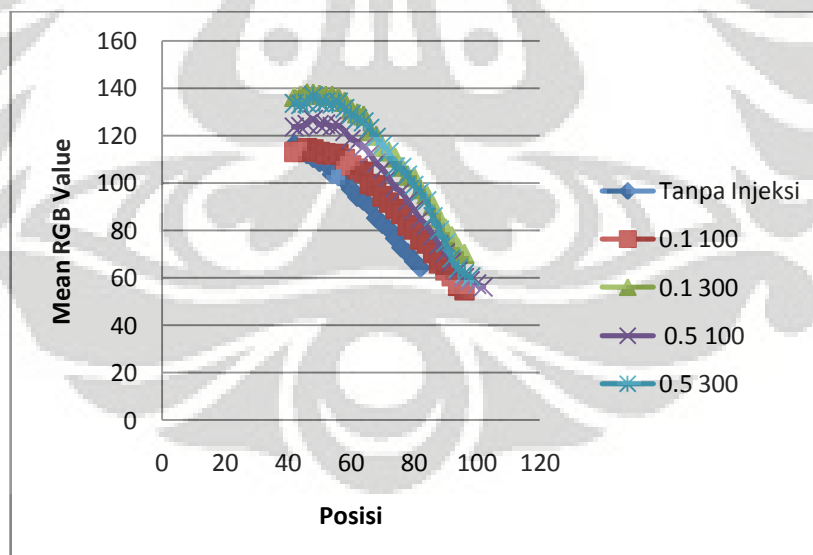
Gambar 4. 13 Grafik RGB Value vs Posisi Upstream y = 4



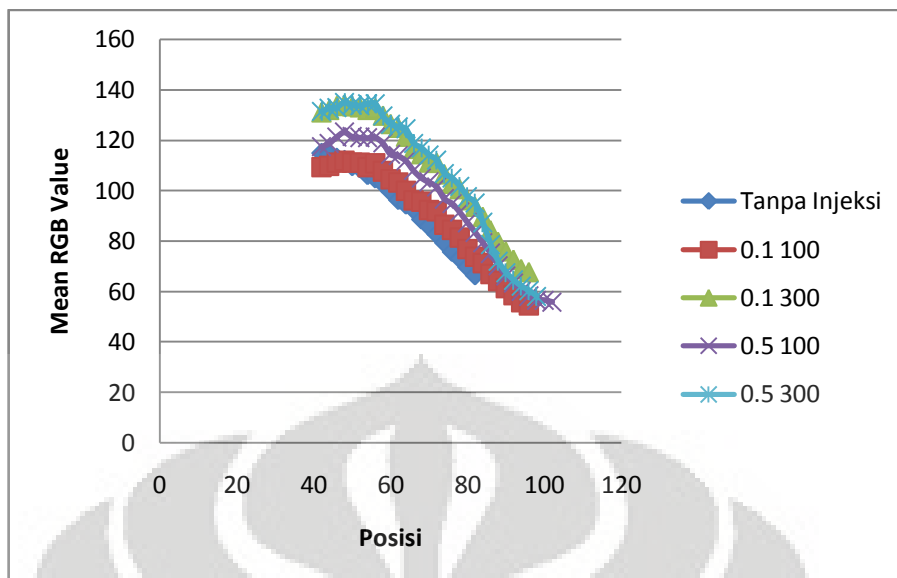
Gambar 4. 14 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream y = 5

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.10, pada posisi paling atas, yaitu  $y = 1$ , dapat dilihat bahwa nilai yang diperoleh

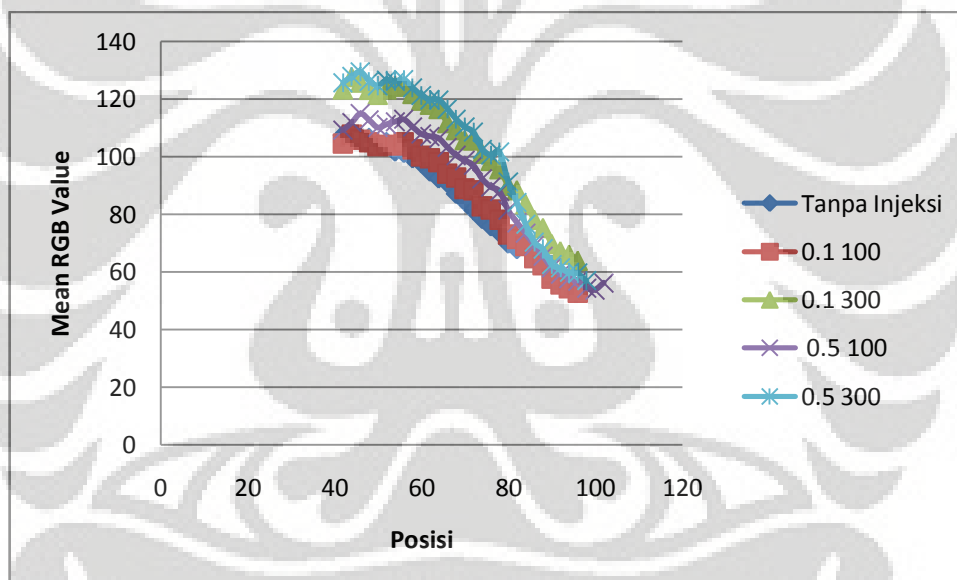
pada wilayah *upstream* untuk kondisi dengan temperatur injeksi 300 °C memiliki persebaran nilai yang relatif lebih tinggi bila dibandingkan dengan kondisi yang lain. Meskipun pada titik - titik awal terlihat bahwa kondisi tanpa injeksi memiliki persebaran nilai yang lebih tinggi, namun kondisi dengan adanya injeksi gas panas lambat laun akan semakin meningkat seiring dengan semakin dekatnya titik pengukuran dengan dasar step. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.11, 4.12, dan 4.13. Dengan kata lain, adanya injeksi gas panas akan menyebabkan kemampuan injeksi untuk menembus *shear layer* meningkat sehingga akan semakin banyak partikel aliran *shear layer* yang tertahan kemudian bergerak mengarah ke dasar step. Pada Gambar 4.15, terlihat bahwa nilai pada titik - titik awal pada kondisi dengan temperatur yang tadinya berada di bawah kondisi tanpa injeksi, mulai melampaui nilai kondisi tanpa injeksi. Hal ini berarti konsentrasi partikel aliran bergerak menuju ke dinding step bagian bawah akibat adanya injeksi gas panas.



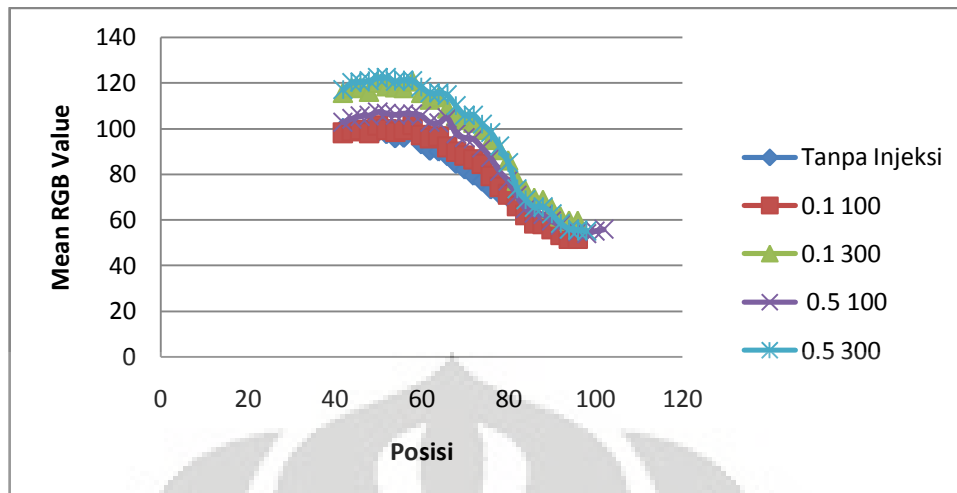
Gambar 4. 15 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream y = 1



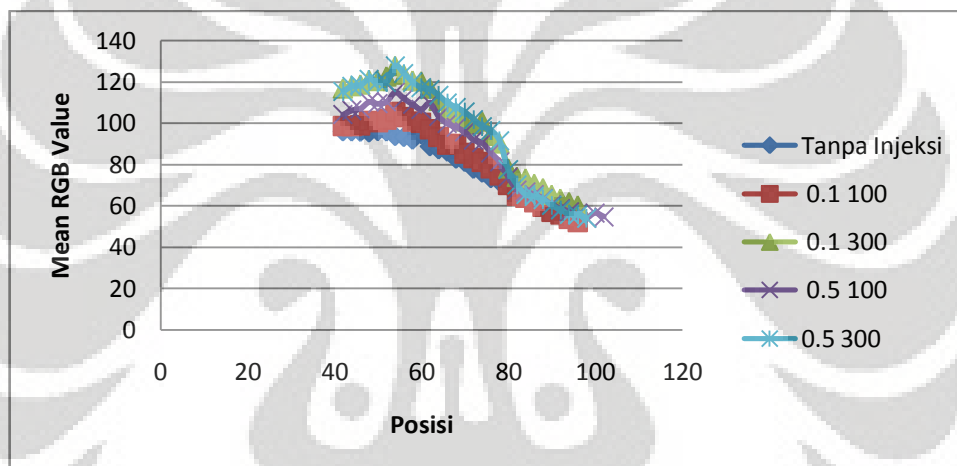
Gambar 4. 16 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream  $y = 2$



Gambar 4. 17 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream  $y = 3$



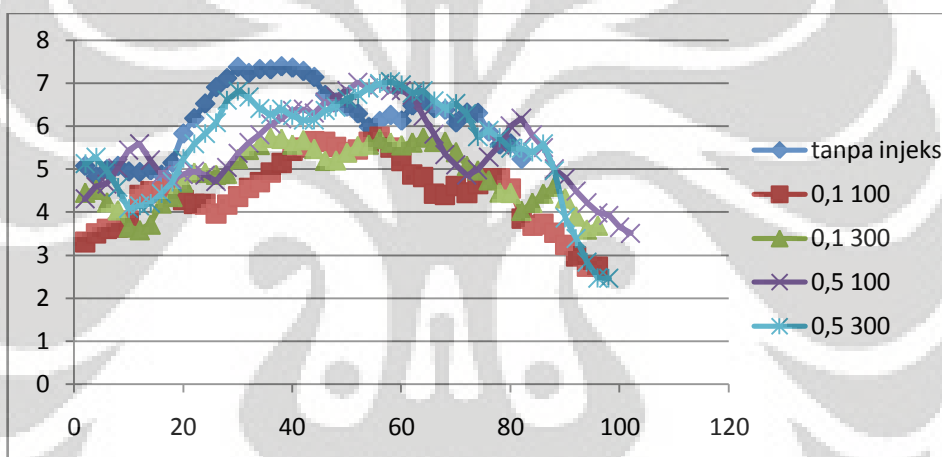
Gambar 4. 18 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream  $y = 4$



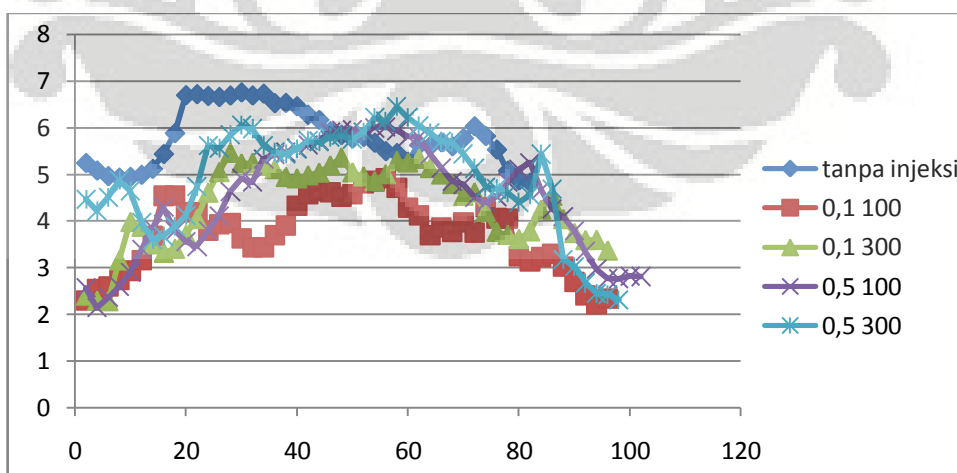
Gambar 4. 19 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream  $y = 5$

Kondisi wilayah *downstream* untuk posisi yang paling atas, yaitu  $y = 1$ , menunjukkan bahwa persebaran nilai yang terjadi memiliki pola yang relatif seragam. Kondisi tanpa injeksi menunjukkan nilai yang paling rendah, sedangkan untuk kondisi dengan injeksi gas panas cenderung semakin tinggi seiring dengan kenaikan temperatur. Pada titik - titik akhir, nilai yang ditunjukkan oleh kelima buah grafik relatif hampir sama, hal ini berarti fenomena *bow effect* yang terjadi pada kelima kondisi tidak jauh berbeda. Kondisi dengan pemanfaatan injeksi untuk setiap kondisi,

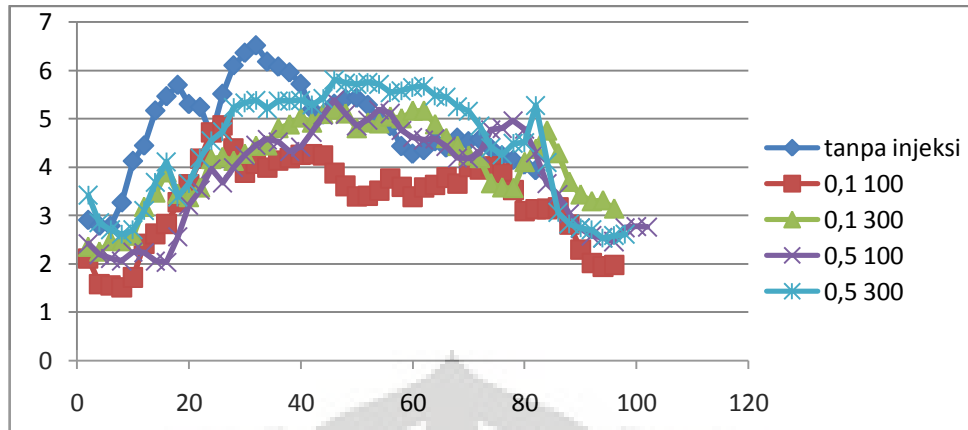
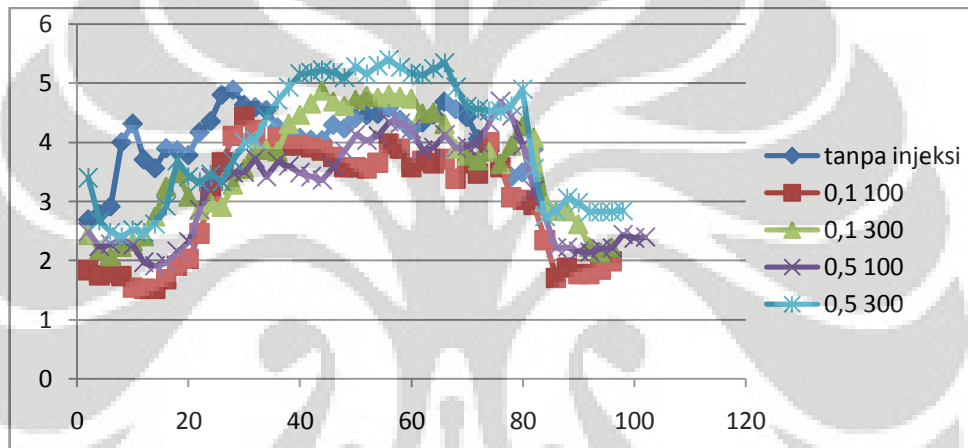
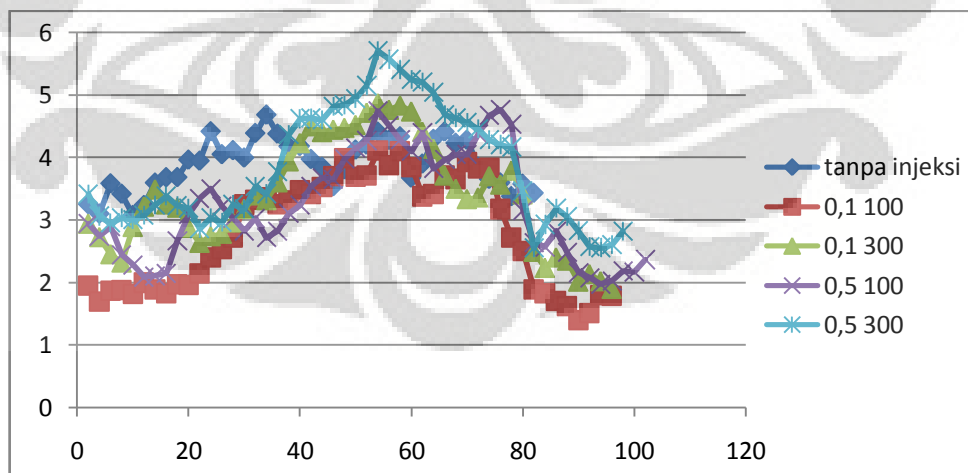
menunjukkan bahwa terjadi kenaikan pada titik - titik awal. Hal ini dapat diartikan bahwa dengan adanya injeksi gas panas, maka sebagian partikel aliran *shear layer*, selain dari yang tertahan dan bergerak menuju dinding, akan terdorong ke atas menuju ke arah *downstream*. Oleh sebab itu, intensitas partikel aliran pada titik - titik awal untuk kondisi dengan injeksi menunjukkan kenaikan yang cukup signifikan. Untuk semua kondisi percobaan selain yang tanpa injeksi, nilai akhir hampir mengacu pada nilai yang sama. Hal ini berarti pada titik - titik akhir pengukuran pola aliran yang terjadi sudah cenderung menuju laminar, oleh karena itu intensitas partikel aliran sudah sulit untuk ditemui.



Gambar 4.20 Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 1



Gambar 4.21 Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi y = 2

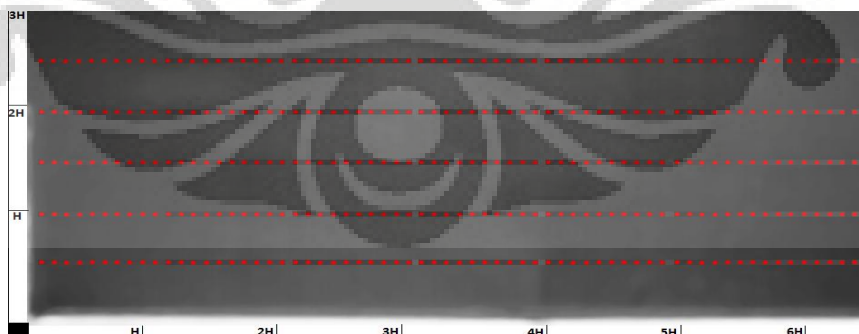
Gambar 4.22 Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi  $y = 3$ Gambar 4.23 Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi  $y = 4$ Gambar 4.24 Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi  $y = 5$ 

Bila dilihat secara garis besar, kondisi dengan tanpa adanya injeksi pada titik - titik awal menunjukkan fenomena yang relatif

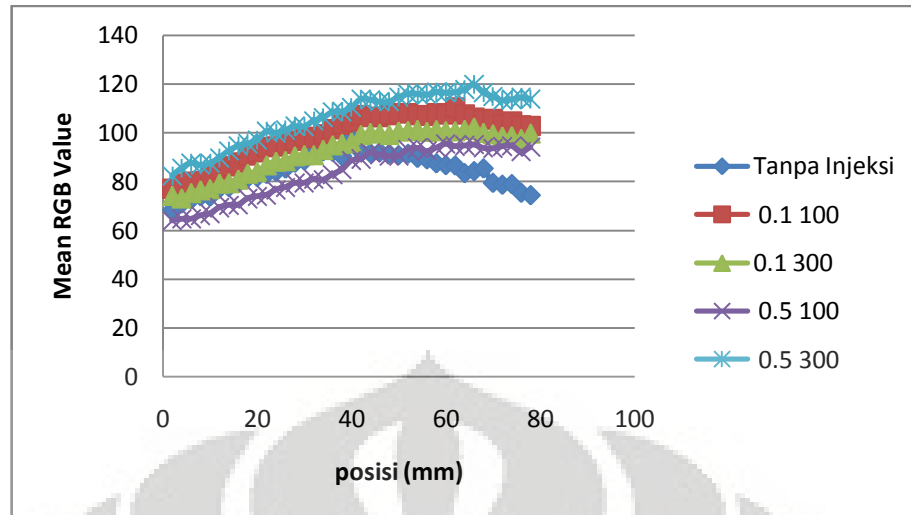
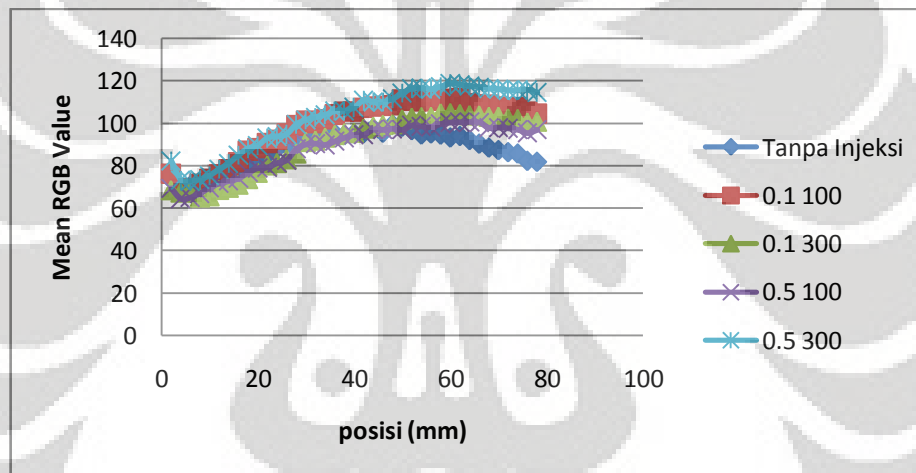
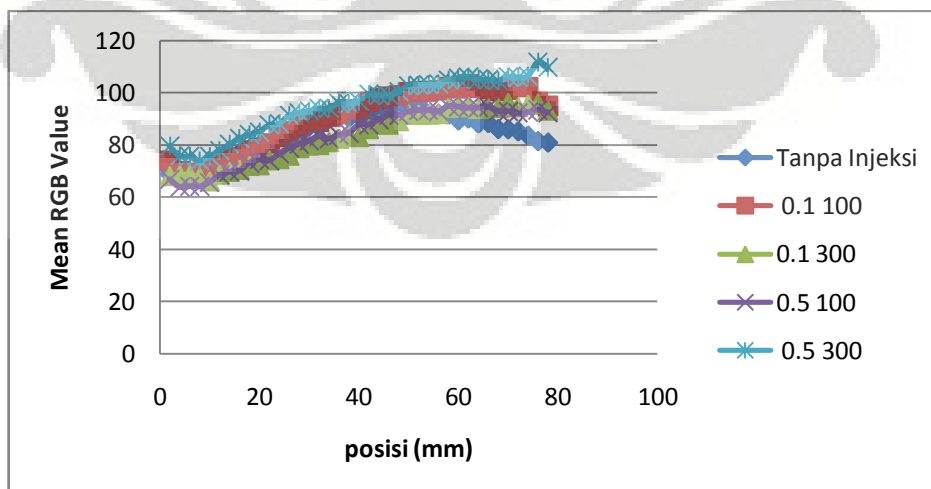


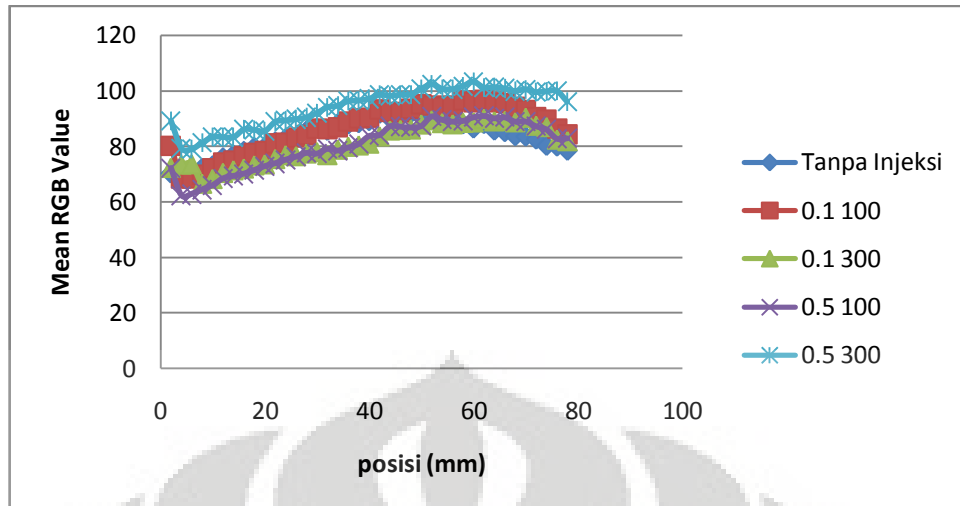
lebih berfluktuasi bila dibandingkan dengan kondisi yang menggunakan injeksi gas panas. Hal ini membuktikan bahwa keberadaan eksitasi eksternal dapat berfungsi sebagai alat kontrol aktif. Dengan adanya kontrol aktif, maka aliran yang terbentuk cenderung lebih stabil bila dibandingkan pola aliran yang terbentuk tanpa adanya kontrol aktif. Namun pada posisi pertengahan hingga akhir, yaitu di daerah sekitar letak injeksi hingga *downstream*, kondisi dengan tanpa injeksi gas panas mengalami penurunan fluktuasi. Hal ini diakibatkan karena pada daerah tersebut, untuk kondisi - kondisi lain yang menggunakan injeksi gas panas, mengalami bentuk pola aliran dengan tingkat resirkulasi yang lebih kuat sehingga menyebabkan intensitas turbulen meningkat juga, persebaran data menjadi lebih berfluktuasi. Sedangkan kondisi tanpa injeksi gas panas kondisi pola aliran menjadi lebih stabil karena pola aliran resirkulasi yang terbentuk tidak sekuat kondisi yang menggunakan injeksi gas panas. Pada daerah reattachment tidak terganggu oleh adanya injeksi gas panas.

#### 4.2.2 Ketinggian Step 40 mm

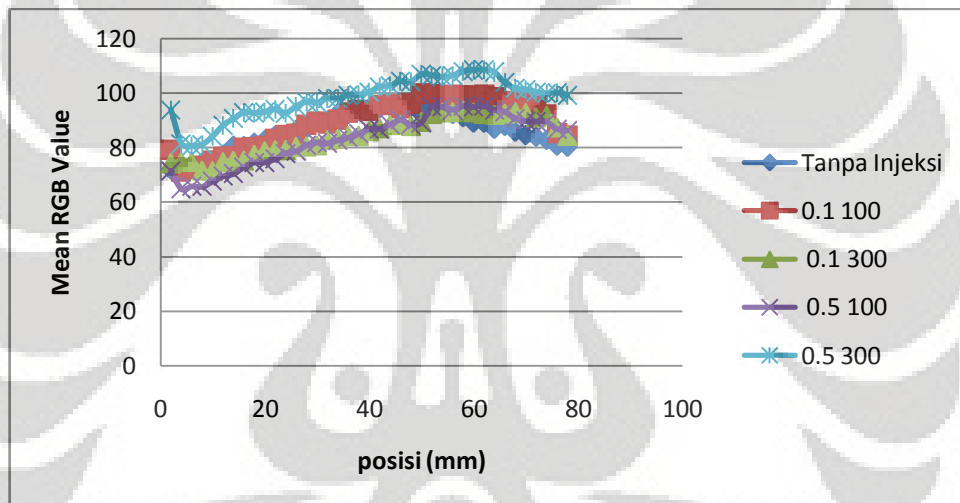


Gambar 4.25 Titik – titik Pengukuran RGB Value Ketinggian Step 40 mm

Gambar 4.26 Grafik RGB Mean Value vs Posisi *Upstream y = 1*Gambar 4.27 Grafik RGB Mean Value vs Posisi *Upstream y = 2*Gambar 4.28 Grafik RGB Mean Value vs Posisi *Upstream y = 3*



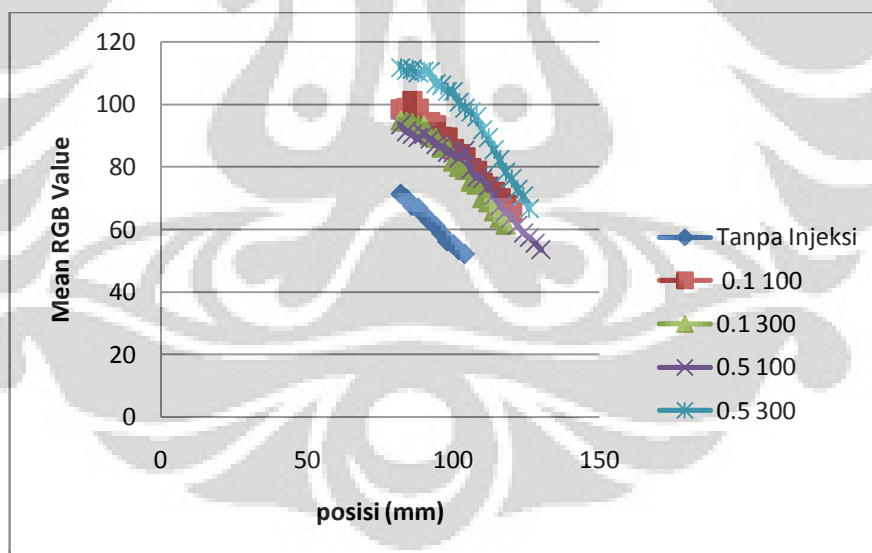
Gambar 4.29 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream  $y = 4$



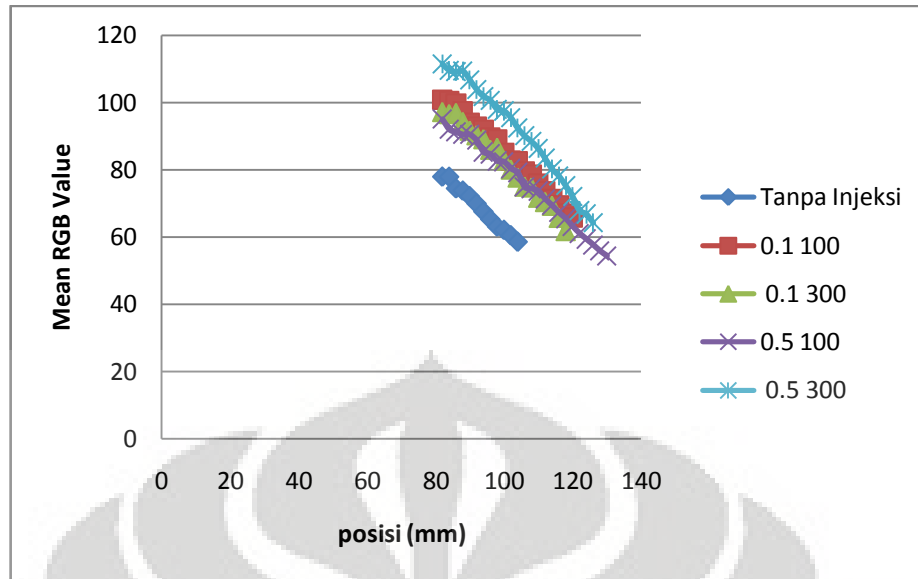
Gambar 4.30 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Upstream  $y = 5$

Berbeda dengan nilai yang diperoleh pada posisi - posisi setelahnya, pada  $y = 1$  memiliki nilai yang relatif tinggi pada titik - titik awal, seperti halnya yang ditunjukkan pada grafik 4.21. Hal ini dapat diartikan bahwa intensitas partikel aliran yang terbentuk cenderung lebih stabil karena aliran pada bagian atas belum begitu terpengaruh dengan perubahan pada *shear layer*. Sedangkan untuk kondisi posisi - posisi yang lain, pada titik awal akan terjadi penurunan nilai yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan oleh mulai terbentuknya *shear layer* yang nantinya secara lebih jauh akan menghasilkan aliran resirkulasi pada wilayah *upstream*.

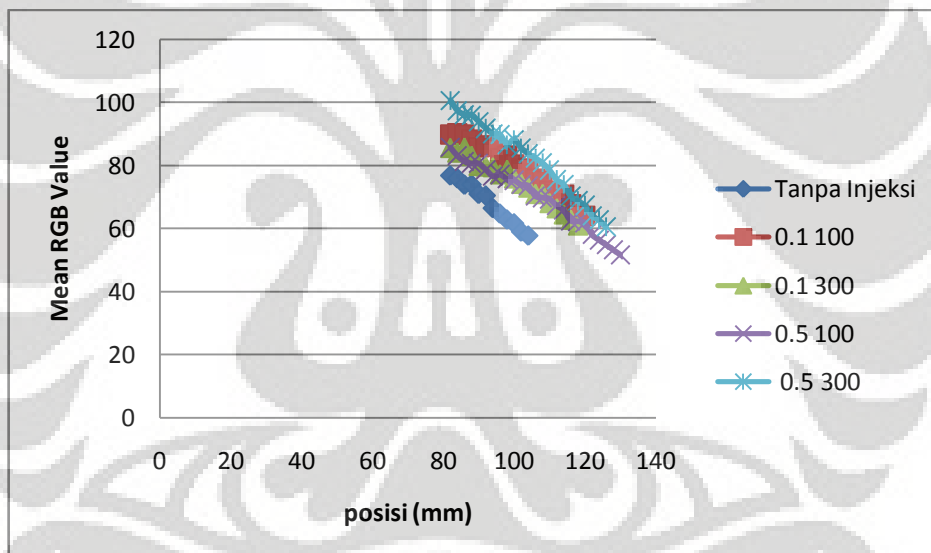
Namun dikarenakan oleh ketinggian step yang digunakan, aliran resirkulasi yang terbentuk pada wilayah *upstream* tidak begitu kuat dan kurang merata, oleh karena itu terbentuklah palung. Hal ini lah yang menjelaskan mengapa terjadi penurunan nilai RGB yang cukup signifikan seperti yang ditunjukkan Gambar 4.22, 4.23, 4.24, dan 4.25. Sedangkan untuk persebaran nilai RGB dengan titik pengukuran yang semakin mendekati injeksi, untuk kelima buah posisi memiliki pola dan nilai yang hampir serupa, hal ini berarti aliran *shear layer* yang terbentuk merata. Khusus untuk kondisi dengan rasio momentum injeksi 0,5 temperatur injeksi 300 °C pada  $y = 5$ , memiliki range nilai yang cukup renggang dengan kondisi - kondisi yang lain dibandingkan dengan posisi  $y = 1$ ,  $y = 2$ ,  $y = 3$ , dan  $y = 4$ . Hal ini dapat terjadi karena aliran resirkulasi pada wilayah *upstream* yang terbentuk dengan perpaduan variasi rasio momentum injeksi tinggi dan temperatur injeksi yang juga tinggi relatif kuat dan merata.



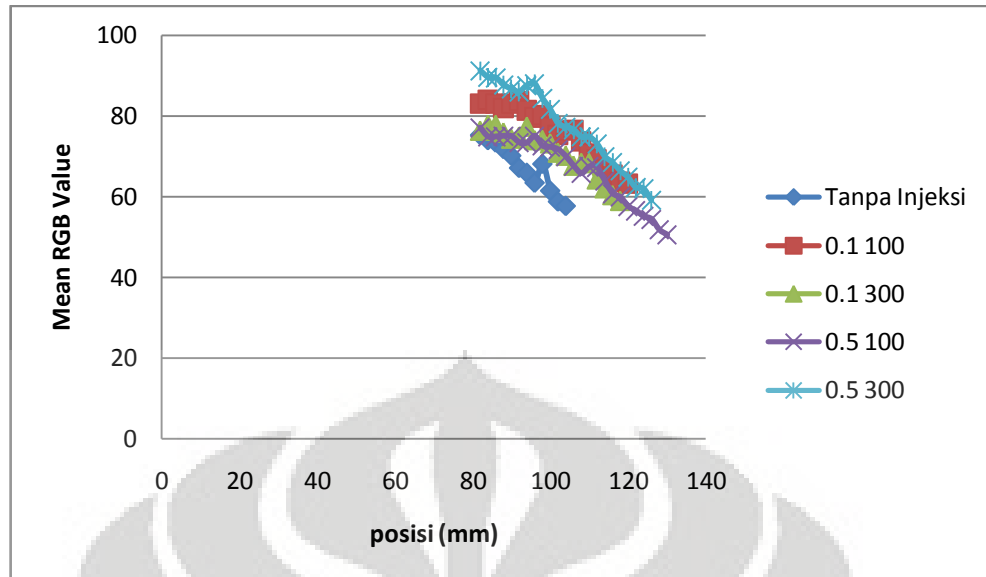
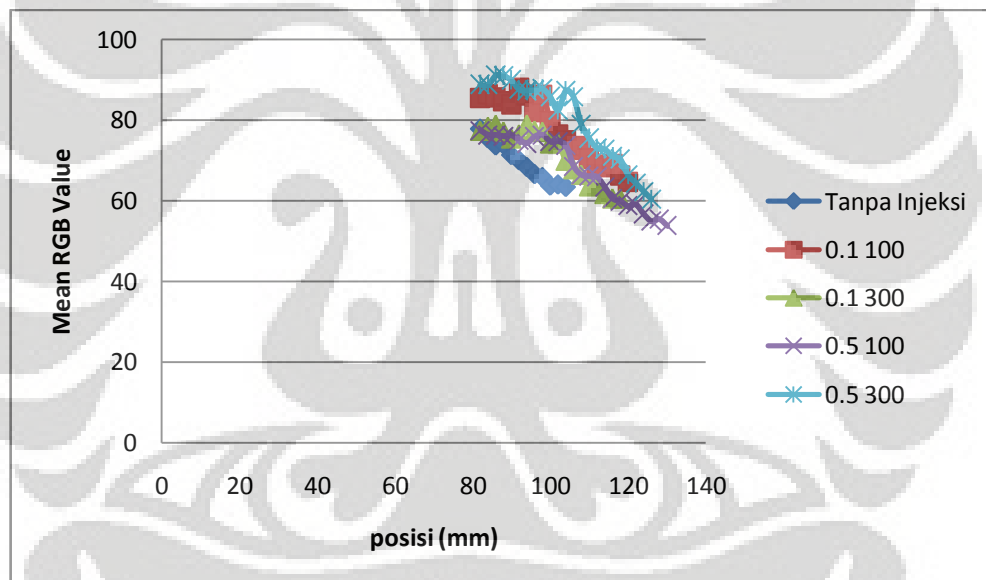
Gambar 4.31 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream  $y = 1$



Gambar 4.32 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream  $y = 2$

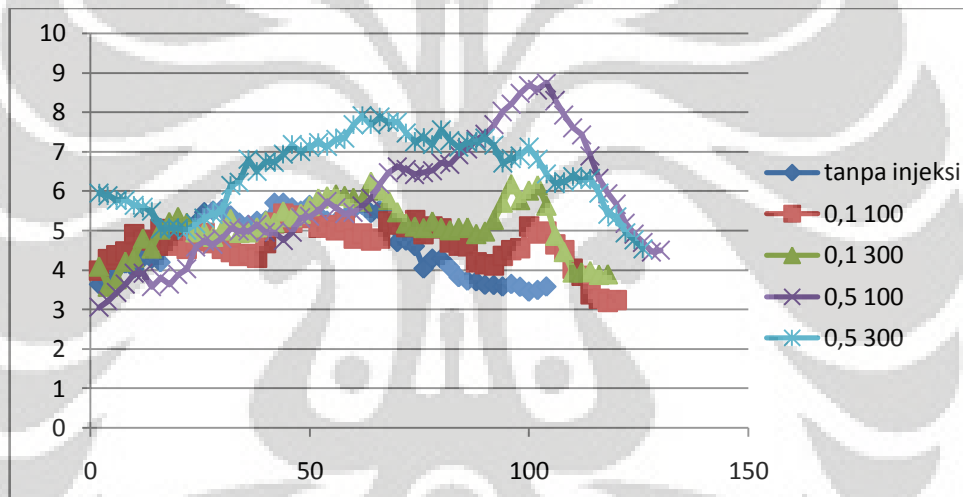


Gambar 4.33 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream  $y = 3$

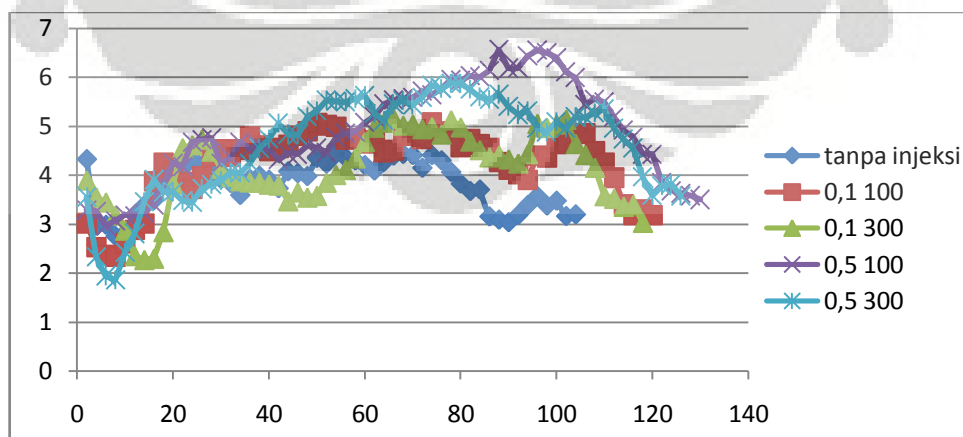
Gambar 4.34 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream  $y = 4$ Gambar 4.35 Grafik RGB Mean Value vs Posisi Downstream  $y = 5$ 

Pola persebaran data pada wilayah *downstream* tidak jauh berbeda dengan pola persebaran data pada wilayah *upstream*. Seiring dengan titik pengukuran semakin mendekati alas step, persebaran data untuk kelima kondisi semakin rapat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.30 meskipun terjadi beberapa fluktuasi data pada beberapa titik. Dengan kata lain, fenomena ini terjadi karena adanya *bow effect* dalam wilayah *downstream* akibat

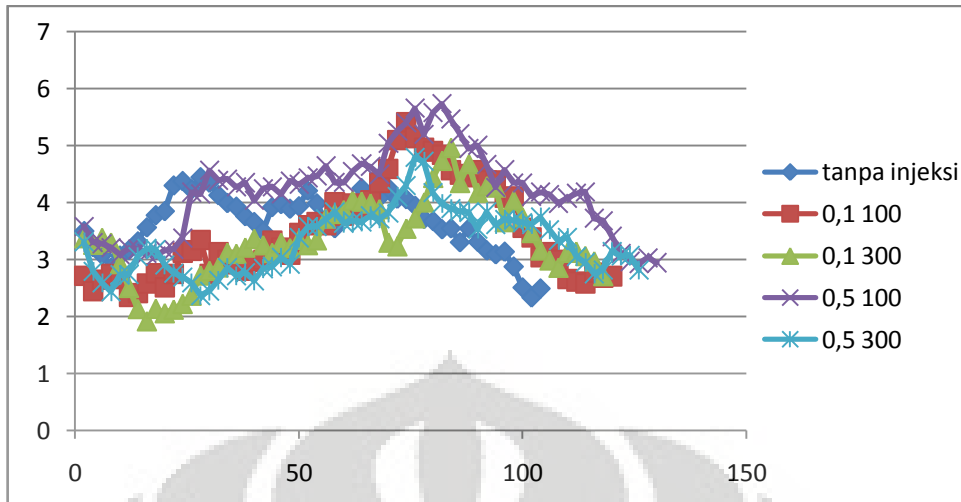
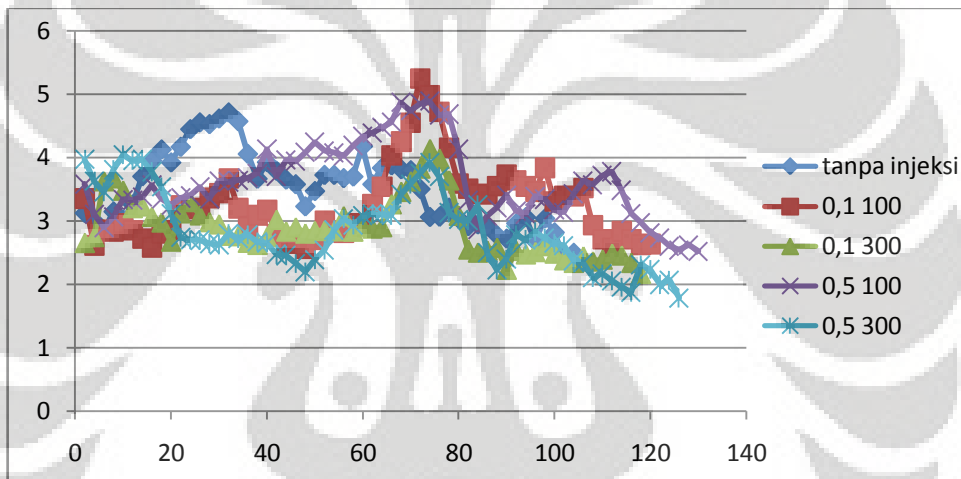
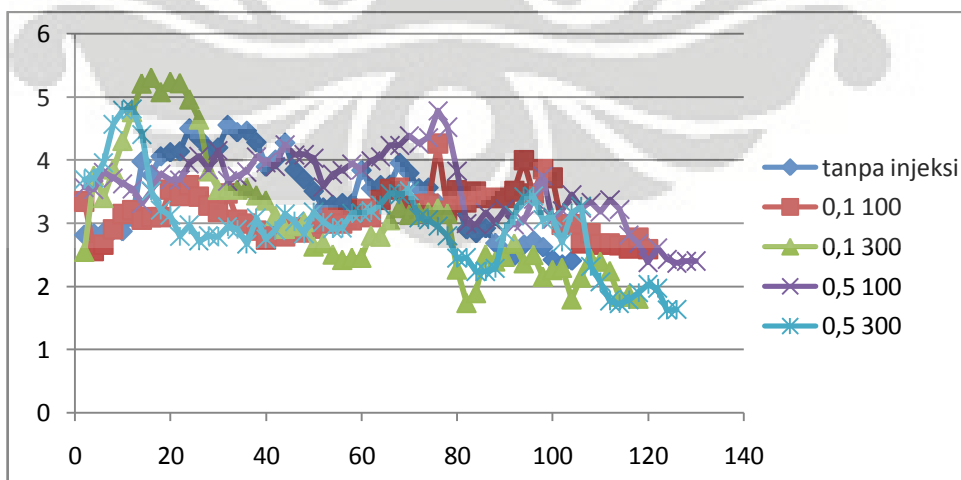
adanya injeksi gas panas. Pada kondisi rasio momentum injeksi 0,5 dan temperatur injeksi 300 °C, akan terjadi fenomena *barrel effect* yang paling kuat. Kondisi tanpa injeksi menunjukkan nilai yang paling rendah karena pada wilayah *downstream*-nya, tidak lagi terbentuk aliran resirkulasi. Hal ini terjadi karena tidak adanya eksitasi eksternal berupa injeksi gas panas sebagai alat kontrol aktif. Pada semua kondisi percobaan yang menggunakan injeksi gas panas, cenderung mengacu pada nilai yang relatif hampir sama. Hal ini disebabkan karena pada titik - titik akhir pengukuran, intensitas partikel aliran sudah tidak terbentuk lagi. Dengan kata lain, pola aliran yang terbentuk sudah cenderung laminar



Gambar 4.36 Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi  $y = 1$



Gambar 4.37 Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi  $y = 2$

Gambar 4.38 Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi  $y = 3$ Gambar 4.39 Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi  $y = 4$ Gambar 4.40 Grafik Standar Deviasi RGB vs Posisi  $y = 5$



Bila dilihat dari grafik yang diperoleh, terlihat bahwa fluktuasi untuk kondisi tanpa gas panas cenderung konstan, dari  $y = 1$  hingga  $y = 5$ . Sedangkan untuk kondisi dengan adanya injeksi gas panas, mengalami peningkatan fluktuasi seiring dengan makin mendekatnya posisi pengukuran ke dasar step. Hal ini berarti injeksi gas panas sebagai eksitasi eksternal mengakibatkan kondisi yang relatif lebih berfluktuasi.

Pada kondisi dengan rasio momentum injeksi 0,5 untuk  $y = 1$  dan  $y = 2$ , gambar 4.36 dan gambar 4.37, hal ini berarti pada daerah *upstream* terjadi nilai fluktuasi yang lebih tinggi bila dibandingkan dengan kondisi dengan rasio momentum injeksi 0,1. Hal ini berlaku baik untuk kondisi dengan temperatur injeksi 100 °C maupun 300 °C. Peningkatan yang relatif tinggi umumnya terjadi pada posisi setelah terkena injeksi gas panas karena struktur aliran yang terjadi mengalami peningkatan turbulensi. Untuk semua kondisi, terjadi fluktuasi aliran ketika posisi pengukuran makin mendekati letak injeksi.

Semakin mendekati dasar step, fluktuasi data semakin mengalami peningkatan. Hal ini dikarenakan pada daerah yang semakin mendekati dasar step, kondisi turbulensi aliran yang terjadi tidak bersifat konstan. Pola aliran yang terjadi sangat acak ditambah dengan partikel aliran yang menumbuk dasar step semakin meningkatkan ketidakaturan, seperti yang dapat dilihat dari gambar 4.38, 4.39, dan 4.40.

## BAB 5

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Setelah melakukan eksperimen dan memperoleh hasil berupa data yang kemudian diolah dan dianalisa secara lebih lanjut, maka dapat diambil beberapa kesimpulan. Kesimpulan – kesimpulan tersebut antara lain :

1. Perbedaan rasio momentum injeksi dapat berpengaruh terhadap kemampuan injeksi untuk menembus *shear layer*. Semakin tinggi rasio momentum injeksi yang digunakan, maka injeksi udara panas akan semakin mampu menembus *shear layer*. Sedangkan apabila ditinjau dari keberadaan aliran resirkulasi, semakin tinggi rasio injeksi maka keberadaan aliran resirkulasi di daerah upstream akan semakin meningkat. Hal ini disebabkan oleh “*block effect*” yang terbentuk semakin kuat, akibatnya akan semakin banyak partikel aliran shear layer yang tertahan dan akhirnya menuju ke arah upstream.
2. Kenaikan temperatur injeksi dapat menyebabkan terbentuknya wilayah *barrel effect* yang semakin luas. *Barrel effect* terbentuk tepat setelah letak injeksi. Apabila *barrel effect* semakin kuat maka akan tercipta semakin banyak ruang kosong yang tidak dapat dilalui oleh partikel aliran sehingga aliran resirkulasi di daerah downstream akan melemah.
3. Perubahan ketinggian step akan mengakibatkan pada perubahan intensitas aliran resirkulasi. Berdasarkan analisa yang telah dilakukan, pada ketinggian step 20 mm aliran resirkulasi pada wilayah *upstream* maupun *downstream* lebih tinggi intensitasnya bila dibandingkan yang terbentuk pada ketinggian step 40 mm.

4. Perubahan nilai standar deviasi RGB yang diperoleh menunjukkan tingkat fluktuasi persebaran data pada titik pengukuran. Semakin tinggi nilai standar deviasi RGB yang diperoleh, berarti semakin jauh persebaran data terhadap nilai *mean* pada titik tersebut. Dengan kata lain, terjadi keacakan tingkat kecerahan yang diperoleh, aliran yang terjadi bersifat fluktuatif.

## 5.2 Saran

Untuk kegiatan penelitian yang hendak dilakukan pada waktu yang mendatang, terdapat beberapa saran yang dapat direkomendasikan. Saran – saran tersebut antara lain:

1. Perubahan letak *light sheet* dengan variasi – variasi jarak tertentu, seperti semakin mendekati arah *high speed video camera* atau pun semakin menjauh
2. Penggunaan sumber pencahayaan dengan intensitas yang lebih tinggi, seperti halnya *Laser Doppler Anemometry (LDA)*
3. Pengkondisian rasio momentum injeksi yang lebih bervariasi untuk memperoleh basis data yang lebih luas cakupannya

## DAFTAR REFERENSI

- [1] Barber, R. W., Fonty, A., *A Numerical Study Of Laminar Flow Over A Confined Backward Facing Step Using A Novel Viscous - Splitting Vortex Algorithm*, 4<sup>th</sup> GRACM Congress on Computational Mechanics, 2002
- [2] Johnson, M. B., *Aerodynamic Control and Mixing with Ramp Injection*, Magister Science Thesis, 2005, Graduate Aeronautical Laboratories California Institute of Technology
- [3] Schuchkin, V., et al., *Mixing and Film Cooling In Supersonic Duct Flows*, Int. Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002) 4451 - 4461
- [4] Yang, W. M., et al., *Combustion In Micro - Cylindrical Combustors With and Without a Backward Facing Step*, Applied Thermal Engineering 22 (2002) 1777 - 1787
- [5] Chakravarthy, S. R., et al., *Vortex - Acoustic Lock - on In Bluff - Body And Backward - Facing Step Combustors*, Sadhana, Vol. 32, parts 1 & 2, pp 145 - 154 (2007)
- [6] Takahashi, F., et al., *Suppression of a Nonpremixed Flame Stabilized ny a Backward - Facing Step*, Elsevier Science Inc. Combustion and Flame, Vol. 122, pp. 105 - 116 (2000)
- [7] Pal, M., *Stationery Incompressible Flow Over A Backward Facing Step*, Mini Project, Master Programs In Scientific Computing, NADA, KTH
- [8] You, D., Moin, P., *Large - Eddy Simulation of Flow Separation Over An Airfoil With Synthetic Jet Control*, Center for Turbulence Research Annual Research Briefs, 2006
- [9] Bassam, A. K., *Reattachment of Turbulent Shear Layer over a Backward Facing Step with Isotropic Porous Floor Segments*, Journal of King Saud University, Vol. 11, Eng. Sci. (1), pp. 117 - 130
- [10] Ali, M., Ahmed, S., *A Study on the Physics of Supersonic Mixing Field With Injection At Different Angles*, International Conference on Mechanical Engineering, 2003
- [11] Obara, T., et al., *Experimental Study on a Flow Field Behind Backward - Facing Step Using Detonation - driven Shock Tunnel*, Japan : Saitama
- [12] Di Cicca, G. M., et al., *PIV Investigation om a Controlled Backward Facing Step Flow*, Proceedings of PSFVIP - 4, 2003

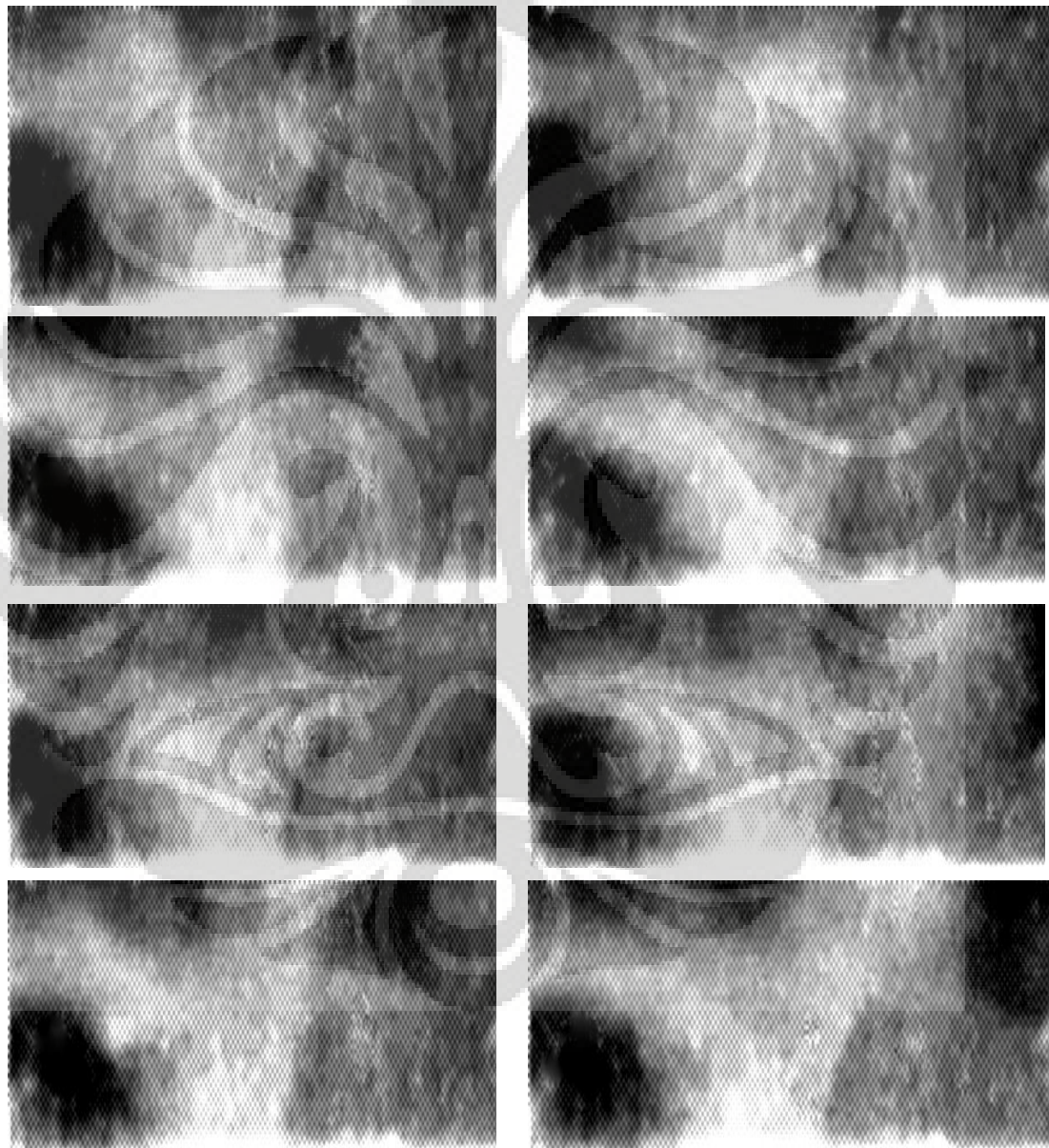
- [13] Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarmo (Jakarta: Erlangga, 2003).
- [14] Shafer, D. M., “*Active And Passive Flow Control Over The Flight Deck Of Small Naval Vessels*”, 2005, Magister Science Thesis, United States of America : The Virginia Polythecnic Institute and State University.
- [15] Alam, M. R., Liu, W., Haller, G., *Closed – Loop Separation Control : An Analytic Approach*, Physics Of Fluids 18, 043601, 2006.
- [16] Abu – Nada, E., Al - Sarkhi, A., Akash, B., Al – Hinti, I., *Heat Transfer And Fluid Flow Characteristics of Separated Flows Encountered In A Backward – Facing Step Under The Effect Of Suction and Blowing*, Journal of Heat Transfer ASME, Vol. 129, 2007.
- [17] O’Malley, K., et al., *Models For High – Reynolds – Number Flow Down A Step*, Journal of Fluida Mechanics, Vol. 222, pp. 139 – 155 (1991)
- [18] Manna, P., Chakraborty, D., *Numerical Simulation of Transverse H2 Combustion In Supersonic Airstream in a Constant Area Duct*, IE(I) Journal – AS, Vol. 86 (2005)
- [19] Ruck, B., Makiola, B., *Particle Dispersion in a Single – Sided Backward – Facing Step Flow*, Int. J. Multiphase Flow, Vol. 14, No. 6, pp. 787 – 800 (1988)
- [20] Diurno, G. V., et al., *Wall – Layer Models For LES of Separated Flows*, MD, USA : University of Maryland
- [21] Tsai, G., et al., *Transitional Flow Patterns Behind A Backstep With Porous – Based Fluid Injection*, Int. J. of Heat and Mass Transfer (2008), doi : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.06.042
- [22] Syaugi, A., Surya W., Putu, *Efek Injeksi gas Panas Terhadap Karakteristik Medan Temperatur Dalam Aliran Resirkulasi Pada Backward – Facing Step*, Skripsi Sarjana Teknik Mesin Universitas Indonesia, 2003.
- [23] Haryono, S., *Karakteristik Medan Termal Dalam Aliran Resirkulasi Akibat Injeksi Gas Panas Pada Backward – Facing Step*, Tesis Program Pascasarjana Teknik Mesin Universitas Indonesia, 2004.

## LAMPIRAN

### Lampiran 1

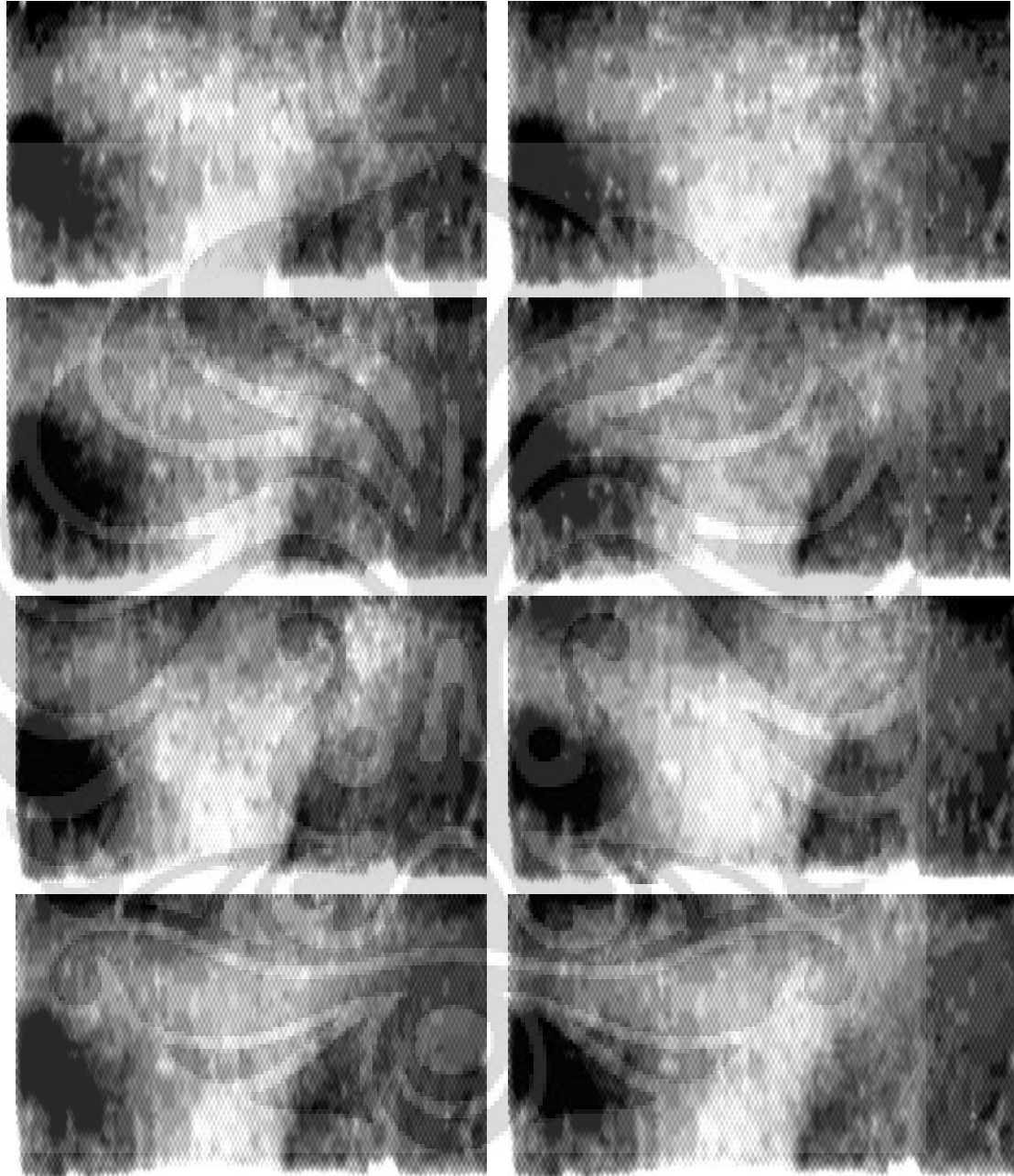
#### Gambar Hasil *Video Camera*

Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Rasio 0,1 100 °C

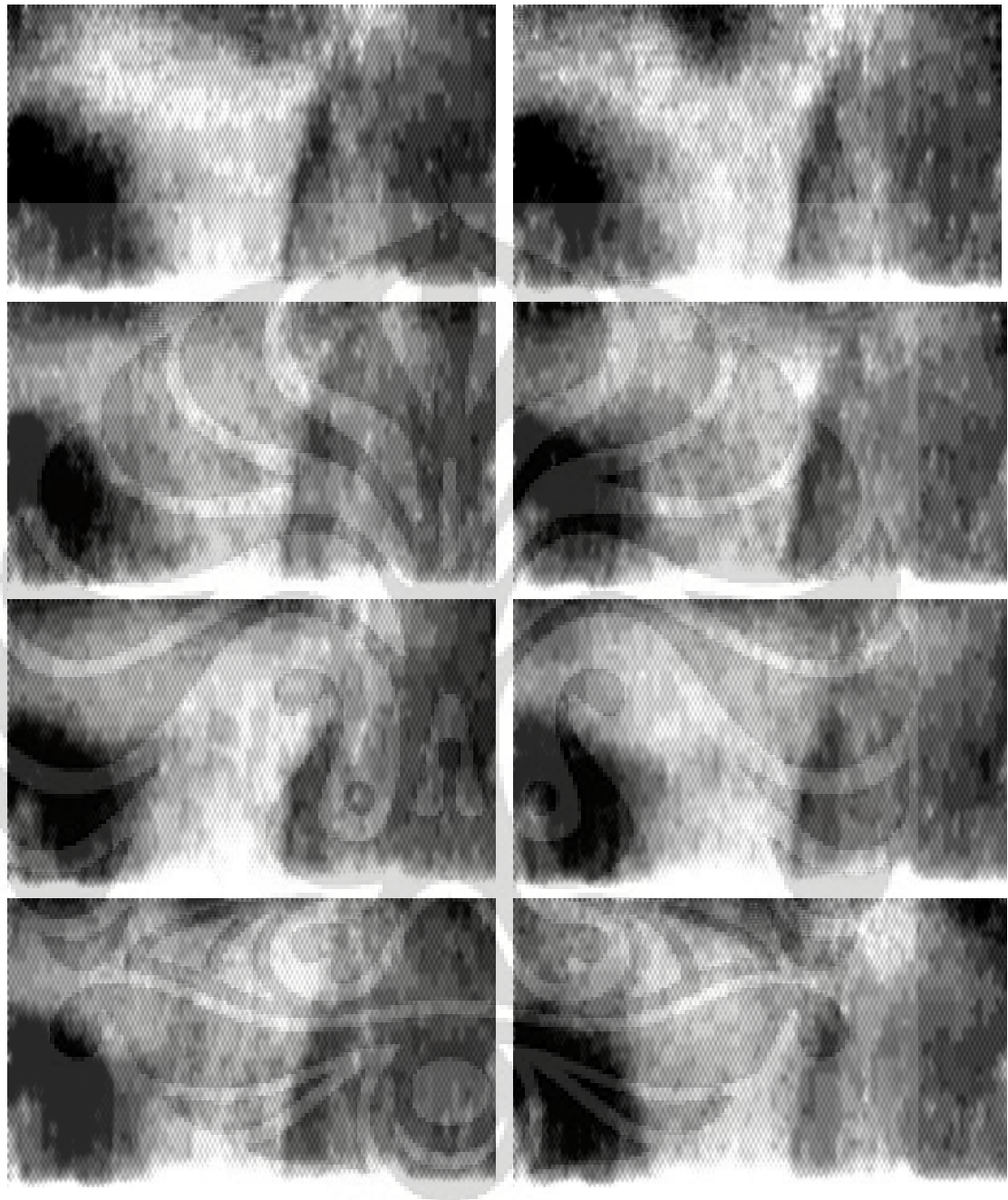


Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Rasio 0,1 300 °C



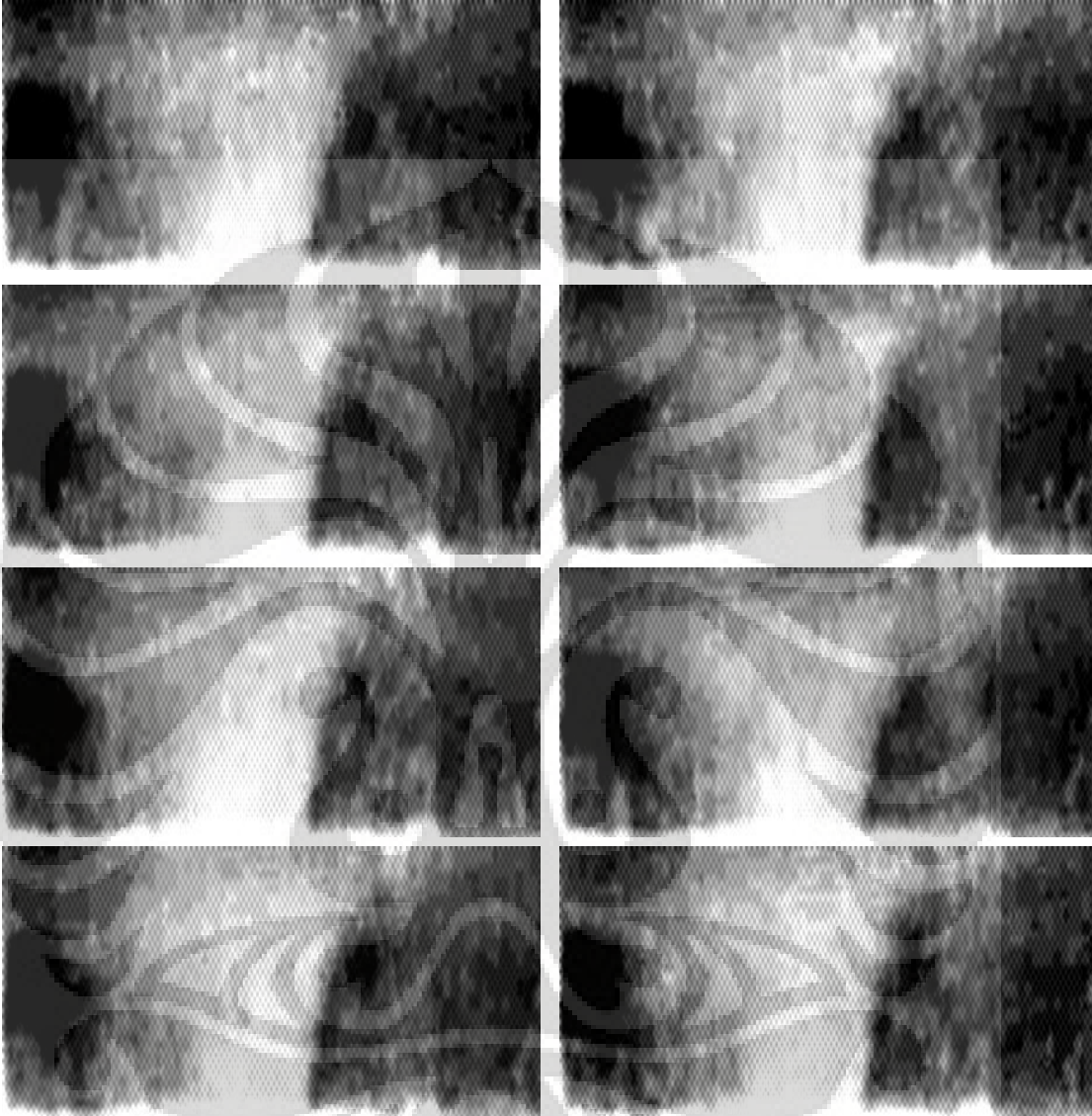
Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Rasio 0,5 100 °C



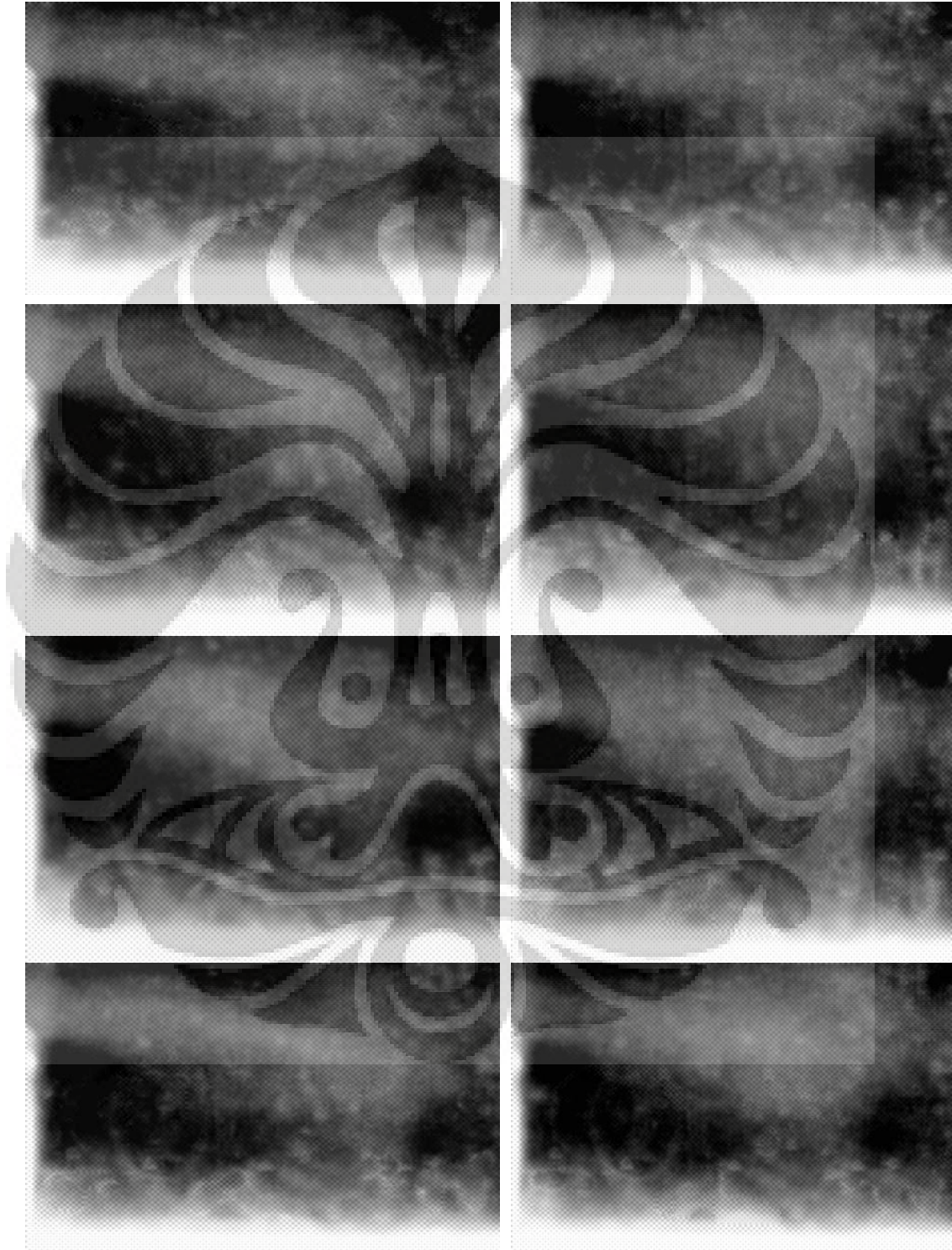
Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Rasio 0,5 300 °C



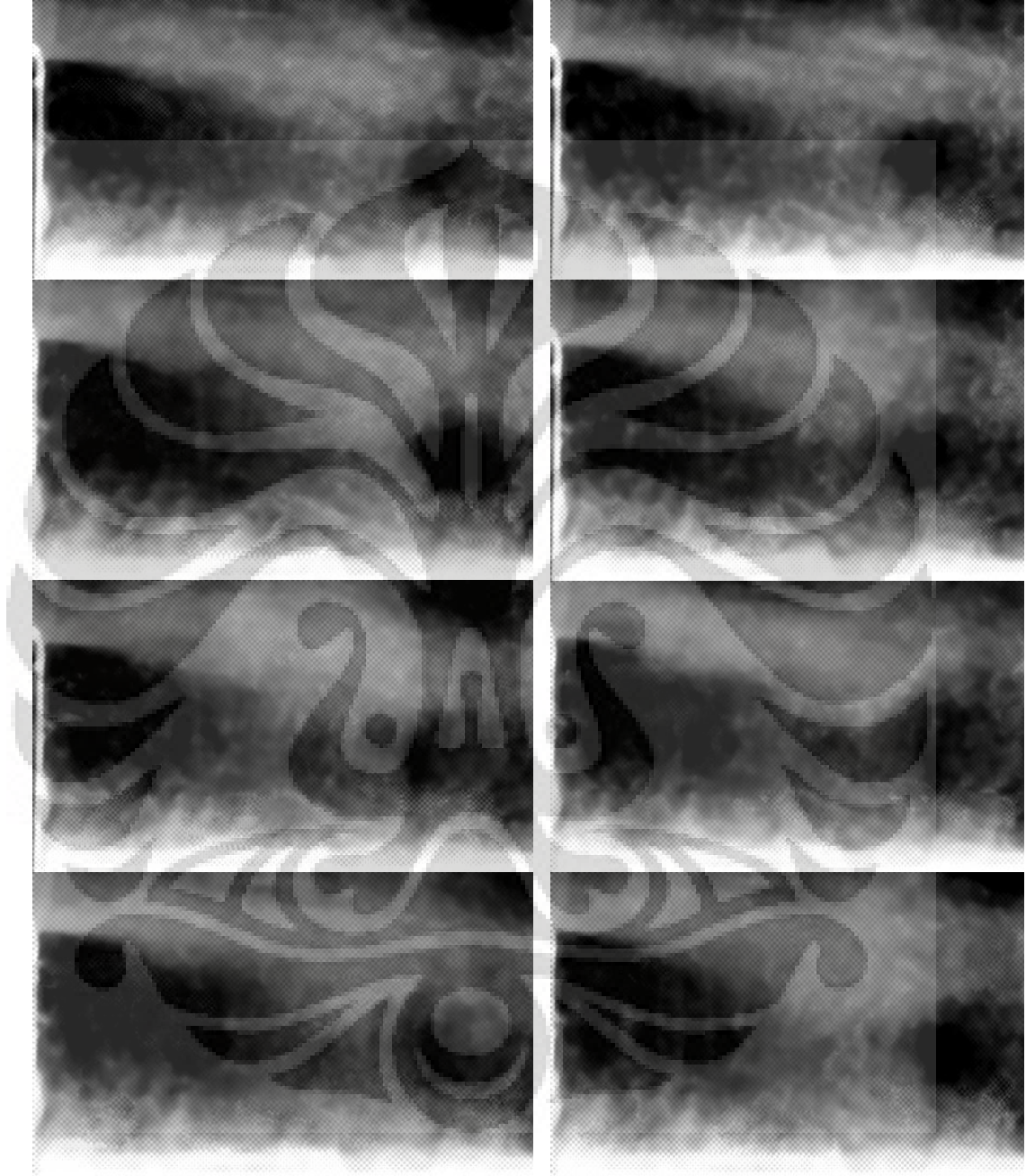
Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Rasio 0,1 100 °C



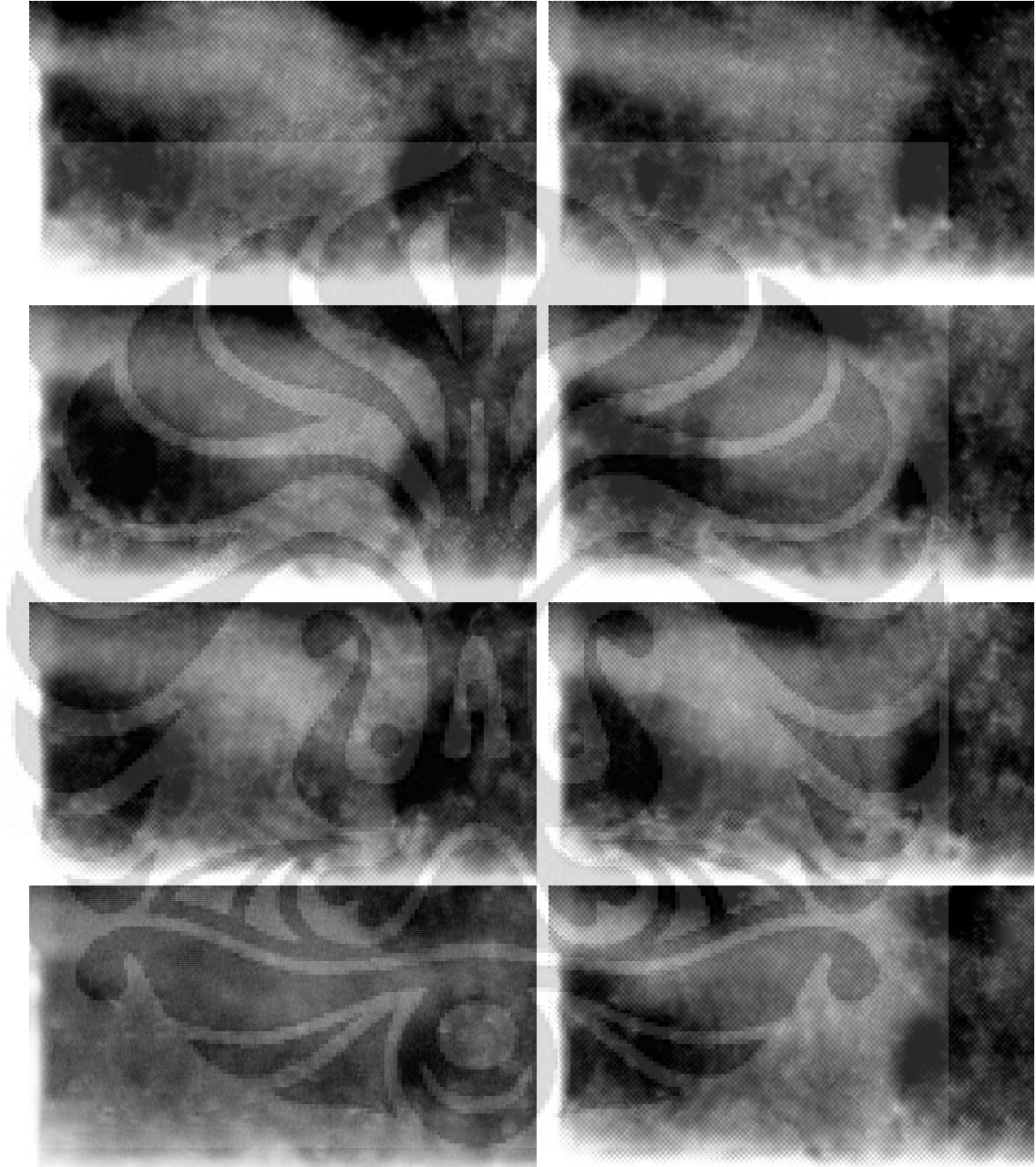
Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Rasio 0,1 300 °C



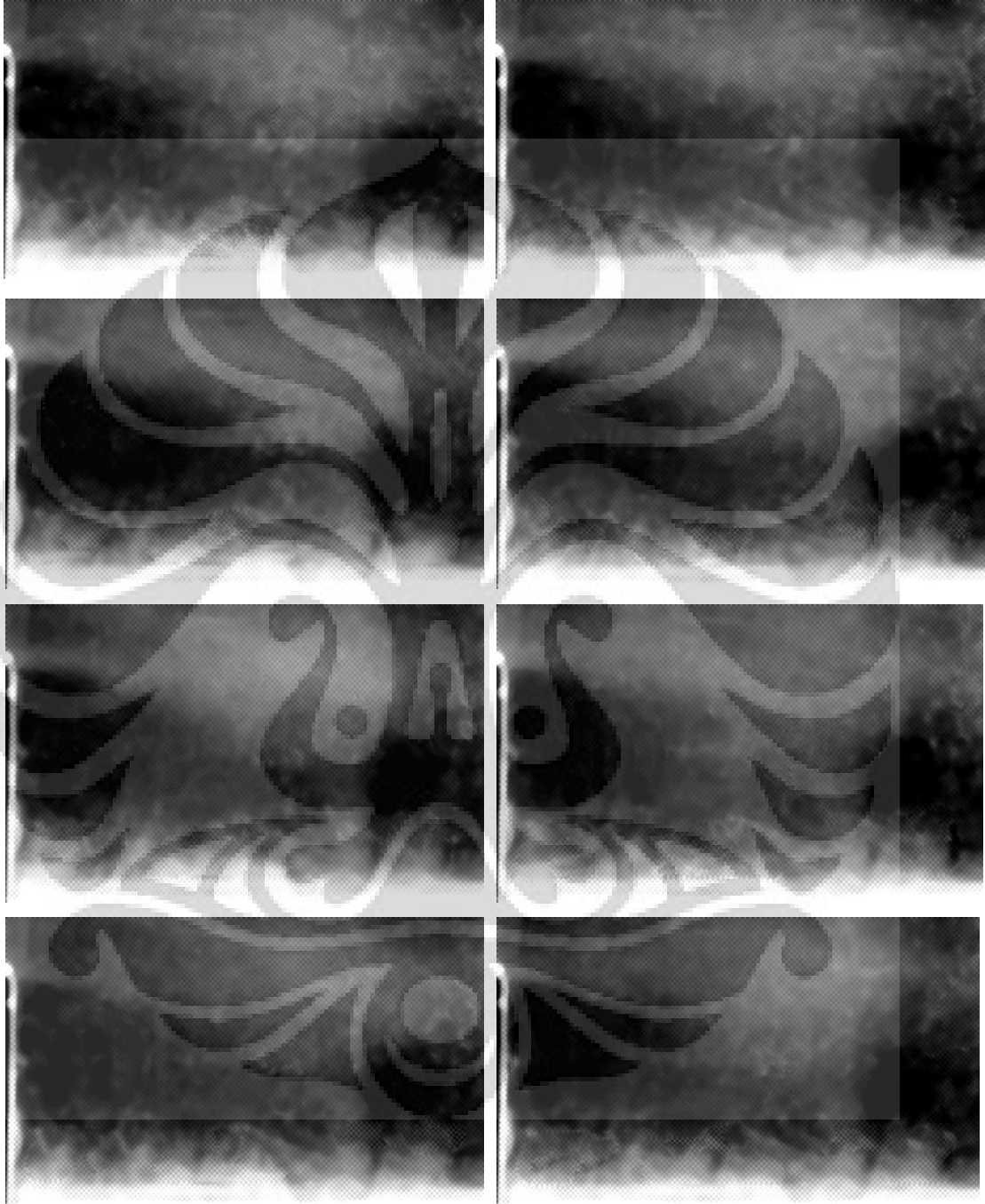
Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Rasio 0,5 100 °C



Lanjutan

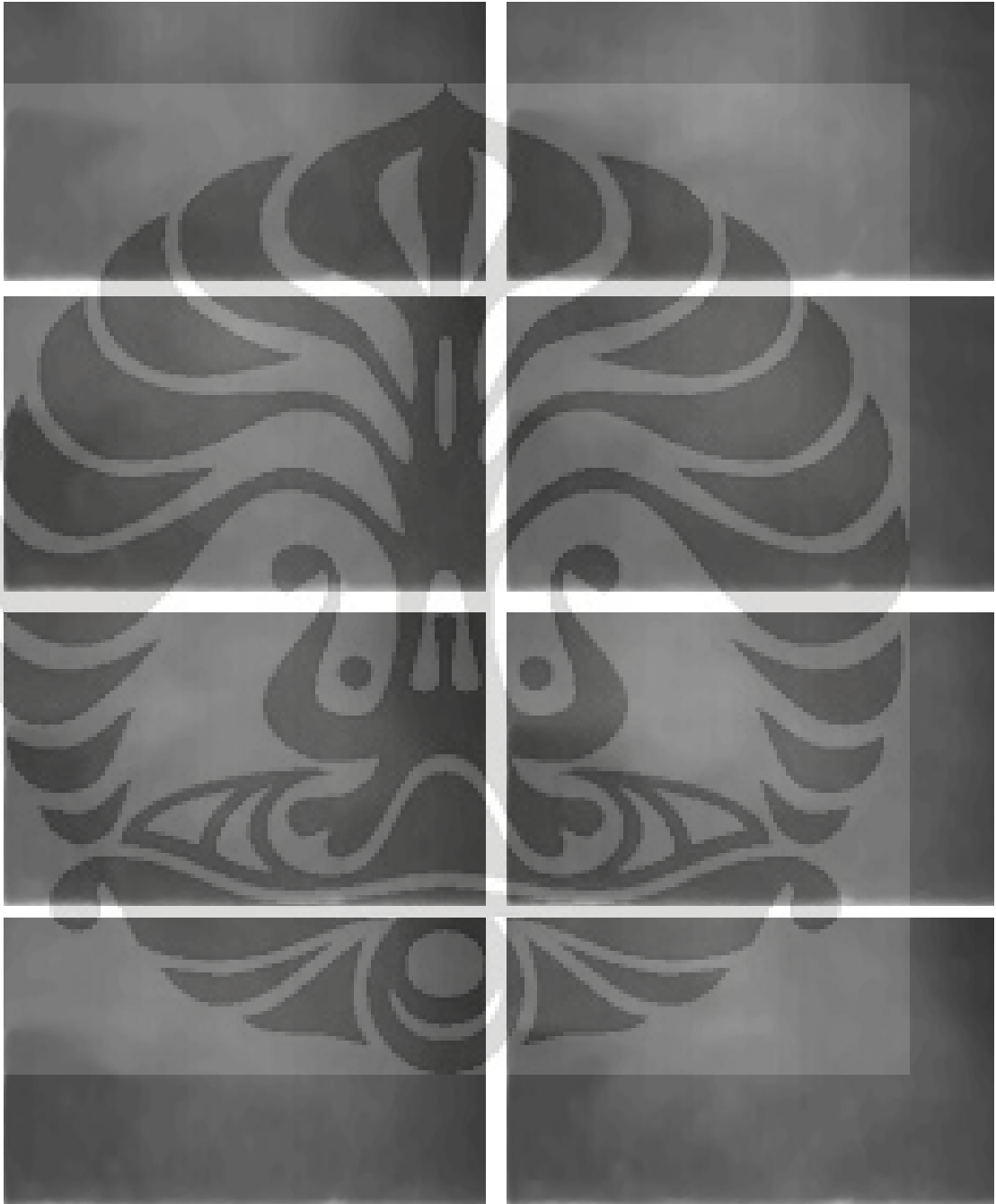
Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Rasio 0,5 300 °C



## Lampiran 2

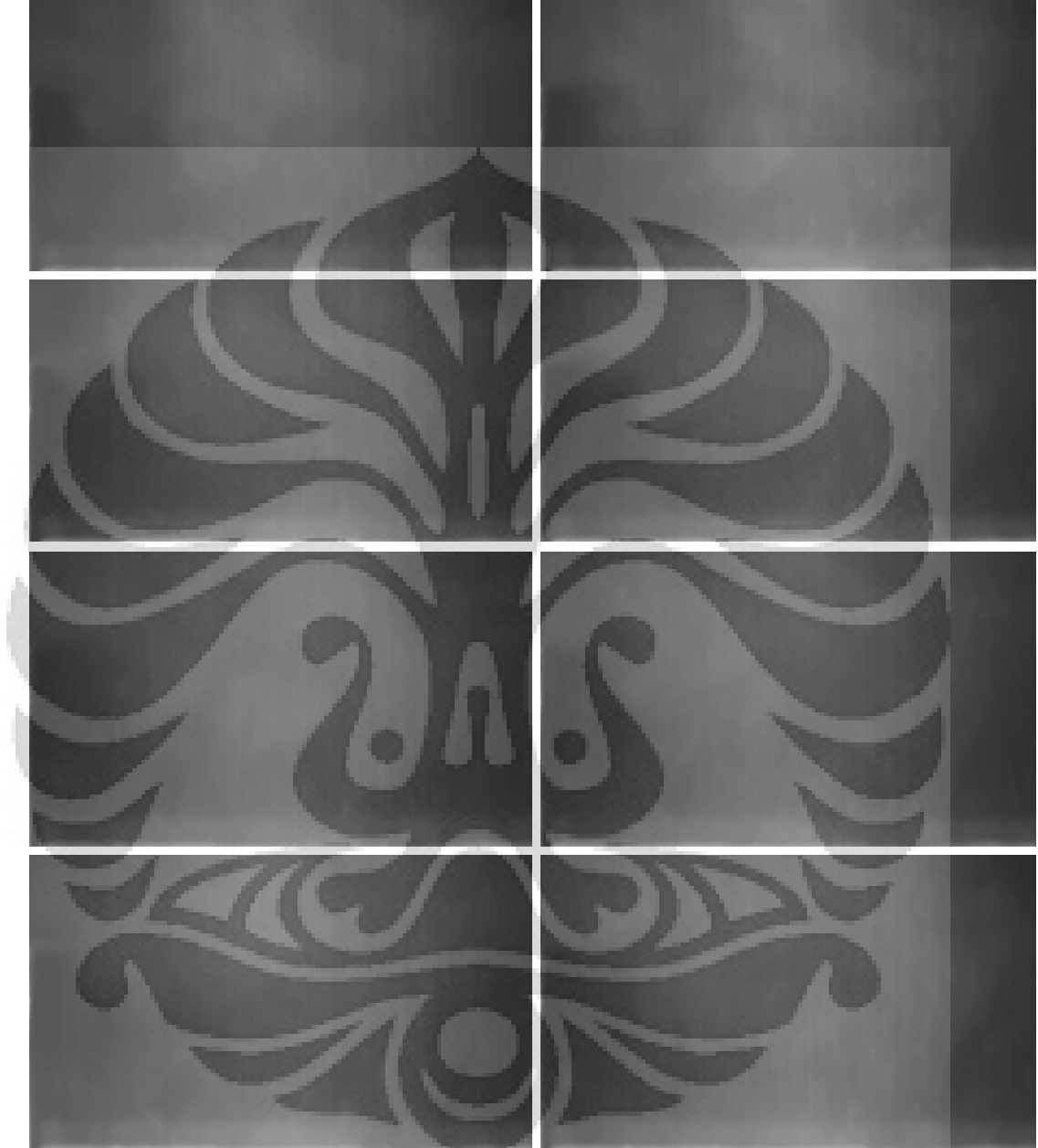
Gambar Hasil *High Speed Video Camera*

Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Tanpa Injeksi



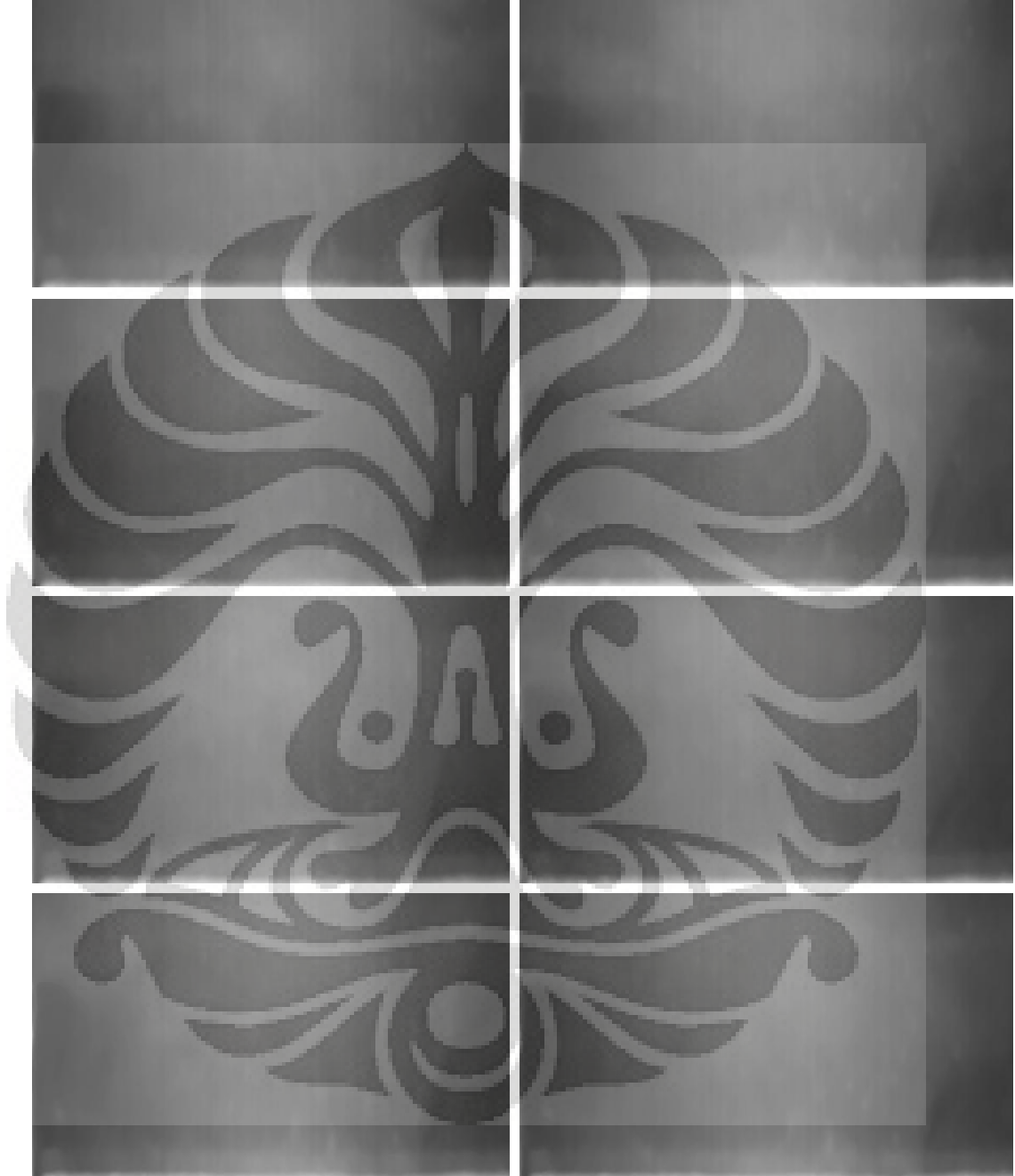
Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Rasio 0,1 100 °C



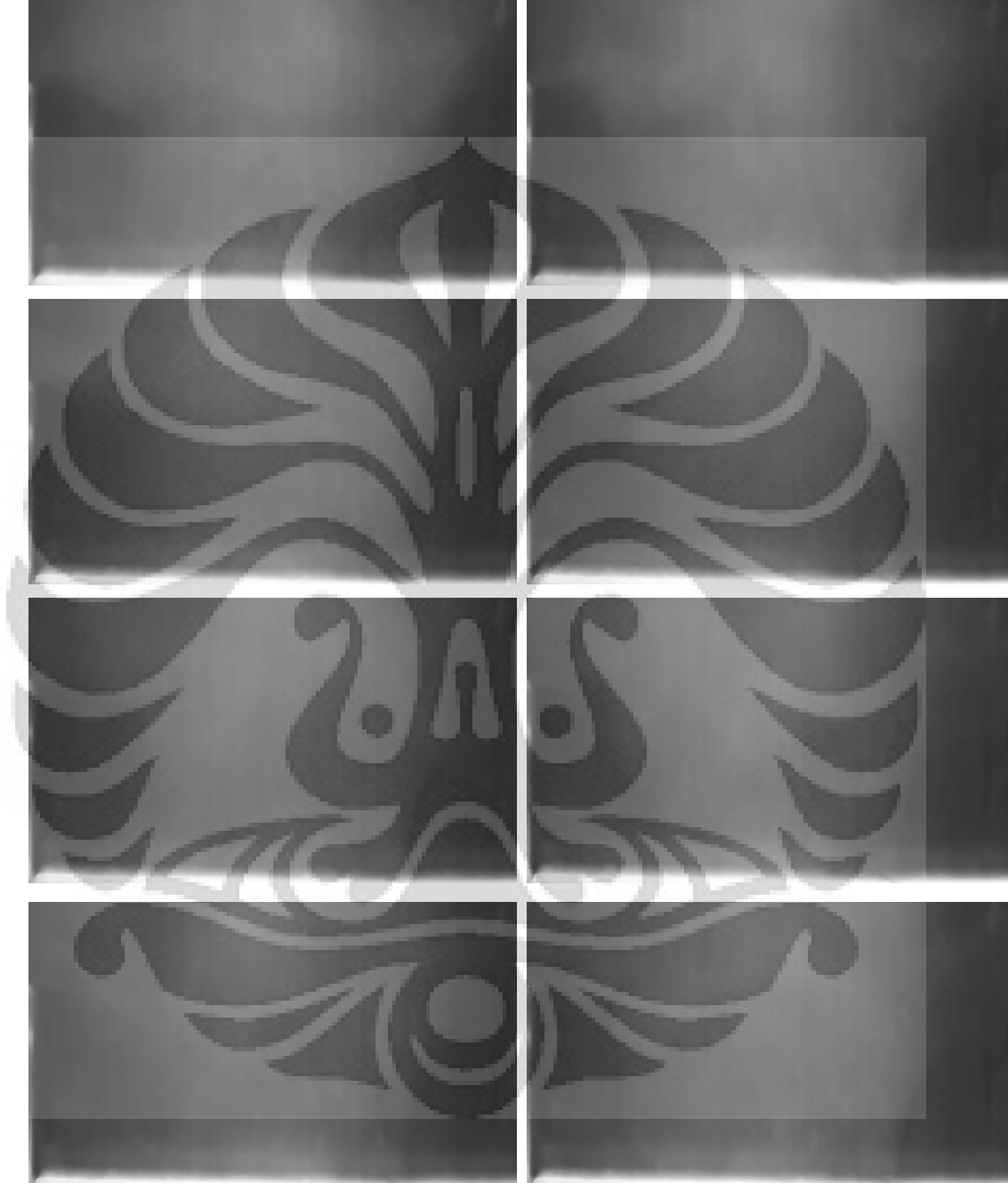
Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Rasio 0,1 300 °C



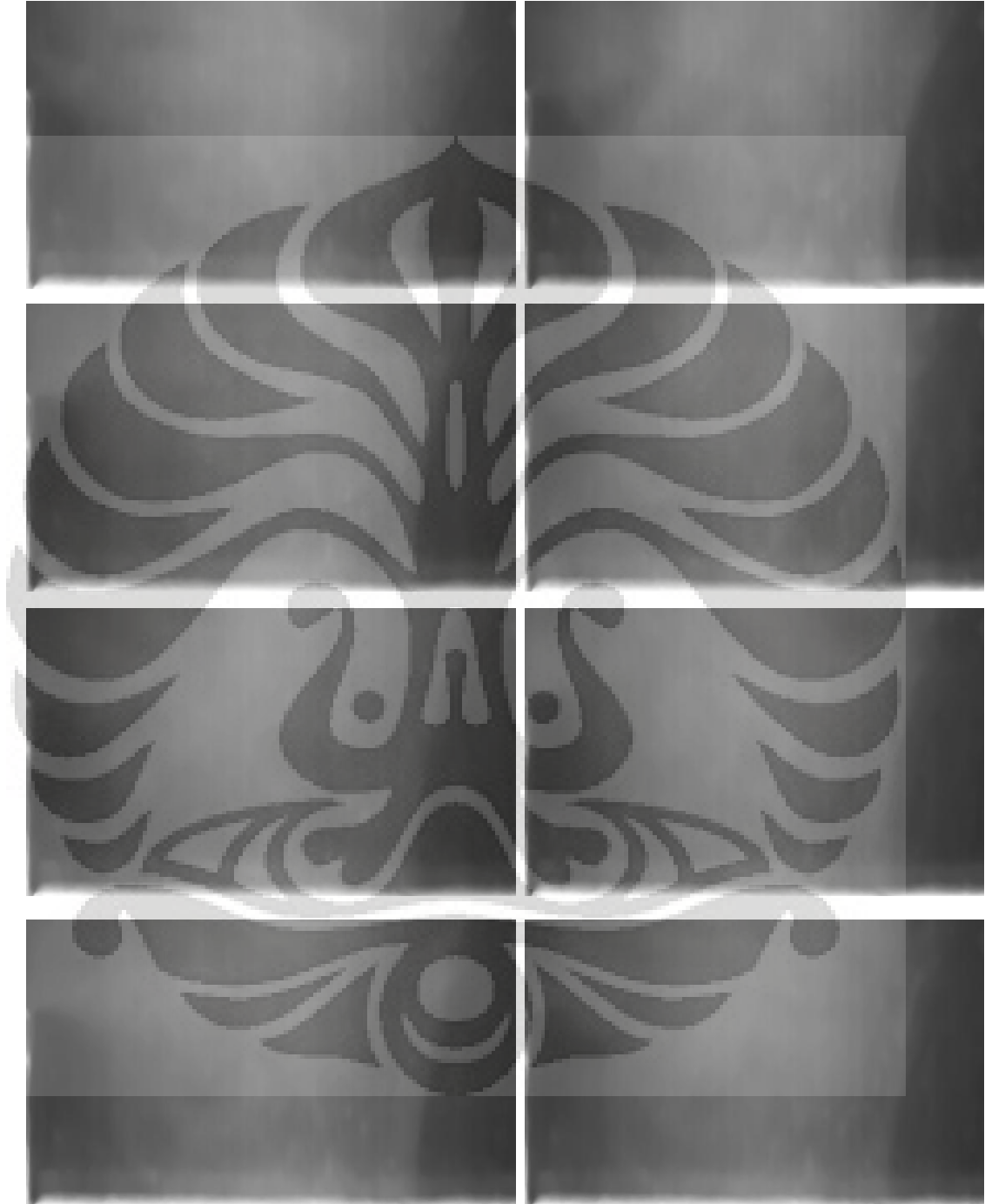


Lanjutan

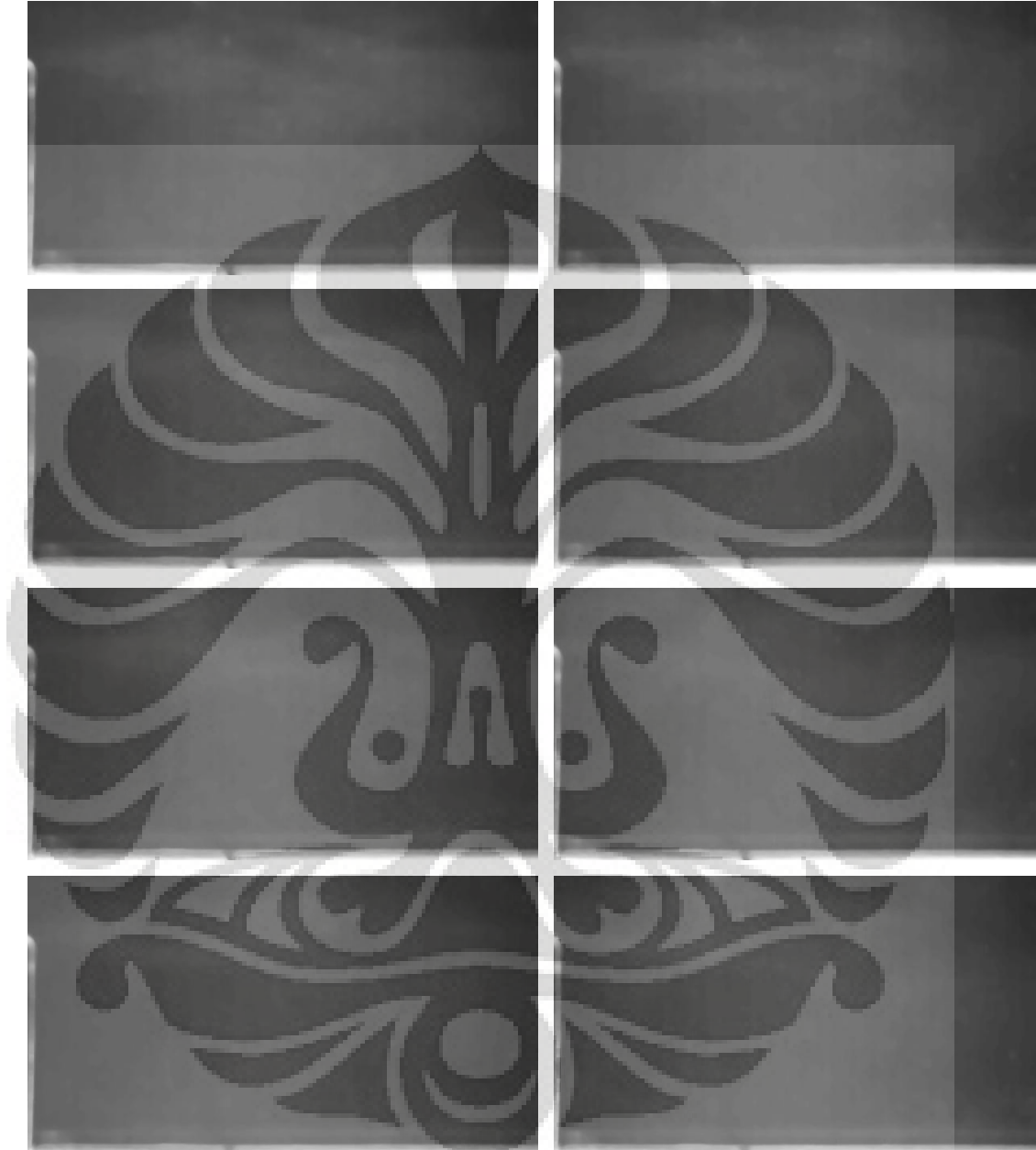
Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Rasio 0,5 100 °C

Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Rasio 0,5 300 °C

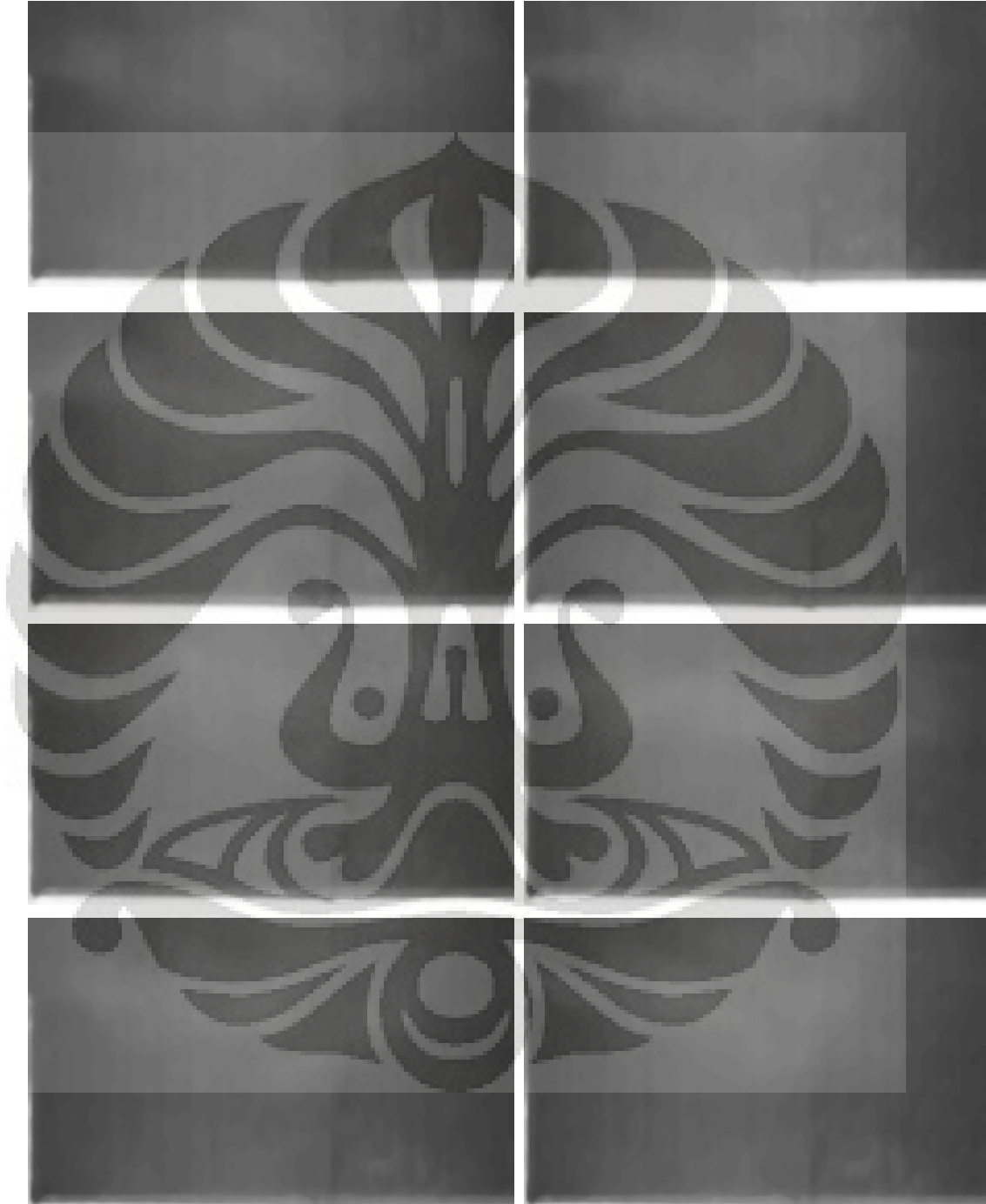


Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Tanpa Injeksi

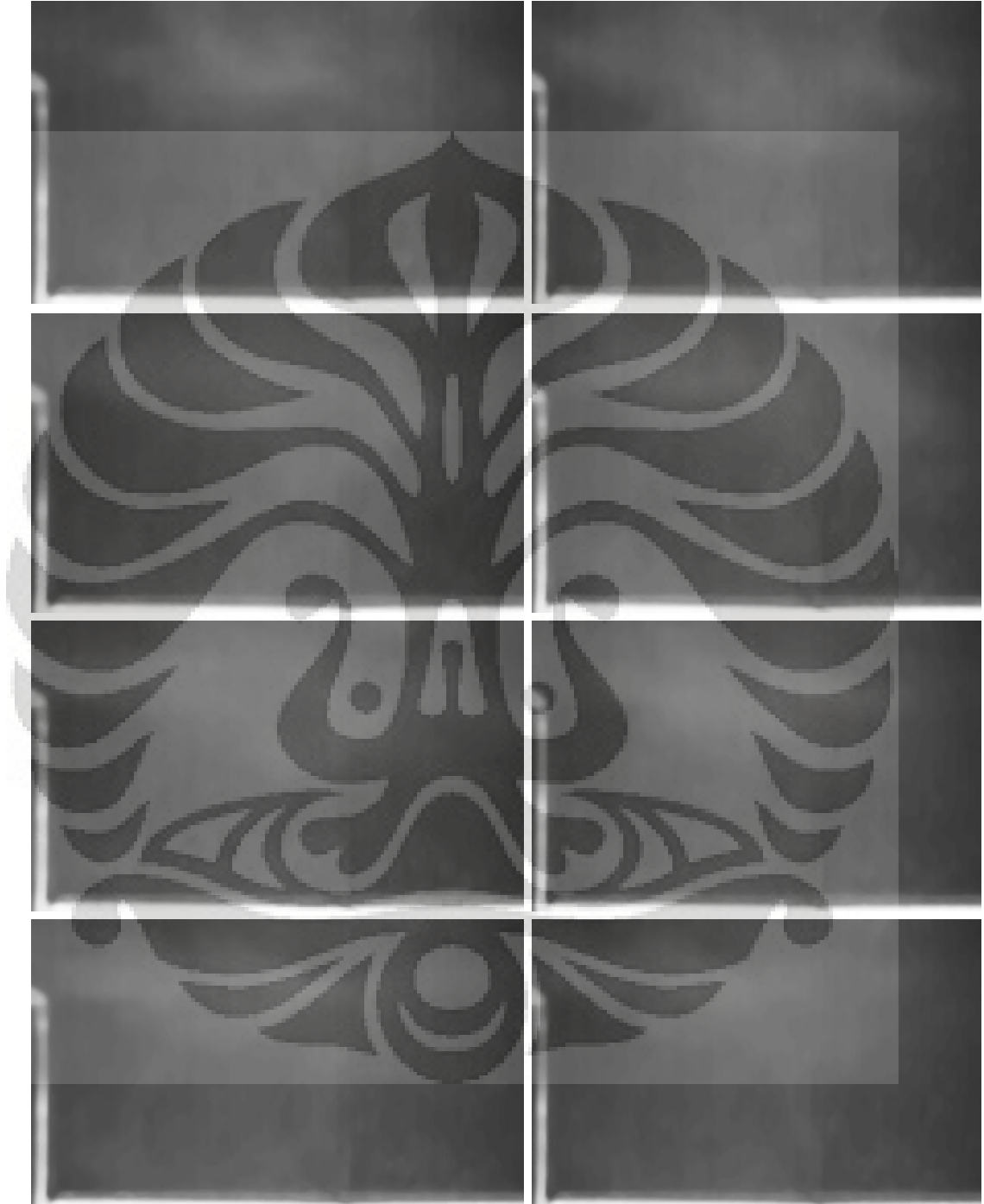
Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Rasio 0,1 100 °C



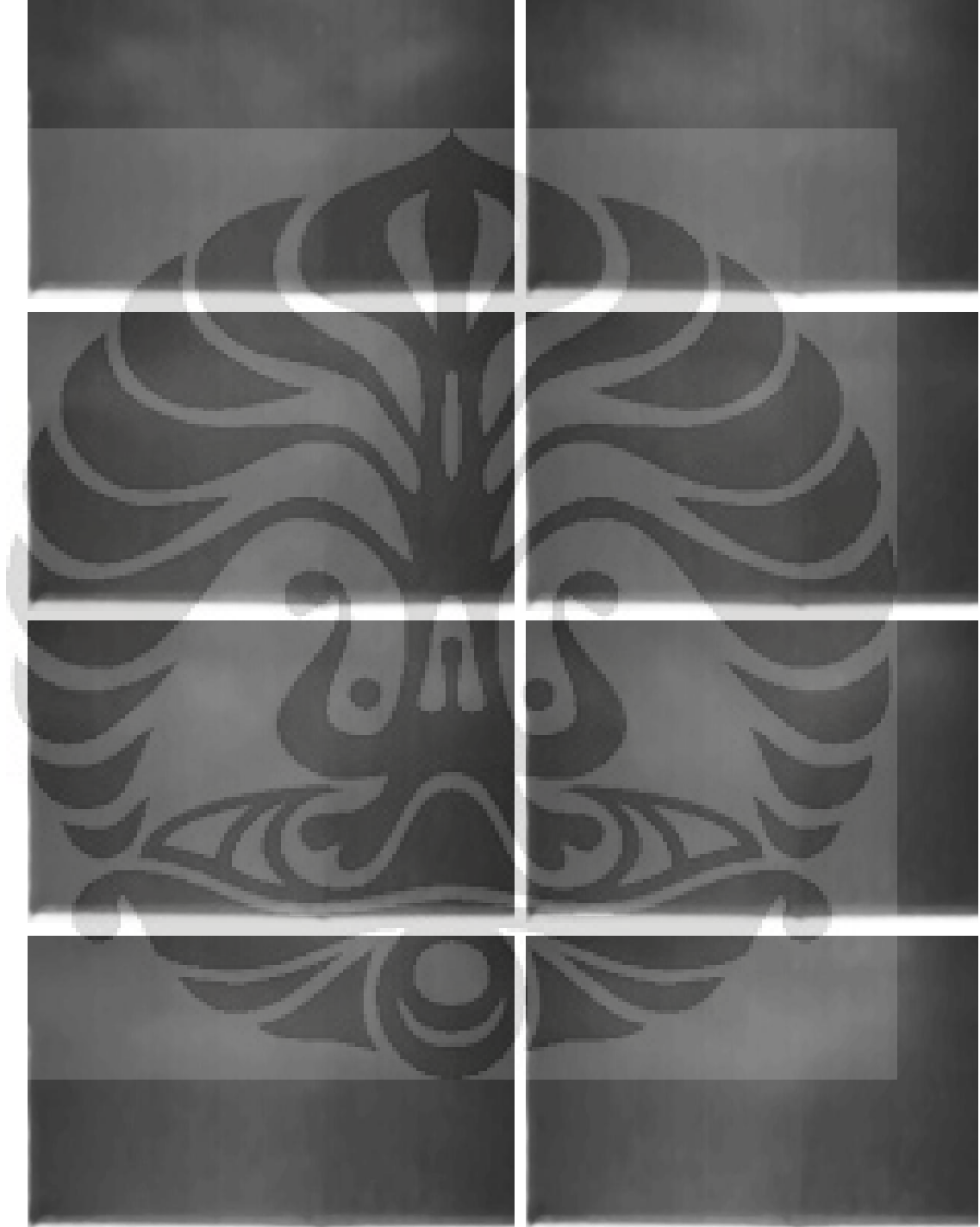
Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Rasio 0,1 300 °C



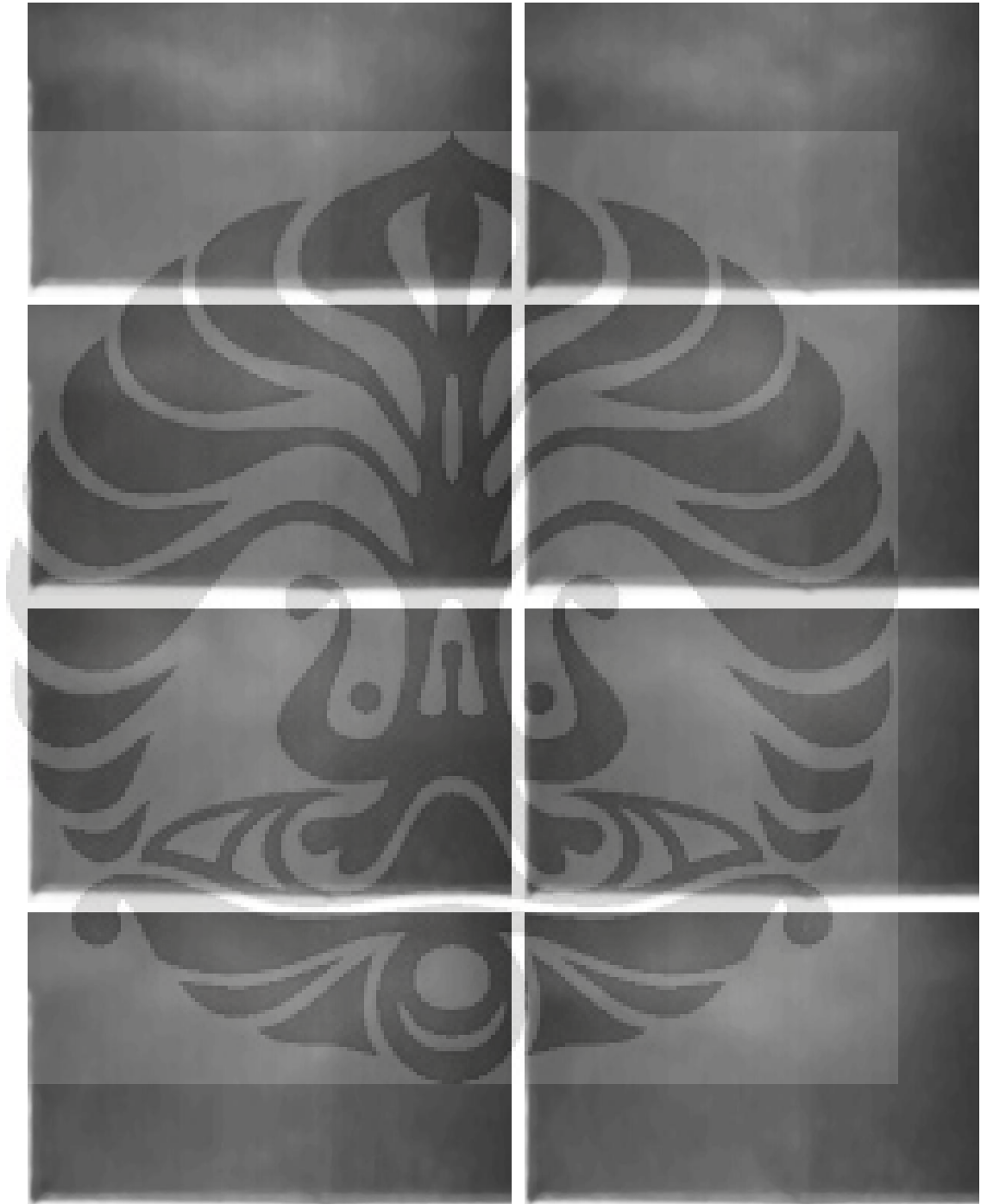
Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Rasio 0,5 100 °C



Lanjutan

Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Rasio 0,5 300 °C



## Lampiran 3

Tabel Hasil Pengukuran RGB *Averaging*Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Tanpa Injeksi

Posisi	Mean	Standar Deviasi			
2	93.74	5.072444871	70	82.79	6.079099814
4	95.68	4.828116307	72	80.71	6.307435087
6	96.04	4.990738898	74	76.75	6.301154295
8	98.49	5.068211487	76	72.86	5.865530193
10	98.24	4.938244893	78	70.49	5.565940798
12	98.55	4.926479678	80	67.15	5.589266409
14	101.14	4.966595485	82	64.36	5.23106494
16	101.71	4.866490242	2	98.06	5.243215915
18	103.19	5.143781182	4	96.32	5.080920938
20	106.83	5.820644207	6	97.81	4.961864671
22	108.79	6.176356024	8	98.77	4.929513263
24	112.61	6.519427068	10	99.84	4.945603087
26	112.97	6.899648652	12	101.6	4.988876516
28	112.81	7.11052002	14	102.68	5.116580297
30	115.02	7.371772535	16	104.66	5.435052712
32	115.55	7.228416147	18	105.72	5.879393908
34	115.39	7.319401366	20	109.02	6.69083498
36	115.67	7.314100123	22	110.35	6.712531624
38	116.91	7.385619388	24	111.73	6.674018673
40	117.82	7.353113819	26	112.79	6.651945869
42	116.29	7.275661655	28	112.9	6.684068198
44	114.79	7.136893759	30	114.52	6.750203888
46	112.15	6.718548124	32	115.62	6.684491323
48	110.55	6.541823488	34	115.56	6.72297433
50	108.85	6.446947441	36	115.73	6.520914294
52	108.07	6.288124128	38	117.18	6.526372297
54	103.71	5.978572851	40	116.77	6.453962842
56	102.92	6.112877614	42	114.92	6.271113831
58	101.07	6.251068596	44	114.24	6.162971866
60	97.52	6.122454119	46	112.98	5.922018493
62	94.15	6.475088237	48	112.13	5.842469037
64	92.5	6.59889798	50	109.74	5.764082448
66	90.36	6.412613832	52	108.93	5.798388839
68	85.28	6.375584742	54	106.21	5.675207467
			56	104.84	5.495121804
			58	102.8	5.455050482



60	99.63	5.264048064	64	92.42	4.53088169
62	96.3	5.630903188	66	90.89	4.403614218
64	94.47	5.607453553	68	87.1	4.60675832
66	92.52	5.684428491	70	84.55	4.533545004
68	88.57	5.599882755	72	81.45	4.573474245
70	85.83	5.773598916	74	78.35	4.393234008
72	82.68	6.026674712	76	75.78	4.24164062
74	79.28	5.818951969	78	73.61	4.148493703
76	75.67	5.528722065	80	69.77	4.052321943
78	73.03	5.078087208	82	67.85	3.937324631
80	69.62	4.86957157	2	73.18	2.690724809
82	66.35	4.824966635	4	73.08	2.784081736
2	73.99	2.907652738	6	74.09	2.913205739
4	72.97	2.786892118	8	76.85	4.000946858
6	74.13	2.787616918	10	79.54	4.314457724
8	74.13	3.268011473	12	81.34	3.706995843
10	77.02	4.126729818	14	81.59	3.559295697
12	78.82	4.445812921	16	82.66	3.898251356
14	82.03	5.168777672	18	84.53	3.865033615
16	86.33	5.464402709	20	87.14	3.781988147
18	89.85	5.698440332	22	88.28	4.170797952
20	93.5	5.303896033	24	91.96	4.355236022
22	95.63	5.240971072	26	93.03	4.804154347
24	99.32	4.646884478	28	93.3	4.889692312
26	101.8	5.513985891	30	95.66	4.634564912
28	102.85	6.102450245	32	98.43	4.593044808
30	104.69	6.362286293	34	99.24	4.54410485
32	106.12	6.515374203	36	100.07	4.250383227
34	106.26	6.180157234	38	101.15	4.073503939
36	106.83	6.077039085	40	100.72	4.075251743
38	108.74	5.957119499	42	100.03	4.041339412
40	109.4	5.719009591	44	100.06	4.03224378
42	107.41	5.195365067	46	99.23	4.294358526
44	106.36	5.086166622	48	99.39	4.232856093
46	106.51	5.307694053	50	98.18	4.409310627
48	106.48	5.413190026	52	97.45	4.459412925
50	104.45	5.431622709	54	95.64	4.480079364
52	105.02	5.283823226	56	95.83	4.581594712
54	101.75	4.987610914	58	98.1	4.379705262
56	101.3	4.848200749	60	93.02	4.201923561
58	99.41	4.433788995	62	90.17	4.334626847
60	97.8	4.275842406	64	89.84	4.464721422
62	94.77	4.350444073	66	87.84	4.687658415

68	84.43	4.559937533
70	82.02	4.426686747
72	79.3	4.053929382
74	76.72	3.858821718
76	73.28	3.623938368
78	71.26	3.413046863
80	69.85	3.488436888
82	67.38	3.884129844
2	74.44	3.254584955
4	72.16	3.103338053
6	75.03	3.585760277
8	76.32	3.419728857
10	78.42	3.0786984
12	80.14	3.238093965
14	82.31	3.59768444
16	82.72	3.684748802
18	84.26	3.686228808
20	88.29	3.965240385
22	88.84	3.948455778
24	89.99	4.418727364
26	90.86	4.052733209
28	90.89	4.116718807
30	91.65	3.998421406
32	91.99	4.391210229
34	93.22	4.685201288
36	94.86	4.380904385
38	96.49	4.179060355
40	95.42	4.183131107
42	96.03	3.975823401
44	95.99	3.849426036
46	95.8	3.53910335
48	95.48	3.807170269
50	96.15	4.125248692
52	95.98	4.204326776
54	93.76	4.413294882
56	93.28	4.280753261
58	91.98	4.336781845
60	94.65	3.677326104
62	88.75	3.901243003
64	87.27	4.29671004
66	86.16	4.41466793
68	82.74	4.234585832
70	81.17	4.283053286

72	77.82	3.851747603
74	75.93	3.657716349
76	73.26	3.600280573
78	71.63	3.380439873
80	69.34	3.579458793
82	67.81	3.433921691

Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Rasio 0,1 100 °C

Posisi	Mean	Standar Deviasi			
2	68.13	3.307460193	76	86.98	4.794820438
4	70.04	3.506573913	78	82.15	4.789835619
6	70.98	3.617284544	80	80.45	4.545382828
8	73.24	3.644339737	82	76.05	3.85394983
10	75.72	3.808496615	84	74.59	3.693510553
12	80	4.40122802	86	70.41	3.725031354
14	81.25	4.482243306	88	66.24	3.525076115
16	88.35	4.452487671	90	63.14	3.239450633
18	87.77	4.638399236	92	60.81	2.977542204
20	91.16	4.277920764	94	56.71	2.739073795
22	92.57	4.19354964	96	54.83	2.735088129
24	94.44	4.186124265	2	59.74	2.302282574
26	96.26	3.964628965	4	60.55	2.541851707
28	99.05	4.176654695	6	63.46	2.602950928
30	101.83	4.364040385	8	67.05	2.73769054
32	103.67	4.568712216	10	70.96	2.938064367
34	107.17	4.698280365	12	74.13	3.160104844
36	107.01	4.917460131	14	76.55	3.682815677
38	109.01	5.146186192	16	81.84	4.540502353
40	112.16	5.428469658	18	83.84	4.553287191
42	113.01	5.507121193	20	88.03	4.194753818
44	113.27	5.650949683	22	89.11	4.188428022
46	114.57	5.638074032	24	92.58	3.791790707
48	113.93	5.518847413	26	94.12	3.931984874
50	112.97	5.398877549	28	98.95	3.955548462
52	112.29	5.461749451	30	100.14	3.629439114
54	111.91	5.631835914	32	101.03	3.443101726
56	112.18	5.755375178	34	103.96	3.442030761
58	110.09	5.50734129	36	104.32	3.70154213
60	107.29	5.193391294	38	106.02	3.90798199
62	105.86	4.874951437	40	107.96	4.324746737
64	104.48	4.820997843	42	109.36	4.577183202
66	99.45	4.432330714	44	109.88	4.646536671
68	98.86	4.406789986	46	111.06	4.612192888
70	94.28	4.604290928	48	111.9	4.518692937
72	91.79	4.453791938	50	111.06	4.580359917
74	89.09	4.659854335	52	111.12	4.810037905
			54	109.31	4.855653791

56	110.84	4.916874675	46	105.98	3.874235017
58	107.73	4.707784226	48	104.92	3.609527236
60	104.54	4.290746444	50	103.63	3.390062721
62	103.29	4.123105626	52	104.1	3.404260551
64	99.98	3.703615487	54	103.82	3.51440039
66	96.13	3.862746184	56	104.98	3.759042969
68	95.6	3.770419155	58	102.52	3.591389816
70	92.38	3.970840687	60	100.23	3.386306352
72	91.88	3.752386446	62	99.41	3.577073461
74	86.59	4.303756874	64	98.04	3.634556369
76	84.4	4.060390089	66	94.13	3.780919668
78	81.38	4.05517502	68	92.75	3.66164946
80	76.86	3.250159281	70	88.88	4.004782495
82	73.88	3.138937606	72	88.32	3.947688238
84	71.26	3.228956738	74	82.73	4.01003791
86	66.91	3.306192537	76	81.7	3.864510893
88	64.11	3.030151511	78	78.17	3.519584457
90	61.25	2.692601161	80	73.05	3.091924967
92	58.46	2.409996018	82	71.51	3.1313985
94	55.7	2.21892685	84	68.98	3.135637451
96	54.46	2.340918407	86	64.74	3.161942249
2	56.63	2.114189675	88	62.21	2.81051417
4	55.28	1.580308115	90	57.63	2.297363443
6	57.09	1.559720255	92	55.75	2.01657275
8	59.19	1.516108789	94	54.41	1.945105227
10	61.07	1.720230194	96	52.75	1.980307088
12	64.28	2.416504697	2	56.26	1.838395216
14	66.19	2.618195847	4	56.13	1.747610201
16	68.83	2.819054932	6	58.66	1.798399962
18	72.56	3.273030289	8	59.99	1.736011916
20	76.18	3.635890121	10	61.59	1.540661015
22	78.5	4.172674457	12	63.46	1.522358617
24	83.03	4.719570259	14	64.24	1.524215314
26	85.27	4.858440536	16	66.5	1.686068884
28	89.38	4.386607258	18	68.35	1.911580868
30	92.05	3.883973806	20	71.43	2.029355274
32	94.09	4.063585519	22	72.96	2.458216484
34	97.65	3.988100989	24	76.43	3.075005133
36	99.96	4.132881207	26	78.56	3.660807992
38	100.5	4.183601947	28	82.29	4.105477986
40	103.95	4.249729641	30	87.38	4.432387687
42	104.46	4.269932462	32	89.88	4.210268832
44	107.65	4.240390205	34	92.2	3.878508513

36	93.12	4.071035904	20	74.17	1.966255735
38	94.71	3.948801122	22	75.51	2.153596944
40	96.78	3.944194045	24	76.03	2.409136649
42	98.09	3.912308988	26	77.1	2.543440762
44	98.91	3.858141071	28	78.96	2.728006635
46	99.4	3.753126643	30	83.35	3.252023457
48	98.04	3.579106034	32	86.38	3.331802679
50	101.34	3.580686126	34	88.91	3.363499861
52	99.46	3.560430686	36	90.71	3.254507364
54	98.52	3.654511533	38	93.97	3.317903683
56	99.27	3.973078597	40	97.08	3.483452949
58	101.53	3.887768959	42	98.4	3.417660609
60	97.09	3.57708758	44	98.54	3.534119409
62	95.67	3.689611405	46	98.74	3.70872572
64	96.57	3.640554403	48	100.84	3.994996871
66	91.93	3.713203305	50	100.45	3.699358394
68	89.75	3.384217678	52	101.69	3.718639916
70	88.12	3.649325384	54	105.21	4.11524635
72	86.37	3.470452478	56	102.83	3.881372245
74	84.55	4.002827284	58	100.56	4.102229007
76	79.25	3.577426421	60	99.92	3.849321074
78	74.42	3.06660079	62	96.86	3.385217418
80	71.23	3.0300015	64	93.26	3.41823689
82	66.03	2.942736307	66	89.6	3.720323653
84	62.04	2.340918407	68	89.9	3.660807992
86	58.4	1.70192998	70	85.33	3.935066388
88	58.34	1.87552013	72	82.97	3.830697381
90	55.93	1.768295418	74	81.1	3.837297028
92	53.36	1.767952648	76	78.22	3.179018971
94	51.82	1.85153499	78	74.76	2.726599243
96	51.87	1.987435279	80	69.91	2.507745577
2	61.43	1.954301136	82	64.65	1.896301557
4	59.13	1.701573841	84	63.84	1.836773632
6	61.37	1.877995923	86	61.69	1.715526247
8	63.14	1.88762584	88	59.5	1.627385584
10	66.07	1.827511417	90	56.94	1.405472709
12	67.01	2.003305349	92	55.68	1.517706936
14	69.66	1.89619502	94	53.53	1.800645227
16	69.5	1.831569399	96	52.11	1.791647287
18	71.59	1.977142106			

Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Rasio 0,1 300 °C

Posisi	Mean	Standar Deviasi
2	82.82	4.456115988
4	86.06	4.524623987
6	86.99	4.231626953
8	89.65	4.048643619
10	93.25	3.6481073
12	97.77	3.588350962
14	98.49	3.718150947
16	103.94	4.206584545
18	104.81	4.358620855
20	107.84	4.691912233
22	110.01	4.921443494
24	112.51	4.916104231
26	114.12	4.871935711
28	118.43	4.896288019
30	122.4	5.240431396
32	125.01	5.448334005
34	128.78	5.563553838
36	128.28	5.72550558
38	131.59	5.70375563
40	134.85	5.568843704
42	136.42	5.672937707
44	136.82	5.470684038
46	137.93	5.194247012
48	137.74	5.203767089
50	137.31	5.385952548
52	136.85	5.53609825
54	136.97	5.571019891
56	136.08	5.700221509
58	134.3	5.616309223
60	131.16	5.554314003
62	129.47	5.618476015
64	128.54	5.733641641
66	122.01	5.633046433
68	120.04	5.638351718
70	115.47	5.395883204
72	113.45	5.075938486
74	110.83	4.972357935
76	106.94	4.743267424
78	103.2	4.461496329
80	102.57	4.452170053
82	97.44	4.036437573
84	95.27	4.22168524
86	90.63	4.43552008
88	85.14	4.595331403
90	80.93	4.324361341
92	77.62	3.907141868
94	72.67	3.60392603
96	70.16	3.694112159
2	70.48	2.401094027
4	71.34	2.288398496
6	74.77	2.280240108
8	78.52	3.15541862
10	85.1	3.978972508
12	89.63	3.875056207
14	92.14	3.500706999
16	97.23	3.319045135
18	99.57	3.40528407
20	102.53	3.702183358
22	104	4.043937975
24	107.76	4.607536645
26	109.99	5.05089251
28	116.5	5.463894345
30	118.19	5.234414094
32	119.54	5.249521383
34	123.86	5.184855569
36	123.87	5.113855214
38	126.7	4.945112882
40	129.58	4.915559711
42	130.95	4.979757002
44	131.92	5.037345381
46	133.48	5.192953656
48	134.05	5.359782899
50	133.35	5.04424865
52	132.95	4.957394232

54	131.95	4.854447092	44	127.64	5.099019514
56	132.59	5.005804711	46	125.73	5.190317326
58	129.67	5.288399731	48	123.21	5.108914767
60	126.34	5.255828895	50	121.48	4.803817926
62	124.87	5.333106056	52	123.35	4.922377269
64	121.33	5.136628222	54	124.31	4.90329718
66	116.5	4.998545243	56	124.5	5.045840371
68	114.4	4.794135728	58	121.79	5.008870919
70	111.1	4.542448501	60	119.45	5.16729224
72	110.96	4.614634166	62	118.05	5.16838681
74	106.41	4.199314518	64	116.56	4.885393608
76	102.71	3.768168111	66	111.67	4.598847023
78	100.57	3.703383656	68	109.23	4.435850277
80	96.18	3.614281437	70	105.74	4.238770071
82	93.6	3.778447653	72	105.65	4.18601568
84	89.59	4.244675809	74	101.03	3.664407017
86	84.32	4.54045786	76	98.54	3.578541546
88	79.67	4.041901743	78	95.66	3.565760293
90	75.94	3.743222832	80	89.87	4.103349211
92	72.63	3.590827259	82	88.36	4.377294492
94	68.94	3.595957326	84	83.5	4.75590011
96	67.73	3.368541332	86	78.06	4.286506901
2	67.74	2.348844547	88	75.24	3.693893405
4	67.12	2.249219842	90	69.68	3.431817847
6	68.82	2.467465063	92	67.17	3.291924616
8	70.76	2.464618314	94	65.98	3.310589071
10	74.3	2.578446012	96	63.88	3.140095862
12	78.85	3.175331049	2	66.44	2.438309565
14	82.3	3.471369188	4	67.58	2.17541358
16	85.65	3.89088549	6	70.02	2.070573043
18	91.15	3.445447883	8	71.37	2.22953091
20	94.41	3.376971927	10	73.97	2.320832313
22	97.38	3.576918148	12	76.79	2.41133686
24	101.15	4.165017856	14	78.14	2.744673446
26	102.69	4.206428462	16	81.91	3.251650707
28	106.83	4.128479555	18	86.14	3.479739338
30	109.46	4.273904845	20	88.98	3.081567881
32	111.08	4.440356706	22	91.65	2.85466126
34	115.18	4.447437124	24	96.21	2.977627013
36	118.18	4.805836099	26	98.23	2.908989897
38	118.51	4.882239509	28	102.1	3.28455215
40	122.87	5.024947861	30	106.14	3.552364414
42	123.33	4.919595943	32	108.71	3.879185586

34	109.3	3.881723558
36	109.99	3.846486
38	111.95	4.315862216
40	115.31	4.467740712
42	115.8	4.658477664
44	117.91	4.877530423
46	118.09	4.692773296
48	116.26	4.615914499
50	120.23	4.720469074
52	118.68	4.795789399
54	118.21	4.760909853
56	117.89	4.809197837
58	120.81	4.77108293
60	115.77	4.740487551
62	112.82	4.490832413
64	113.91	4.50744614
66	108.94	4.309960275
68	105.55	3.893467723
70	103.89	3.775733255
72	102.72	3.69580707
74	99.54	3.839967908
76	95.18	3.632888491
78	90.73	3.944770224
80	86.19	4.272959375
82	77.27	4.083274582
84	72.85	3.004104936
86	69.77	2.84089899
88	68.85	2.833351159
90	65.09	2.614856544
92	61.65	2.232994095
94	59.79	2.134753315
96	59.68	2.219723342
2	72.87	2.942959412
4	70.55	2.72902469
6	73.22	2.455585264
8	74.31	2.322898746
10	78.5	2.891488729
12	80.35	3.216921799
14	84.34	3.491562702
16	85.23	3.251277915
18	88.94	3.200047348

20	91.25	2.877621773
22	94.24	2.63762596
24	95.3	2.74379005
26	96.4	2.783138262
28	98.96	2.962714426
30	103.03	3.181131239
32	106.22	3.396373586
34	106.9	3.320140559
36	108.48	3.605046967
38	111.6	3.940004615
40	116.46	4.231245011
42	116.75	4.500908999
44	117.87	4.407569247
46	118.66	4.446040118
48	120.89	4.473536102
50	120.36	4.52087191
52	122.56	4.71730106
54	127.58	4.868409817
56	123.44	4.763868643
58	120.58	4.833082543
60	120.19	4.737173005
62	116.68	4.413237663
64	110.81	4.139291893
66	106.27	3.714168885
68	104.92	3.502538762
70	100.86	3.336649865
72	99.54	3.363499861
74	100.86	3.702797195
76	93.92	3.568591947
78	90.24	3.793082486
80	78.22	3.412676902
82	74.11	2.494438258
84	73.32	2.237332467
86	70.7	2.403616803
88	68.63	2.352647338
90	65.43	2.01699847
92	63.56	2.136361487
94	61.89	2.023573197
96	60.29	1.902045682



## Kondisi Ketinggian Step 20 mm Rasio 0,5 100 °C

Posisi	Mean	Standar Deviasi			
2	73.5	4.306078378	78	92.46	5.558614564
4	75.97	4.596053888	80	88.59	6.000071592
6	76.9	4.656707279	82	84.91	6.178751973
8	78.41	5.019634986	84	82.14	5.790700864
10	82.72	5.439036547	86	77.93	5.497871347
12	85.38	5.595872466	88	74.03	5.001610565
14	89.37	5.211670752	90	70.49	4.788234614
16	92.33	4.878066486	92	66.74	4.483335888
18	94.99	4.755468005	94	62.94	4.213482696
20	97.13	4.879013019	96	60.24	3.986068954
22	99.95	4.943038946	98	58.98	3.926898604
24	101.48	4.86020201	100	57.45	3.648659312
26	103.15	4.714599501	102	56.26	3.507600976
28	105.78	5.033884326	2	65.84	2.572572088
30	109.91	5.361822535	4	62.67	2.145632101
32	112.56	5.613500081	6	64.87	2.367266755
34	115.7	5.803649314	8	67.99	2.597828197
36	118.6	6.050190988	10	72.97	2.901112182
38	117.94	6.16932468	12	76.3	3.392874583
40	120.43	6.370504951	14	80.12	3.846691576
42	123.61	6.389575515	16	83.18	4.297141022
44	123.77	6.305288104	18	88.62	3.794240752
46	124.69	6.551900907	20	91.5	3.563579372
48	126.86	6.688853759	22	93.29	3.454105083
50	124.62	6.830734566	24	96.64	3.794438868
52	124.87	7.018645394	26	98.52	4.108389706
54	123.91	6.892086702	28	102.68	4.625702324
56	124.09	6.955306511	30	106.16	4.909205708
58	121.85	6.824222826	32	107.01	4.830325525
60	118.54	6.828816293	34	110.72	5.325044568
62	117.3	6.717498435	36	112.46	5.418582796
64	115.34	6.232053271	38	113.35	5.471674169
66	112.26	5.81239492	40	114.69	5.554478704
68	108.44	5.339766041	42	117.38	5.633341467
70	105.82	5.096470546	44	118.64	5.706694838
72	102.28	4.858389845	46	121.25	5.902832188
74	97.95	4.986709139	48	123.19	5.950793357
76	96.36	5.283947681	50	121.47	5.952615729
			52	121.06	5.899429176
			54	120.88	5.994198226

56	121.1	6.013444273	40	107.3	4.413228903
58	118.94	5.930185176	42	109.26	4.715783799
60	114.43	5.813946675	44	111.93	5.08436134
62	113.75	5.789105778	46	115.01	5.382751344
64	111.84	5.427375088	48	112.73	5.086831932
66	107.93	5.137164969	50	110.12	4.85053669
68	105.03	4.84741402	52	111.29	4.975886873
70	103.34	4.78635033	54	112.22	5.184276055
72	101.5	4.505652235	56	112.95	5.112396497
74	96.69	4.397408249	58	110.36	4.756303468
76	94.9	4.516959261	60	107.9	4.610587509
78	91.45	4.82992533	62	107.11	4.556748894
80	87.33	5.103482404	64	106.41	4.588875125
82	83.44	5.244085197	66	103.34	4.429405218
84	79.3	4.672891038	68	100.49	4.188431129
86	75.14	4.263320544	70	98.7	4.181708245
88	70.29	4.089710288	72	96.98	4.285379323
90	66.22	3.794240752	74	92.29	4.773454483
92	63.39	3.353397518	76	89.49	4.806612356
94	60.12	2.965400421	78	87.97	4.962877657
96	58.13	2.768254006	80	81.39	4.782579535
98	56.49	2.760095496	82	77.12	4.297915662
100	56.51	2.822421884	84	73.4	3.663902817
102	55.77	2.809723238	86	69.12	3.430927409
2	62.47	2.421712353	88	65.48	3.037919006
4	60.24	2.197702643	90	61.38	2.739867306
6	62.06	2.110102927	92	59.2	2.582155257
8	63.38	2.061761166	94	57.76	2.54107156
10	66.59	2.245413424	96	56.91	2.462388902
12	68.98	2.230345619	98	54.34	2.742178819
14	72.32	2.056023754	100	53.71	2.770115434
16	73.7	2.032912187	102	56.14	2.760056588
18	77.65	2.563120682	2	61.86	2.480508206
20	81.08	3.217054799	4	61.71	2.238180103
22	84.15	3.530457804	6	63.74	2.272935792
24	86.67	3.969952651	8	66.24	2.35904161
26	90.86	3.674000788	10	68.31	2.258812448
28	93.66	3.997475578	12	69.57	1.968556521
30	96.76	4.249216625	14	72.21	1.909237807
32	98.9	4.45327016	16	73.12	1.964187528
34	101.55	4.568540639	18	75.95	2.152228526
36	103.79	4.518551869	20	77.9	2.3150208
38	105.44	4.322630849	22	81.23	2.857136721

24	84.41	3.403334983	8	68.73	2.442904727
26	87.06	3.327066704	10	72.06	2.28100064
28	89.73	3.484131923	12	73.18	2.088875789
30	94.39	3.49431915	14	76.2	2.104344222
32	94.57	3.725809721	16	76.59	2.146832959
34	97.1	3.415272954	18	79.63	2.670154506
36	98.46	3.674146931	20	80.87	3.095626557
38	99.32	3.601259802	22	85.08	3.350001282
40	101.78	3.482590476	24	87.04	3.50374125
42	102.67	3.418415863	26	87.81	3.219957631
44	104.25	3.362256391	28	89.57	3.027792228
46	105.39	3.586079424	30	93.3	2.828578991
48	105.68	3.843619473	32	96.63	3.032187012
50	107.18	4.126568222	34	97.96	2.719212224
52	106.55	4.031954622	36	98.73	2.824855925
54	105.95	4.101928345	38	100.12	3.108711847
56	106.47	4.344981701	40	103.35	3.239541724
58	106.36	4.318753559	42	104.08	3.542876789
60	105.58	4.225571598	44	106.17	3.676133904
62	102.63	3.869848865	46	107.05	3.649336192
64	102.42	3.913969606	48	110.27	3.981702135
66	104.52	4.128077317	50	109.36	4.155896734
68	97.73	3.897555186	52	110.32	4.272806203
70	95.88	3.931681391	54	114.96	4.749299098
72	95.33	3.992072256	56	111.86	4.515651475
74	91.54	4.32054351	58	109.1	4.28780938
76	87.21	4.689339559	60	106.66	4.100226295
78	81.24	4.44513615	62	109.69	4.401313846
80	77.04	3.946294316	64	103.16	3.825584204
82	70.64	3.187443147	66	99.78	3.966732363
84	64.92	2.74057272	68	97.94	4.050900371
86	62.85	2.215029884	70	95.83	4.052596639
88	62.26	2.222918347	72	91.8	4.374834312
90	59.52	2.160644552	74	90.52	4.677002851
92	57.69	2.141273347	76	85.76	4.768254848
94	55.98	2.202778626	78	81.17	4.534968184
96	54.86	2.212458864	80	73.89	3.152652568
98	53.95	2.438064412	82	67.62	2.642136423
100	55.14	2.380070099	84	66.63	2.568519771
102	55.84	2.392445872	86	65.54	2.823410966
2	69.74	2.94362845	88	63.55	2.481720111
4	65.06	2.74304024	90	60.47	2.16029661
6	67.32	2.8938479	92	58.67	2.078516769

94	57.24	1.974765635
96	55.79	2.027040146
98	54.1	2.18476449

100	56.43	2.169918918
102	54.66	2.368944623



Kondisi Ketinggian *Step* 20 mm Rasio 0,5 300 °C

Posisi	Mean	Standar Deviasi
2	83.8	5.131189814
4	86.11	5.279495175
6	87.27	4.978309387
8	89.65	4.574163344
10	92.87	4.087483915
12	94.9	4.149507904
14	98.42	4.205889317
16	102.15	4.422736038
18	104.14	4.702979885
20	106.03	5.249724179
22	107.01	5.593525253
24	109.6	5.828574202
26	111.42	6.084292388
28	115.38	6.604768754
30	119.06	6.810707935
32	122.47	6.679301558
34	126.04	6.412981883
36	129.06	6.269934546
38	128.85	6.388030267
40	130.09	6.245029707
42	133.63	6.146124916
44	133.1	6.149152723
46	133.65	6.360988777
48	136.93	6.445690862
50	134.08	6.644405076
52	134.28	6.732571927
54	133.45	6.890084711
56	134.24	6.990134491
58	131.43	7.033723575
60	128.99	6.963241535
62	127.13	6.764116153
64	125.88	6.81868429
66	123.04	6.589986403
68	119.27	6.421991918
70	116.08	6.524197155
72	113.2	6.28598945
74	106.8	5.752657586
76	106.6	5.898346806
78	103.39	5.730135727
80	99.1	5.486870016
82	96.45	5.489305534
84	92.64	5.396515194
86	85.77	5.590497596
88	80.09	4.968992965
90	74.74	3.867815921
92	68.09	3.377180264
94	63.89	2.834266979
96	61.66	2.467290974
98	60.34	2.460298621
2	80.97	4.467816708
4	77.97	4.223789299
6	79.31	4.511305929
8	83.33	4.875702539
10	88.2	4.6499654
12	91.14	3.972778662
14	95.34	3.605770952
16	98.25	3.677278374
18	102.16	3.886865417
20	103.39	4.120006729
22	104.43	4.743583472
24	109.99	5.620507006
26	110.98	5.564687105
28	115.49	5.848821494
30	119.02	6.049351491
32	121.22	5.979933441
34	124.35	5.618339841
36	126.07	5.481598379
38	127.62	5.434306135
40	128.06	5.546741082
42	131.28	5.72883967
44	132.51	5.695647113
46	132.91	5.791680616
48	134.9	5.831665014
50	134	5.751710895

52	133.56	5.904487302	40	123.73	5.373311386
54	134.34	6.215295728	42	125.66	5.286335833
56	134.47	6.140080949	44	127.8	5.423217415
58	129.58	6.450650439	46	129.39	5.801553223
60	126.36	6.220773248	48	126.13	5.739838201
62	125.22	6.036522506	50	124.62	5.706084992
64	124.42	5.888485155	52	126.55	5.748990441
66	118.76	5.704852893	54	126.1	5.708565737
68	116.96	5.685102993	56	126.72	5.539971762
70	114.09	5.43492556	58	123.84	5.578477027
72	112.14	5.129240578	60	121.2	5.639148872
74	106.73	4.728866483	62	119.72	5.666682198
76	104.96	4.691872053	64	119.71	5.469175549
78	101.7	4.608128849	66	116.58	5.446735783
80	97.48	4.403666339	68	112.97	5.248592456
82	95.1	4.557922056	70	110.23	5.149814954
84	87.33	5.430588102	72	108.46	4.84349109
86	78.65	4.687565181	74	102.51	4.401417413
88	71.89	3.179295644	76	100.56	4.255386802
90	67.46	3.030897001	78	101.58	4.486304793
92	64.47	2.67981084	80	91.21	4.504980742
94	61.99	2.448883358	82	84.03	5.270711151
96	60.3	2.422992177	84	76.52	4.086926755
98	58.01	2.316962846	86	70.27	3.060544183
2	70.72	3.414616224	88	67.87	2.821417381
4	66.18	2.841105628	90	62.5	2.736008511
6	67.47	2.701924507	92	61.22	2.701741279
8	69.81	2.608781818	94	59.78	2.528686898
10	73.35	2.697597024	96	59.42	2.580966125
12	76.24	3.093909699	98	56.88	2.611247568
14	81.56	3.686206561	2	66.38	3.400349429
16	85	4.107877002	4	65.44	2.673263293
18	91.58	3.382628892	6	66.55	2.473463119
20	94.73	3.658734294	8	69.75	2.399257311
22	96.98	4.190418113	10	72.35	2.520804523
24	100.39	4.547700975	12	74.63	2.473463119
26	104.31	4.728887421	14	78.31	2.617496347
28	108.51	5.233384835	16	79.65	2.919005663
30	110.13	5.327139555	18	85.22	3.692834914
32	113	5.374545802	20	87.89	3.414616224
34	116.56	5.208028836	22	91.31	3.326193674
36	119.11	5.365179262	24	94.03	3.456891524
38	121.77	5.367337965	26	97.81	3.330863772

28	100.24	3.691628206
30	104.96	3.999207842
32	107.6	4.036246664
34	110.5	4.420810373
36	111.55	4.712696145
38	113.68	4.930467011
40	115.6	5.160474305
42	116.97	5.185967357
44	120.09	5.223992631
46	120.36	5.178936777
48	120.88	5.09888359
50	122.17	5.28378802
52	122.3	5.155771542
54	120.66	5.296346583
56	121.18	5.398111147
58	121.01	5.270128786
60	118.04	5.166552751
62	115.53	5.139981123
64	115.66	5.247120851
66	114.62	5.347174696
68	109.93	4.926931445
70	105.82	4.606259194
72	105.92	4.564347415
74	101.97	4.536343885
76	98.33	4.526774035
78	92.4	4.616522201
80	85.04	4.899019906
82	73.72	3.559480438
84	68.86	2.743705668
86	65.61	2.835210017
88	65.8	3.054132082
90	62.67	2.97783894
92	58.44	2.821452473
94	56.09	2.823346796
96	55.55	2.821347196
98	55.19	2.844588401
2	72.31	3.415196093
4	68.78	3.061061746
6	72.79	2.950448867
8	74.64	3.031517608
10	77.32	3.00823951
12	78.06	3.073553753
14	81.55	3.236212185
16	82.86	3.379114654
18	87.58	3.232140571
20	88.75	3.189555976
22	92.68	2.864082802
24	93.82	3.036119201
26	95.32	2.962605222
28	98.31	3.253543384
30	100	3.17960705
32	104.05	3.535477897
34	106.47	3.418383614
36	108.92	3.770232548
38	112.65	4.369357748
40	113.77	4.616457859
42	115.34	4.628217372
44	117.62	4.601140625
46	118.25	4.818055974
48	121.25	4.842264424
50	119.88	4.937089374
52	119.63	5.14873819
54	127.62	5.705408239
56	123.96	5.56756875
58	119.74	5.404581848
60	117.04	5.246498125
62	116.29	5.201979821
64	113.33	5.044436206
66	109.61	4.685283469
68	107.55	4.63381886
70	105.26	4.559833243
72	101.74	4.458455089
74	98.35	4.282175814
76	96.44	4.206218875
78	91.4	4.165630234
80	77.41	3.462900976
82	69.98	2.554747086
84	65.36	2.926898132
86	64.4	3.184803023
88	63.12	3.05818169
90	60.06	2.833952563
92	58.01	2.578433019
94	55.84	2.558658374
96	55.61	2.603158782
98	53.99	2.816113465

Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Tanpa Injeksi

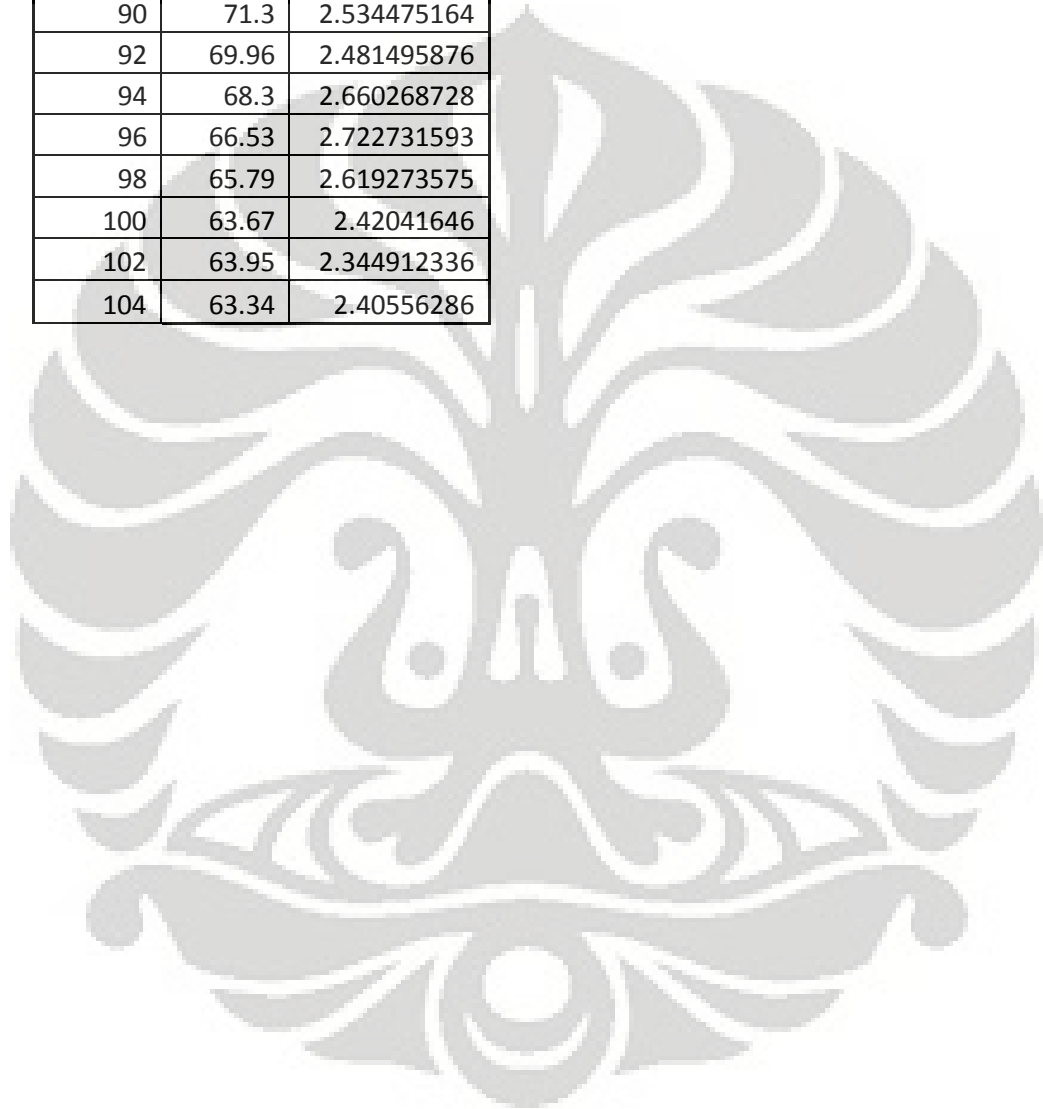
Posisi	Mean	Standar Deviasi
2	68.35	3.641727367
4	70.93	3.711822162
6	72.55	4.030060315
8	73.86	4.168125157
10	73.7	4.040929214
12	77.12	4.314126003
14	77.64	4.29339811
16	79.23	4.201131389
18	81.43	4.959539263
20	81.78	4.746483847
22	83	4.846433822
24	83.91	5.182052042
26	85.2	5.469157446
28	87.58	5.5051551
30	88.51	5.551076963
32	91.92	5.384227056
34	92.26	5.20276012
36	92.1	5.147257272
38	90.29	5.248007637
40	97.64	5.257582925
42	92.14	5.70768112
44	91.57	5.706622868
46	91.94	5.590090242
48	91.21	5.504075897
50	90.71	5.651040384
52	91.23	5.411300973
54	89.58	5.2511762
56	88.98	5.223992631
58	87.37	5.296458746
60	86.62	5.548240288
62	86.49	5.652827208
64	83.32	5.445408639
66	84.16	5.522877712
68	85.28	5.470677913
70	79.37	4.712254931
72	78.59	4.747026167
74	78.85	4.609245981
76	75.29	4.041100723
78	74.32	4.290145281
80	73.73	4.289522118
82	71.25	4.073143141
84	69.7	3.822290019
86	67.45	3.732570054
88	66.82	3.716806891
90	64.65	3.629035821
92	62.65	3.623411226
94	61.03	3.584261527
96	58.74	3.648924974
98	56.19	3.576933805
100	55.29	3.454427493
102	53.43	3.497155846
104	52.17	3.58451013
2	73.62	4.328743444
4	70.28	2.964008525
6	70.56	2.983386341
8	72.43	2.750769469
10	73.41	2.817554589
12	76.26	3.189431806
14	76.95	3.384413897
16	79.66	3.48902097
18	81.43	3.875181248
20	82.96	4.130447198
22	85.21	4.146619761
24	88	4.351237448
26	89.57	4.12536227
28	91.49	4.109178328
30	92.14	3.921431341
32	92.69	3.838961287
34	95.33	3.594357514
36	95.1	3.926149955
38	94.23	3.988845834
40	95.03	3.906658444



42	95.19	3.732039498	24	83.01	4.378842019
44	97.49	4.078220346	26	83.46	4.232547158
46	95.43	4.041321223	28	84.43	4.445623056
48	99.28	3.981317758	30	87.11	4.348346676
50	98.2	4.351738016	32	86.95	4.13061499
52	96.63	4.235820843	34	90.03	3.992567352
54	94.58	4.439784135	36	90.58	3.929200155
56	95.06	4.359557612	38	90.38	3.761951253
58	94.51	4.301968235	40	91.37	3.659410763
60	93.18	4.20631303	42	91.84	3.499306862
62	93.89	4.093704416	44	92.41	3.920774827
64	92	4.273403819	46	92.3	3.974846656
66	90.29	4.397906793	48	93.41	3.89259261
68	88.47	4.434361776	50	93.9	3.935620524
70	87.27	4.41175298	52	95.22	4.209795273
72	86.31	4.150963147	54	91.65	3.986611256
74	85.65	4.411393889	56	91.96	3.707765466
76	82.23	4.3041081	58	91.56	3.550874944
78	81.8	4.065698094	60	89.33	3.92549423
80	80.71	3.826484052	62	90.1	3.858281565
82	77.95	3.675312339	64	88.16	4.252849947
84	77.9	3.705842324	66	88.39	4.041321223
86	74.48	3.154848539	68	86.07	4.090486427
88	73.8	3.089522376	70	85.98	4.255968436
90	72.14	3.037586327	72	85.22	4.069033018
92	69.98	3.185393645	74	83.6	4.059263943
94	67.6	3.388974552	76	81.47	3.942783858
96	65.32	3.572419099	78	80.93	3.713928826
98	63.13	3.378235523	80	79.85	3.676470542
100	62.17	3.476996542	82	76.8	3.532480126
102	60.55	3.163467204	84	75.91	3.548894682
104	58.63	3.198050149	86	73.85	3.305411105
2	68.82	3.50151311	88	73.92	3.548838884
4	68.69	3.220233065	90	70.95	3.311815033
6	69.24	3.083748523	92	70.44	3.161181631
8	71.39	2.856328738	94	66.44	3.093877698
10	71.5	3.070233971	96	64.68	3.139811434
12	75.02	3.168970848	98	62.8	2.878874918
14	75.42	3.319966599	100	61.6	2.51195163
16	77.03	3.566205516	102	58.97	2.336537169
18	78.71	3.779569885	104	57.71	2.494111878
20	80.1	3.851603755	2	70.38	3.123878016
22	80.83	4.299896384	4	69.72	2.998184269

6	70.33	2.845075648	92	67.14	2.961736178
8	72.27	3.147936618	94	65.92	3.059055701
10	73.18	3.021670904	96	63.46	2.676076632
12	76.08	3.259168332	98	68.12	3.038010031
14	77.08	3.70386472	100	61.5	2.817449166
16	78.4	3.954368433	102	58.8	2.427360543
18	79.82	4.129056661	104	57.71	2.494111878
20	79.9	3.924031065	2	71.94	2.813827245
22	81.78	4.170025049	4	72.04	2.835873449
24	82.96	4.449785844	6	72.87	2.850916129
26	83.23	4.556705428	8	74.5	2.881487515
28	85.76	4.530119226	10	74.53	2.871643542
30	86.71	4.618194753	12	77.36	3.08926599
32	85.7	4.714628593	14	80.67	3.979103835
34	88.35	4.575137286	16	80.48	3.762793359
36	87.98	4.059312725	18	81.73	4.058776092
38	88.47	3.666546653	20	82.68	4.125602266
40	89.21	3.929653702	22	84.37	4.138995908
42	91.85	3.791627044	24	84.51	4.503573938
44	90.16	3.652098271	26	86.39	4.344109475
46	91.47	3.578870888	28	86.94	4.177758175
48	92.01	3.229566381	30	89.97	4.199245571
50	90.6	3.47143934	32	89.78	4.558291325
52	91.11	3.726437526	34	92.49	4.443751871
54	89.34	3.726995445	36	92.13	4.464535721
56	89.14	3.676012691	38	93.28	4.283886456
58	88.06	3.700575283	40	94.26	3.896431472
60	86.55	4.18029323	42	94.25	4.007320035
62	88.17	3.579230516	44	95.02	4.27710923
64	85.8	3.83764573	46	93.19	3.844193255
66	85.25	3.878603403	48	94.84	3.691896398
68	83.81	3.81570491	50	92.86	3.509477973
70	83.66	3.800182382	52	95.76	3.248731664
72	82.59	3.50394403	54	93.23	3.28859415
74	80.31	3.061417519	56	92.17	3.318594478
76	80.05	3.064811464	58	91.03	3.312592237
78	78.55	3.208991082	60	89.03	3.840276393
80	78.72	3.035858304	62	88.98	3.553885059
82	75.3	2.917105578	64	86.77	3.603051512
84	74.02	2.943931499	66	87.85	3.61103918
86	73.42	2.907722732	68	85.73	3.955469956
88	71.83	2.772317185	70	84.46	3.794341801
90	70.18	2.718874257	72	83.84	3.553857199

74	82.73	3.563983754
76	80.61	3.309721654
78	80.2	3.184896287
80	79.89	3.315131824
82	77.82	2.899573202
84	75.45	2.840931377
86	73.66	2.919785697
88	73.93	2.68335537
90	71.3	2.534475164
92	69.96	2.481495876
94	68.3	2.660268728
96	66.53	2.722731593
98	65.79	2.619273575
100	63.67	2.42041646
102	63.95	2.344912336
104	63.34	2.40556286



Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Rasio 0,1 100 °C

Posisi	Mean	Standar Deviasi			
2	76.96	3.989683666	74	104.51	5.280983609
4	79.08	4.277448498	76	102.96	4.91322684
6	79.97	4.384211803	78	102.79	5.109497989
8	79.99	4.473253849	80	99.33	5.06135088
10	82.7	4.92263377	82	98.33	4.709875719
12	84.96	4.779839818	84	98.75	4.626177164
14	86.09	4.759031817	86	100.9	4.60675832
16	87.71	5.045840371	88	98.36	4.20562394
18	90.55	4.623993202	90	93.67	4.158610393
20	91.98	4.709714868	92	94.19	4.12358332
22	93.99	4.54049123	94	93.1	4.368158431
24	94.46	4.749098798	96	89.44	4.515562316
26	95.35	4.959176781	98	89.23	4.559051381
28	96.61	4.68588036	100	85.66	5.115277178
30	98.29	4.546715987	102	84	4.942088873
32	97.67	4.458688035	104	82.95	4.981531548
34	99.49	4.372769273	106	79.46	4.665411087
36	101.52	4.411829827	108	78.74	4.507278065
38	103.42	4.3138958	110	74.84	4.034497703
40	104.76	4.690674178	112	73.5	3.865151218
42	107.21	5.203524447	114	71.98	3.396314104
44	106.54	5.439139861	116	69.9	3.279874351
46	106.43	5.218953415	118	67.81	3.196257281
48	107.33	5.395574318	120	65.43	3.241944173
50	108.1	5.330491667	2	76.12	3.026081909
52	108.12	5.087675741	4	68.83	2.534828108
54	107.36	5.143437517	6	69.02	2.382512043
56	106.94	5.016779924	8	71.22	2.342320355
58	107.98	5.222290995	10	73.63	2.61948796
60	107.62	4.811140271	12	75.83	2.88519383
62	110.44	4.928416879	14	78.13	3.020652816
64	107.58	4.765575209	16	81.59	3.879745384
66	106.12	4.799579106	18	86.92	4.263256213
68	105.46	5.240518133	20	88.25	4.090824915
70	105.61	5.163772405	22	90.72	3.871887802
72	103.56	5.101633725	24	92.16	3.724665262
			26	95.02	3.979695943

28	98.92	4.398530517	114	71.32	3.413816254
30	101.2	4.539389894	116	69.51	3.189297127
32	99.85	4.381722829	118	66.87	3.311000947
34	101.67	4.528372955	120	65.87	3.189803832
36	104.06	4.792291791	2	73.98	2.715388247
38	105.53	4.60665965	4	70.13	2.443937046
40	105.41	4.494879241	6	69.31	2.650309683
42	107.27	4.559051381	8	69.18	2.746457774
44	107.78	4.626624749	10	71.06	2.658396266
46	108.24	4.80765383	12	73.18	2.345767734
48	108.59	4.899175358	14	74.54	2.409660691
50	111.15	5.073948117	16	75.52	2.583866025
52	110.6	5.023178598	18	77.96	2.759446585
54	110.3	4.993935716	20	78.79	2.515788528
56	110.49	4.727941872	22	80.6	2.752409413
58	111.5	4.757768767	24	83.2	3.117237835
60	110.76	4.647406141	26	85.19	3.158106452
62	111.77	4.711591123	28	87.27	3.34801313
64	109.3	4.47326514	30	89.27	2.751877229
66	108.61	4.514611519	32	89	3.12694384
68	108.68	4.805047851	34	91.01	2.993241545
70	107.92	4.823511441	36	91.98	2.919734318
72	106.35	4.744747229	38	93.45	2.801064011
74	107.58	5.081517311	40	93.59	2.961350361
76	105.33	4.861838618	42	96.52	2.996563689
78	104.57	4.903626776	44	97.82	3.331454016
80	101.23	4.581153752	46	98.36	3.205172587
82	100.73	4.747896929	48	98.91	3.081698994
84	100.37	4.633333333	50	100.15	3.471019994
86	99.52	4.562650302	52	100.38	3.597923082
88	97.3	4.274661071	54	100.5	3.661152879
90	93.86	4.124379353	56	100.83	3.601500809
92	92.82	4.028634879	58	102.18	4.003483332
94	91.89	3.90517657	60	101.63	3.772990133
96	89.57	4.406732682	62	103.04	3.979543652
98	88.93	4.360648177	64	101.78	3.881007887
100	84.97	4.645960557	66	101.32	4.037400904
102	82.76	4.682052559	68	100.77	4.348121619
104	82.6	4.849242365	70	101.28	4.592659932
106	79.55	4.860425637	72	102.57	5.099524636
108	78.48	4.488998899	74	102.17	5.408663085
110	75.92	4.263256213	76	96.57	5.135054808
112	73.6	3.954284213	78	94.87	4.963818585

80	91.22	4.898113428	46	92.26	2.717767949
82	89.86	4.834681108	48	93.69	2.561151099
84	90.27	4.563480419	50	95.28	2.704578983
86	89.87	4.493890353	52	94.76	3.005449596
88	88.29	4.443347087	54	94.35	2.84400841
90	85.79	4.564454231	56	94.8	2.814105883
92	86.38	4.389565221	58	96.57	2.958483778
94	86.03	4.391118217	60	95.95	2.962305272
96	82.33	4.090034699	62	96.85	3.260956667
98	83.1	4.110838102	64	95.96	3.538875014
100	80.25	3.557251805	66	95.79	4.030928409
102	79.02	3.390360667	68	94.4	4.249777178
104	78.92	3.040733564	70	93.03	4.549292319
106	75.78	3.128816861	72	90.56	5.242252581
108	75.18	2.992853441	74	89.66	4.979189014
110	71.99	2.657161089	76	86.52	4.719356231
112	70.92	2.611861057	78	84.45	4.154527772
114	70.72	2.582301847	80	82.35	3.591164804
116	67.69	2.773230622	82	83.04	3.504456038
118	64.87	2.68424133	84	83.95	3.430036664
120	63.97	2.709709441	86	82.98	3.420024219
2	80.1	3.352972449	88	81.9	3.549078697
4	68.36	2.615107623	90	83.05	3.729150796
6	68.45	2.86523925	92	83.64	3.6390697
8	69.81	2.830908053	94	81.37	3.543823764
10	72.16	2.966887973	96	79.61	3.463795431
12	74.23	2.849260049	98	80.19	3.836810018
14	74.75	2.724282873	100	77.27	3.30550505
16	76.37	2.584550056	102	75.28	3.396611502
18	77.65	2.804667826	104	76.39	3.38712655
20	78.42	2.850411985	106	76.52	3.517574922
22	81.08	3.240152135	108	73.7	2.931886696
24	81.36	3.18620765	110	70.64	2.713676547
26	83.16	3.19949491	112	69.2	2.578073825
28	84.16	3.362658881	114	66.7	2.837341194
30	86.35	3.438859924	116	65.48	2.713527653
32	86.1	3.669420454	118	63.71	2.62580435
34	86.89	3.200047348	120	63.26	2.634733038
36	89.06	2.908781549	2	79.17	3.345598646
38	90.22	3.089833443	4	71.26	2.560855286
40	90.38	3.171145158	6	72.18	2.664317147
42	93.39	2.792106478	8	73.26	2.901131789
44	92.42	2.644529326	10	75.25	3.147469723

12	76.72	3.210085118	98	86.14	3.858664656
14	76.96	3.058090776	100	79.61	3.719712707
16	79.84	3.09682144	102	76.3	2.97294195
18	80.17	3.094651626	104	74.9	2.98311748
20	80.68	3.535905296	106	72.52	2.68358271
22	83.3	3.436288813	108	73.46	2.84061453
24	84.7	3.599943883	110	70.39	2.66626891
26	85.18	3.418251665	112	68.85	2.675647755
28	88.52	3.282891064	114	68.2	2.647659534
30	89.56	3.182401101	116	69	2.597590181
32	88.84	3.472023833	118	66.14	2.774414125
34	90.4	3.051742341	120	64.6	2.593698658
36	92.88	2.992515917			
38	93.77	2.880989589			
40	93.55	2.746439385			
42	95.63	2.834331375			
44	95.86	2.792558654			
46	94.55	2.938339392			
48	96.09	2.857190115			
50	99.95	2.914176426			
52	99.67	2.998501309			
54	99.24	3.085056848			
56	99.56	2.996024302			
58	99.33	3.048612866			
60	98.96	3.23153652			
62	99.41	3.101303082			
64	98.63	3.37445843			
66	97.03	3.537547515			
68	96.94	3.558515182			
70	96.79	3.303793351			
72	95.47	3.236331007			
74	92.11	3.30562728			
76	85.33	4.261775132			
78	84.45	3.198405537			
80	84.38	3.518436292			
82	85.37	3.329255081			
84	86.36	3.506185011			
86	85.61	3.404972597			
88	84.59	3.399628619			
90	83.78	3.398098101			
92	87.94	3.507049178			
94	86.12	3.995654205			
96	81.91	3.470205071			

## Kondisi Ketinggian Step 40 mm Rasio 0,1 300 °C

Posisi	Mean	Standar Deviasi
2	75.3	3.769896711
4	76.44	4.214740847
6	76.93	4.32108993
8	79.2	4.803197588
10	79.35	4.549114688
12	80.81	5.028595
14	83.24	5.220627309
16	83.94	5.348123432
18	86.66	5.199494925
20	88.17	4.960561633
22	88.41	4.972845455
24	90.35	4.845856295
26	90.82	5.007832249
28	90.82	5.296043883
30	92.97	4.945061816
32	94.84	4.957842476
34	95.49	5.086116973
36	95.97	5.246364783
38	99.04	5.200854631
40	99.92	5.491370641
42	99.67	5.342898619
44	99.08	5.432189878
46	100.5	5.627314339
48	100.69	5.818283617
50	101.1	5.874959703
52	100.35	5.924397425
54	101.07	5.88312945
56	100.64	5.83531568
58	100.6	5.743683399
60	101.15	6.243178095
62	102.12	6.020637907
64	99.95	5.779404394
66	99.37	5.471053303
68	98.41	5.185634781
70	98.55	5.107678909
72	97.43	5.06972595
74	99.69	5.235263107
76	95.19	5.07259422
78	94.93	5.013627893
80	94.56	5.071847431
82	94.11	5.082938385
84	93.16	4.916926033
86	93.35	4.981531548
88	90.14	5.276247519
90	89.37	5.713098542
92	86.24	6.180974393
94	86.46	5.779483043
96	81.78	6.021141205
98	80.09	6.151447231
100	79.1	5.636282176
102	75.33	4.8722156
104	74.38	4.460330196
106	70.08	3.940671122
108	68.74	3.945640735
110	65.83	3.974807028
112	63.61	3.879224644
114	61.54	3.893584467
2	68.36	3.448085401
4	65.11	3.18422564
6	65.71	2.871999972
8	68.71	2.349704473
10	69.72	2.270050949
12	71.18	2.297912975
14	73.82	2.84047229
16	76.77	3.816114159
18	80.24	4.559638476
20	81.36	4.619939219
22	83.14	4.735466869
24	85.88	4.490798674
26	91.32	4.136264845
28	91.95	3.967990612
30	93.36	3.883453633



32	94.6	3.858612301	4	67.64	3.298362005
34	95.47	3.851944281	6	66.08	2.922155009
36	95.7	3.812525873	8	68.64	2.50462199
38	97.64	3.793987801	10	69.74	2.134942575
40	98.5	3.471383737	12	70.49	1.920095747
42	99.33	3.654400972	14	72.01	2.139078438
44	99.67	3.547811959	16	72.25	2.061552813
46	101.97	3.582942191	18	74.15	2.124294298
48	102.78	3.852272057	20	74.6	2.224746042
50	103.07	4.010730556	22	75.92	2.368479886
52	103.15	4.11298756	24	78.81	2.721760423
54	104.81	4.350072564	26	79.8	2.803316939
56	104.93	4.684500556	28	80	2.863916934
58	104.48	4.979716433	30	81.09	3.124019038
60	103.94	5.080801655	32	82.42	3.101579917
62	103.85	5.164711262	34	83.65	3.211013245
64	103.17	5.021277957	36	83.04	3.363259602
66	103.19	5.040632877	38	86.1	3.252038987
68	102.42	4.948584126	40	87.96	3.116978594
70	102.14	4.990941289	42	87.81	3.292768324
72	100.51	4.839849317	44	89.12	3.201262377
74	100.87	5.129937877	46	91.73	3.34801313
76	98.54	4.983650036	48	91.57	3.254383214
78	97.27	4.696560099	50	91.63	3.338344718
80	96.66	4.51981049	52	91.81	3.719169561
82	96.98	4.371579471	54	94.2	3.80058475
84	94.3	4.409585518	56	94.49	3.867750632
86	91.72	4.330022045	58	94.61	4.037438432
88	90.35	4.245913068	60	93.79	4.015865002
90	89.16	4.437489508	62	94.19	3.984046468
92	86.03	5.05615936	64	94.23	3.884324883
94	86.63	4.973982816	66	96.18	3.297933237
96	82.83	5.043357468	68	94.49	3.233333333
98	80.11	5.140245248	70	95.41	3.542227228
100	77.73	4.644655884	72	95.85	3.72372953
102	75.02	4.419835913	74	93.16	4.001817769
104	74.77	4.158124577	76	88.18	4.43215979
106	71.72	3.576240337	78	85.62	4.730686413
108	70.43	3.522668295	80	84.15	4.95713953
110	69.31	3.359578497	82	85.78	4.342833409
112	65.72	3.396611502	84	83.16	4.67471168
114	61.77	3.031334673	86	79.93	4.171221753
2	68.47	3.379842205	88	79.74	4.286742541

90	79.51	4.262817866	62	89.27	3.265537838
92	77.24	3.657343519	64	88.78	3.459958545
94	78.7	4.03394686	66	90.42	3.627003104
96	75.93	3.739645638	68	87.53	3.828270702
98	74.23	3.466593822	70	87.05	4.13503142
100	73.03	3.160536331	72	82.49	3.983539363
102	71.01	2.986484708	74	81.93	3.641109277
104	70.99	2.858603883	76	78.52	3.082960665
106	68.11	3.12013662	78	76.33	2.550717863
108	66.45	3.14104467	80	77.77	2.501938642
110	64.51	3.063288653	82	77.76	2.531099494
112	62.81	2.970205584	84	75.86	2.578152185
114	60.98	2.711665782	86	74.36	2.231636624
2	73.56	3.627392975	88	74.86	2.530700386
4	66.51	3.674908093	90	77.32	2.473618378
6	68.21	3.479507105	92	73.98	2.510503189
8	70.42	3.204100908	94	74.04	2.605045609
10	71.37	3.230708088	96	73.2	2.486326242
12	72.03	3.066452562	98	70.9	2.380476143
14	73.16	2.977084195	100	70.14	2.339904168
16	73.54	2.675817632	102	67.67	2.441455933
18	75.46	3.121835772	104	68.34	2.362245123
20	76.84	3.298974435	106	68.34	2.39199
22	76.5	3.089571903	108	64.27	2.485737092
24	77.47	2.982965103	110	62.08	2.456407823
26	77.96	2.947075249	112	60.39	2.3393645
28	76.88	2.768071932	114	58.95	2.166666667
30	78.85	2.761111619	2	74.77	3.401885989
32	79.9	2.657180096	4	71.61	3.853097927
34	80.39	2.624265169	6	71.43	4.30469558
36	81.04	2.74476545	8	74.7	4.759891349
38	83.66	3.019197833	10	75.15	5.211438468
40	85.81	2.834473924	12	75.34	5.30336276
42	86	2.898972301	14	77.46	5.076028034
44	86.16	2.802307851	16	78.72	5.237934669
46	87.98	2.84260515	18	79.1	5.217491947
48	89.52	2.847930314	20	79.14	4.960490364
50	88.49	2.837323394	22	80.32	4.642535009
52	88.05	3.076056113	24	80.45	3.822778618
54	88.58	2.832638061	26	80.86	3.530587841
56	88.74	2.911558297	28	82.79	3.55134062
58	90.02	2.881427817	30	83.23	3.532975968
60	89.12	2.903428833	32	84.36	3.56050161

34	84.31	3.442734995
36	86.03	3.361862759
38	87.14	3.117302641
40	88.33	2.913067043
42	88.54	2.955631502
44	87.95	3.019716356
46	89.48	2.634196253
48	92.39	2.685144316
50	93.02	2.50647646
52	93.07	2.421515512
54	93.75	2.45515331
56	92.99	2.455646966
58	92.39	2.806539981
60	92.09	2.789210815
62	92.55	3.049672942
64	93.15	3.242318038
66	92.72	3.133655689
68	91.13	3.167559683
70	91.79	3.175967203
72	87.41	3.238327914
74	84.32	3.155498648
76	77.04	2.269338888
78	77.32	1.74008011
80	78.28	1.896727645
82	78.79	2.507745577
84	77.1	2.397389152
86	75.42	2.470758277
88	76.4	2.678006193
90	78.87	2.368373264
92	77.35	2.5
94	77.04	2.155191055
96	74.2	2.260776661
98	74.24	2.2967698
100	69.94	1.796854716
102	67.83	2.1417212
104	66.47	2.438972296
106	63.62	2.394353627
108	64.21	2.244161898
110	61.75	1.838834721
112	60.62	1.873688093
114	60.61	1.8084817

Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Rasio 0,5 100 °C

Posisi	Mean	Standar Deviasi
2	63.93	3.060342431
4	64.61	3.223421095
6	64.62	3.432967457
8	66.04	3.64062364
10	66.83	3.921730912
12	69.31	3.925442594
14	70.33	3.586121906
16	70.42	3.812870087
18	72.99	3.644517147
20	73.93	3.89239913
22	74.5	4.034144201
24	76.65	4.593115135
26	77.68	4.732779359
28	79.35	4.660775156
30	79.43	4.804893121
32	81.1	5.076288368
34	80.75	4.995905424
36	82.92	4.993961707
38	84.89	5.147805825
40	88.59	4.956348576
42	89.28	4.961089795
44	91.9	4.755791404
46	91.02	4.963621707
48	90.45	5.327553741
50	90.6	5.364586943
52	93.22	5.505842042
54	93.8	5.740136924
56	92.54	5.578302313
58	93.91	5.426560032
60	95.46	5.471609574
62	94.57	5.620544431
64	94.81	5.823797651
66	95.14	6.17991256
68	93.79	6.476274261
70	93.62	6.620250561
72	94.45	6.546630175
74	94.73	6.428197331
76	92.22	6.478977999
78	94.17	6.524770124
80	92.94	6.727148075
82	93.41	6.682984978
84	91.26	6.933902399
86	90.34	7.074311171
88	89.33	7.313855378
90	90.27	7.440889597
92	88.98	7.686633383
94	87.08	8.025350089
96	86.6	8.211730314
98	84.56	8.493600686
100	84.43	8.683249376
102	82.81	8.57892441
104	85.13	8.748631287
106	79.07	8.301603404
108	76.59	7.94214517
110	76.27	7.616335506
112	73.7	7.430303099
114	70.82	6.898174301
116	67.41	6.325157286
118	65.49	5.942631378
120	63.78	5.669157693
122	61.22	5.193642235
124	58.86	4.917363959
126	57.38	4.703911638
128	55.56	4.464360637
130	53.46	4.510727109
2	69.39	3.289884351
4	64.48	3.269598175
6	65.03	2.965664288
8	67	3.068480414
10	69.75	3.186923597
12	71.7	3.171294723
14	72.78	3.226490627

16	74.04	3.392413794	102	80.34	6.117356009
18	76.85	3.823290713	104	79.17	5.999048087
20	78.88	4.247214964	106	74.85	5.451131041
22	79.25	4.179008943	108	74.43	5.555630433
24	81.27	4.68157988	110	73.69	5.496966264
26	82.68	4.730848252	112	71.33	5.191864215
28	87.91	4.767125989	114	69.41	4.923708847
30	90.06	4.246520171	116	67.27	4.782993064
32	90.41	4.360252605	118	65.49	4.433445048
34	89.84	4.678712256	120	63.18	4.431770113
36	91.51	4.549974217	122	61.11	3.852358041
38	93.24	4.606482822	124	59.41	3.682915729
40	94.52	4.537090413	126	57.69	3.635469449
42	94.61	4.321264806	128	55.85	3.584794548
44	97.05	4.444380988	130	54.42	3.507735326
46	96.92	4.429901169	2	66.81	3.584449354
48	97.45	4.607701777	4	63.91	3.300773782
50	96.95	4.564344219	6	64.14	3.276984215
52	99.01	4.468750562	8	64.06	3.207999709
54	98.53	4.77502625	10	65.7	3.085247347
56	98.37	4.856752508	12	68.52	3.189192677
58	99.68	4.886665267	14	69.72	3.181991733
60	100.38	5.08016827	16	70.17	3.113011938
62	100.52	5.201516861	18	73.12	3.062705294
64	100.63	5.455110759	20	74.45	3.161826132
66	100.36	5.539227226	22	74.1	3.18031615
68	97.84	5.563112444	24	76.63	3.382072758
70	97.99	5.592055364	26	78.85	4.180944507
72	97.61	5.723580662	28	80.45	4.148651326
74	96.97	5.64169029	30	81.61	4.563697707
76	95.41	5.774079684	32	83.36	4.392203604
78	96.91	5.955191526	34	82.42	4.412246944
80	95.74	5.947418562	36	83.9	4.273711583
82	95.01	6.038205666	38	84.64	4.348076372
84	92.02	6.008972288	40	87.74	4.038860349
86	91.2	6.142185444	42	87.86	4.243246389
88	90.46	6.571054329	44	89.79	4.277273604
90	90.47	6.187331924	46	91.51	4.148743098
92	88.72	6.193589902	48	91.55	4.380724614
94	85.27	6.442751156	50	92.82	4.31985486
96	84.68	6.558381956	52	93.36	4.431877499
98	82.6	6.500420991	54	93.44	4.463337121
100	82.36	6.407210863	56	92.92	4.643691233

58	94.87	4.351577521	14	69.32	3.374578257
60	94.69	4.353392633	16	70.15	3.566479942
62	94.29	4.548635164	18	71.45	3.347191827
64	94.36	4.683206121	20	72.87	3.248716597
66	94.72	4.631931319	22	73.89	3.36268252
68	93.02	4.493835276	24	75.18	3.401240521
70	92.91	5.037324991	26	76.26	3.538776522
72	92.38	5.247482694	28	77.6	3.351710242
74	92.62	5.396870722	30	77.35	3.634971957
76	93.52	5.656534542	32	79.04	3.61656931
78	92.43	5.196134105	34	78.44	3.645326683
80	87.46	5.579377191	36	79.55	3.678752385
82	85.71	5.732105553	38	80.82	3.754532764
84	83.06	5.465918146	40	83.7	4.136749631
86	81.35	5.210329619	42	84.05	3.703276727
88	80.66	4.950180125	44	87.19	3.961743574
90	80.64	5.005156298	46	87.06	3.94334521
92	78.72	4.66685703	48	86.77	4.085862203
94	76.64	4.268965032	50	87.28	4.245847682
96	77.13	4.573656347	52	90.75	4.109671098
98	75.77	4.345339136	54	89.53	4.079124141
100	75.31	4.344966739	56	88.88	4.02644504
102	73.93	4.11372226	58	89.15	4.191335692
104	73.58	4.185427022	60	90.44	4.338302003
106	70.34	4.141394901	62	90.92	4.392506989
108	69.82	3.985052024	64	90.09	4.482552847
110	69.44	4.079684127	66	90.42	4.563009384
112	67.27	4.160335948	68	88.88	4.876565094
114	65.84	4.189404928	70	88.94	4.744409677
116	62.53	3.722427027	72	87.21	4.850378905
118	62.29	3.681209586	74	86.07	4.893575161
120	61.87	3.407615127	76	82.74	4.672462475
122	58.12	3.111696889	78	82.85	4.686781863
124	56.37	2.970218315	80	79.54	4.130739838
126	54.88	2.931868004	82	77.04	3.330343224
128	53.28	3.035609462	84	74.85	2.860351466
130	51.74	2.948443336	86	74.87	3.08095604
2	72.17	3.581633458	88	75.04	3.205981465
4	62.32	3.108207787	90	74.96	3.411132825
6	62.88	2.892351257	92	73.44	3.154683409
8	64.49	3.061244265	94	73.37	3.110503689
10	66	3.34007504	96	75.01	3.387865379
12	68.44	3.329571454	98	72.58	3.343293704

100	72.29	3.173964858	56	93.95	3.839736332
102	71.67	3.138984984	58	95.27	3.93679843
104	69.95	3.426112201	60	94.96	3.852629819
106	67.58	3.632902711	62	95.19	3.98956377
108	65.77	3.572293279	64	93.84	4.05295238
110	67.45	3.719664406	66	93.15	4.2289782
112	67.27	3.777683526	68	90.77	4.237432567
114	63.9	3.48486707	70	89.78	4.385089736
116	60.77	3.115151529	72	89.54	4.267649325
118	59.86	2.974925352	74	89.46	4.353327039
120	57.57	2.810433093	76	86.88	4.781500298
122	56.5	2.735082761	78	86.3	4.523412454
124	55.11	2.600429023	80	79.56	3.825132555
126	54.42	2.541526423	82	77.38	2.999270169
128	51.78	2.623169909	84	76.32	2.976428752
130	50.58	2.520202023	86	76.27	3.167901309
2	71.55	3.567840791	88	75.97	2.994855669
4	64.83	3.530482419	90	76.15	3.228879299
6	65.79	3.808973744	92	75.02	2.975885057
8	65.67	3.719817939	94	74.24	3.031436283
10	67.64	3.624298773	96	75.9	3.377876759
12	69.54	3.547883006	98	76.27	3.748468816
14	70.4	3.310678774	100	74.65	3.070031014
16	72.86	3.502140979	102	74.72	3.195245611
18	74.55	3.779371302	104	73.67	3.447934792
20	74.57	3.683380903	106	68.51	3.24470017
22	75.86	3.687229261	108	66.39	3.33494155
24	77.87	3.945661759	110	66.07	3.177711259
26	78.66	4.062640119	112	65.88	3.368678023
28	80.85	3.851394312	114	63.33	3.222800931
30	81.84	4.157154572	116	60.54	2.812092135
32	81.59	3.670774571	118	59.85	2.681273057
34	82.68	3.74801172	120	58.68	2.379196274
36	83.6	3.812820159	122	59.05	2.610402538
38	85.05	4.048957957	124	56.67	2.426415641
40	86.77	3.957897593	126	54.87	2.367405097
42	86.88	3.900680138	128	55.44	2.394469801
44	88.41	4.242326585	130	53.81	2.401812565
46	90.22	4.083485333			
48	88.44	4.086956962			
50	89.14	4.031878491			
52	95.06	3.574663896			
54	94.94	3.780705875			

Kondisi Ketinggian *Step* 40 mm Rasio 0,5 300 °C

Posisi	Mean	Standar Deviasi			
2	82.37	5.950570555	74	113.64	7.258819642
4	85.48	5.894691039	76	114.41	7.370585341
6	87.63	5.778693543	78	113.74	7.181699886
8	86.78	5.783550592	80	114.29	7.564356788
10	87.53	5.646496617	82	111.6	7.290235575
12	89.66	5.590165687	84	110.76	7.120298336
14	92.64	5.502573684	86	111.15	7.230466771
16	94.6	5.04876279	88	110.01	7.270022471
18	95.56	5.07611961	90	110.61	7.344284262
20	96.92	5.066077746	92	110.33	7.175189395
22	100.61	5.01784366	94	106.53	6.723864662
24	99.95	5.186673312	96	105.98	6.82686823
26	101.08	5.320491869	98	104.01	6.900823083
28	102.61	5.429628724	100	104.09	7.116647953
30	102.6	5.492826258	102	100.47	6.819390948
32	104.81	6.151414553	104	98.67	6.445173598
34	106.2	6.231922266	106	97.49	6.206991753
36	108.48	6.814364287	108	95.95	6.241857441
38	108.69	6.508922839	110	91.74	6.375653888
40	110.27	6.75300555	112	89.29	6.293249369
42	113.85	6.735957254	114	85.46	6.334660756
44	113.53	6.946108945	116	82.23	5.954456248
46	112.67	7.183210642	118	78.2	5.422401378
48	112.74	7.009281057	120	76.21	5.358888423
50	114.65	7.129222526	122	72.77	4.953236486
52	115.84	7.237374705	124	70.6	4.773132178
54	115.95	7.138255568	126	66.57	4.549283817
56	115.58	7.321893713	2	82.18	3.555868855
58	116.7	7.347653153	4	73.28	2.337544811
60	116.44	7.687240127	6	72.69	1.94782506
62	116.6	7.913738725	8	73.5	1.863462345
64	117.67	7.685469291	10	75.34	2.423550297
66	119.76	7.88139039	12	78.28	2.810094393
68	116.48	7.750315482	14	81.03	3.461160309
70	114.86	7.759778562	16	85.01	3.910136583
72	113.3	7.483302054	18	88.04	3.661531804
			20	89.42	3.669633467



22	92.95	3.485140194	108	88.4	5.275775701
24	93.62	3.450528781	110	86.33	5.348612228
26	94.76	3.727614191	112	83.41	4.968221878
28	99.39	3.816039172	114	80.2	4.739110274
30	101.44	3.885301074	116	78.21	4.554051714
32	102.77	4.056966333	118	75.25	3.972133084
34	103.79	4.043994685	120	72.13	3.586440398
36	105.58	4.240823062	122	67.88	3.787698385
38	105.73	4.551291962	124	66.83	3.829484738
40	107.34	4.745352511	126	64.3	3.580198094
42	110.66	5.066284415	2	79.69	3.307226913
44	109.86	4.838767238	4	75.85	2.792698047
46	109.9	4.821129489	6	75.6	2.59302466
48	111.35	5.198826179	8	73.94	2.439326568
50	114.06	5.320062492	10	75.63	2.732123072
52	116.27	5.534293344	12	77.84	2.739255701
54	116.3	5.51245928	14	80.22	3.051340625
56	115.91	5.499424541	16	82.49	3.191340845
58	117.14	5.561931743	18	84.04	3.177531533
60	118.55	5.625334984	20	85.06	2.909478919
62	118.03	5.265174601	22	87.73	2.762852216
64	117.34	5.124325254	24	88.19	2.694905686
66	116.89	5.454639628	26	91.39	2.596619513
68	116.18	5.525514948	28	92.33	2.370579237
70	115.87	5.430855715	30	93.05	2.444199262
72	115.36	5.593621098	32	93.99	2.641394621
74	115.4	5.839678635	34	94.14	2.855888877
76	115.55	5.777474524	36	96.12	2.717941741
78	114.32	5.878003341	38	95.8	2.771279918
80	113.58	5.874050871	40	96.85	2.631864082
82	111.39	5.756860515	42	99.45	2.845270539
84	109.58	5.60604634	44	99	2.87935601
86	109.11	5.547469209	46	99	3.03517045
88	109.37	5.661042438	48	100.41	2.916732615
90	106.73	5.403075321	50	102.76	3.381172043
92	103.87	5.244325571	52	103.03	3.577378851
94	101.79	5.311162991	54	103.12	3.581155067
96	100.64	4.95951629	56	103.41	3.707027402
98	97.93	4.883976528	58	104.88	3.831025468
100	97.46	5.090238434	60	105.5	3.640231446
102	95.51	4.964312005	62	105.99	3.680433805
104	92.37	5.192817456	64	105.27	3.659347523
106	90.08	5.185021406	66	105.02	3.762510068

68	104.69	3.711543725	28	90.44	2.643663876
70	106.01	3.81643824	30	92	2.623097336
72	105.89	4.098678126	32	94.04	2.7938907
74	106.41	4.296346714	34	94.61	2.721861212
76	111.76	4.785837982	36	96.23	2.779579338
78	109.91	4.723861524	38	96.45	2.667071167
80	104.72	4.168016153	40	97.09	2.644815768
82	100.57	3.977568935	42	98.52	2.47115474
84	97.27	3.893010426	44	98.16	2.451354245
86	96.13	3.845161318	46	98.52	2.323945653
88	95.96	3.825555556	48	98.65	2.198116287
90	93.85	3.529430801	50	100.6	2.388818422
92	91.74	3.834651194	52	102.37	2.538341058
94	90.07	3.607609826	54	100.65	2.855888877
96	89.77	3.702274192	56	100.54	3.032472269
98	86.63	3.690119344	58	101.67	2.934561379
100	88.25	3.646083828	60	103.18	3.07950367
102	85.5	3.618726807	62	101.14	3.111176832
104	83.72	3.743437687	64	101.25	3.099130022
106	82.28	3.52489717	66	100.79	3.088269288
108	80.79	3.329885901	68	99.86	3.416736893
110	78.54	3.388904753	70	100.5	3.579453604
112	75.47	3.051933255	72	99.51	3.74750377
114	74.01	2.947894479	74	99.73	3.923429503
116	70.31	2.755089781	76	99.93	3.699290685
118	68.77	2.818921139	78	96.04	3.127714888
120	67.35	3.140591696	80	95.12	3.021655453
122	64.08	3.061026605	82	91.17	3.00272736
124	62.74	3.074399491	84	89.6	3.250825431
126	60.55	2.812769013	86	89.46	2.495188593
2	89.16	3.968489056	88	87.63	2.223774761
4	79.28	3.6268716	90	86.72	2.394907027
6	79.08	3.452845164	92	85.97	2.777455404
8	81.31	3.803672317	94	87.59	2.703369164
10	83.39	4.040085646	96	87.97	2.829470161
12	83.34	3.95012211	98	84.36	2.728218343
14	83.3	3.970167642	100	81.64	2.644815768
16	86.12	3.773523844	102	78.11	2.611095247
18	85.92	3.533258263	104	77.25	2.371703228
20	85.48	3.114907078	106	76.59	2.335141123
22	88.81	2.738595409	108	74.78	2.104992117
24	89.31	2.699563882	110	74.8	2.164428694
26	89.76	2.694446489	112	73.14	2.050523095

114	69.96	1.955190002	60	108.44	3.164684722
116	68.44	1.871973095	62	108.54	3.195364766
118	66.37	2.309236208	64	107.74	3.292689582
120	64.75	2.232148337	66	103.8	3.475157272
122	62.23	1.997666638	68	101.73	3.458601816
124	61.99	2.061356577	70	101.3	3.512535004
126	59.11	1.781517736	72	100.42	3.089440266
2	93.77	3.692904068	74	99.84	3.057230618
4	81.39	3.715337293	76	100.2	2.953668503
6	80.66	3.963184854	78	99.17	2.800322246
8	81.14	4.567637924	80	95.78	2.448479211
10	84.08	4.794739804	82	88.79	2.453915623
12	88.15	4.815479672	84	88.66	2.230143253
14	90.66	4.413001921	86	91.07	2.237642419
16	92.77	3.515812368	88	90.89	2.281452542
18	92.66	3.213691441	90	89.89	2.859186536
20	93.08	3.127227932	92	87.56	3.122841916
22	94.01	2.796444671	94	87.21	3.42044001
24	92.64	2.971083432	96	87.45	3.435655862
26	95.05	2.717696587	98	87.79	3.057697592
28	96.84	2.799948328	100	85.77	3.101279189
30	96.47	2.787717479	102	82.41	2.701185306
32	97.98	2.948120491	104	87.29	3.167781122
34	97.92	2.907940906	106	85.73	3.267530587
36	99.2	2.673131323	108	78.88	2.318081288
38	99.34	3.083889593	110	75.5	2.073924117
40	100.36	2.749521877	112	73.01	1.770315976
42	102.19	2.885926913	114	72.77	1.72786923
44	102.78	3.144226501	116	70.99	1.783440123
46	104.29	3.031593274	118	70.3	1.895469365
48	104.13	2.83712974	120	66.34	2.032245295
50	106.88	3.177890976	122	64.38	1.968628892
52	106.54	3.018945193	124	62.31	1.623464437
54	105.91	2.919472556	126	60.4	1.635555818
56	106.44	2.929464593			
58	107.93	3.161735819			