



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH EKSITASI EKSTERNAL BERUPA INJEKSI GAS
PANAS TERHADAP POLA ALIRAN PADA ZONA
RESIRKULASI GEOMETRI *BACKWARD-FACING STEP***

SKRIPSI

PRIYA NUGRAHA

0606073423

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN

DEPOK

JULI 2010



UNIVERSITAS INDONESIA

**PENGARUH EKSITASI EKSTERNAL BERUPA INJEKSI GAS
PANAS TERHADAP POLA ALIRAN PADA ZONA
RESIRKULASI GEOMETRI *BACKWARD-FACING STEP***

SKRIPSI

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

PRIYA NUGRAHA

0606073423

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 : PRIYA NUGRAHA

NPM : 0606073423

Tanda Tangan :



Tanggal : 30 – Juli – 2010

HALAMAN PENGESAHAN

Skripsi ini diajukan oleh :
Nama : PRIYA NUGRAHA
NPM : 0606073423
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Skripsi : PENGARUH EKSITASI EKSTERNAL BERUPA INJEKSI GAS PANAS TERHADAP POLA ALIRAN PADA ZONA RESIRKULASI GEOMETRI *BACKWARD-FACING STEP*

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

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng

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

Penguji : Dr. Ir. Warjito, M.Eng

Penguji : Ardiyansyah S.T., M.Eng

Ditetapkan di : Depok

Tanggal : 12 – Juli - 2010

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan skripsi berjudul “Pengaruh Eksitasi Eksternal Berupa Injeksi Gas Panas Terhadap Pola Aliran Pada Zona Resirkulasi Geometri *Backward-Facing Step*“. Penulisan skripsi ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada jurusan Teknik Mesin Universitas Indonesia. Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan skripsi ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Ibu dari penulis yang tak pernah hentinya mendukung dan memberi bantuan secara moral yang tak ternilai dalam mengerjakan skripsi ini dan almarhum Ayah yang sudah membentuk kepribadian penulis hingga saat ini;
- (2) Dr.Ir.Harinaldi M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan skripsi ini;
- (3) Kak Damora Rhakasyiwi, sebagai mahasiswa tingkat lanjut yang telah membantu mengerjakan skripsi ini baik secara teori maupun eksperimental;
- (4) Dipo Andika Syarief, sebagai rekan kerja pengerjaan skripsi ini dimana dengan partisipasinya, pelaksanaan skripsi ini dapat berjalan lancar berkat dukungan dan kerja samanya;
- (5) Seseorang yang telah memberi penulis motivasi tambahan selama hampir 4 tahun perkuliahan , keberadaannya merupakan salah satu faktor penting dari hasil usaha penulis hingga saat ini;
- (6) R. Achmad Farid, R.Achmad Fakhri dan Danang Eka P selaku teman seperjuangan dari awal masa perkuliahan;
- (7) Anggariawan Adi, Danal Arfad, Edwin Waskito, Lintang Martulesy, Reza Kurnia sebagai teman bekerja dan bercanda selama masa perkuliahan;

(8) Nursanty Elisabeth, Martha Indah, Octaviandy, Rikko Defriadi, Achmad Shoim dan Nicolaus CTPP dan semua mahasiswa penghuni lab lantai 3 sebagai pemberi dukungan dan peningkat semangat menyelesaikan skripsi;

(9) Mas Udiyono, selaku karyawan dan asisten lab lantai 3 atas bantuan yang diberikan;

(10) Priza Karunia dan Prima Anugerah, selaku saudara penulis yang membantu penulis dalam menyelesaikan skripsi;

(11) M.Muammar Faruq , Deddy Rizky Sahar, Dhana D, Ferdy Bastian, Ricky Rafiandy dan Septian sebagai teman bercanda pada saat berkumpul di gazebo mesin;

(12) Semua karyawan Departemen Teknik Mesin yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas dukungannya;

(13) Semua dosen yang telah membantu penulis hingga saat sehingga mampu mengerjakan skripsi ini;

(14) Semua teman Departemen Teknik Mesin yang tak dapat disebutkan satu per satu dimana tak hentinya memberi dukungan moral untuk menyelesaikan skripsi ini;

(15) Klub Chelsea F.C yang telah menghibur selama 1 tahun terakhir masa perkuliahan.

Akhir kata, saya berharap Tuhan Yang Maha Esa berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga skripsi ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu.

Depok, 30 Juli 2010



Penulis

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

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

Nama : Priya Nugraha

NPM : 0606073423

Program Studi : Sarjana Reguler

Departemen : Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis Karya : Skripsi

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

**PENGARUH EKSTITASI EKSTERNAL BERUPA INJEKSI GAS PANAS
TERHADAP POLA ALIRAN PADA ZONA RESIRKULASI GEOMETRI
BACKWARD-FACING STEP**

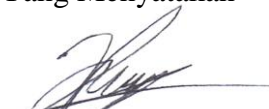
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia banyak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*) merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 30 Juli 2010

Yang Menyatakan


(PRIYA NUGRAHA)

ABSTRAK

Name : Priya Nugraha
Program Studi : Teknik Mesin
Title : PENGARUH EKSTITASI EKSTERNAL BERUPA INJEKSI
GAS PANAS TERHADAP POLA ALIRAN RESIRKULASI
PADA GEOMETRI *BACKWARD-FACING STEP*

Resirkulasi merupakan suatu fenomena dasar pada suatu aliran yang mengalami separasi dimana aliran tersebut dapat dipengaruhi oleh suatu eksitasi eksternal yang dikontrol secara aktif sehingga mempengaruhi karakteristik aliran tersebut. Salah satu metode eksitasi eksternal adalah dengan menginjeksikan gas panas sehingga terjadi perpindahan massa dan kalor pada aliran resirkulasi tersebut. Aliran resirkulasi yang telah dipengaruhi eksitasi eksternal ini akan mempunyai efektifitas berbeda dan untuk memperdalam keefektifitasan aliran tersebut, salah satu metodenya adalah mempelajari pola aliran resirkulasi tersebut dengan menggunakan metode visualisasi berkecepatan tinggi berbasis lembar cahaya terutama pada bagian resirkulasi itu sendiri. Pendekatan yang digunakan untuk metode visualisasi ini ada dua, yaitu pendekatan kualitatif dan kuantitatif dimana dengan dipelajarinya aliran tersebut dengan kedua pendekatan ini akan dapat mendalami kajian komprehensif mengenai aliran resirkulasi dengan eksitasi eksternal tersebut.

Kata kunci :

Aliran Resirkulasi, Injeksi Udara Panas, Visualisasi Berkecepatan Tinggi

ABSTRACT

Name : Priya Nugraha
Program Studi : Teknik Mesin
Title : EFFECT OF EXTERNAL EXCITATION BY HEATED GAS INJECTION TO THE FLOW PATTERN OF RECIRCULATION ZONE AT A BACKWARD FACING STEP GEOMETRY

Recirculation is a basic phenomena in a flow that underwent a separation process where that exact flow could be affected by an active control system which injects hot gas into the recirculation zone to modify the characteristic of the flow itself. With the injected hot gas, there is bound to be heat and mass transfer that will change the effectiveness of the flow, one of the method to study the recirculation flow pattern is with a high speed visualization based on light sheet emitter especially at the recirculation zone itself. Two approach that is used in the method are quantitative and qualitative approach where with a comprehensive studies on both of these approach will hopefully enhance the knowledge about the characteristic modification in a recirculation zone.

Keywords :

Recirculation Zone, Hot Gas Injection, High Speed Visualization

DAFTAR ISI

| | |
|--|-----------|
| JUDUL | i |
| PERNYATAAN KEASLIAN SKRIPSI | ii |
| PENGESAHAN | iii |
| UCAPAN TERIMA KASIH | iv |
| HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS | vi |
| ABSTRAK | vii |
| ABSTRACT | viii |
| DAFTAR ISI | ix |
| DAFTAR GAMBAR | xi |
| DAFTAR TABEL | xiv |
| DAFTAR SIMBOL | xv |
| BAB 1 PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Perumusan Masalah | 3 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Pembatasan Masalah | 3 |
| 1.5 Metodologi Penelitian | 4 |
| 1.6 Sistematika Penulisan | 5 |
| BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA | 6 |
| 2.1 <i>Separated – Reattaching Flow</i> | 6 |
| 2.2 <i>Backward – Facing Step</i> | 7 |
| 2.3 Lapisan Batas, Lapisan Geser dan Separasi | 9 |
| 2.4 Sistem dan Volume Atur | 10 |
| 2.5 Eksitasi Eksternal | 11 |
| 2.6 Visualisasi Berkecepatan Tinggi Berbasis Lembar Cahaya | 12 |
| BAB 3 METODE PENELITIAN | 13 |
| 3.1 Peralatan Penelitian | 14 |
| 3.2 Peralatan Pengukuran | 22 |
| 3.3 Prosedur Penelitian | 23 |
| 3.4 Kondisi Percobaan | 26 |
| BAB 4 ANALISA DAN PEMBAHASAN | 27 |
| 4.1 Analisa Kualitatif | 27 |
| 4.1.1 Ketinggian <i>Step</i> 20 mm | 27 |
| 4.1.2 Ketinggian <i>Step</i> 40 mm | 34 |
| 4.2 Analisa Kuantitatif | 40 |
| 4.2.1 Ketinggian <i>Step</i> 20 mm | 42 |
| 4.2.1 Ketinggian <i>Step</i> 40 mm | 52 |
| BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN | 62 |
| 5.1 Kesimpulan | 62 |

| | |
|-------------------------|-----------|
| 5.2 Saran | 63 |
| DAFTAR REFERENSI | 64 |
| LAMPIRAN | 66 |



DAFTAR GAMBAR

| | Hal | |
|-------------|--|----|
| Gambar 1.1 | Pola Aliran Resirkulasi <i>Backward – Facing Step</i> | 2 |
| Gambar 2.1 | <i>Backward – Facing Step</i> | 7 |
| Gambar 2.2 | Sistem dan Volume Kendali | 10 |
| Gambar 3.1 | Skema Eksperimental Alat | 11 |
| Gambar 3.2 | Foto alat penelitian secara keseluruhan | 14 |
| Gambar 3.3 | <i>Wind Tunnel</i> skala kecil | 14 |
| Gambar 3.4 | <i>Blower</i> Sentrifugal | 16 |
| Gambar 3.5 | Tampak Samping <i>Test Section</i> Beserta Dimensi | 17 |
| Gambar 3.6 | <i>Heater Control Unit</i> | 18 |
| Gambar 3.7 | Skema Prinsip Kerja <i>Nebulizer</i> | 18 |
| Gambar 3.8 | <i>Nebulizer</i> | 19 |
| Gambar 3.9 | <i>Voltage Regulator</i> | 21 |
| Gambar 3.10 | <i>Dark room</i> | 22 |
| Gambar 3.10 | Skema Manometer Kapiler | 22 |
| Gambar 4.1 | Rangkaian Gambar Pola Aliran Kondisi Rasio Injeksi Injeksi 0,1 dan Temperatur 100 °C Untuk Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 28 |
| Gambar 4.2 | Rangkaian Gambar Pola Aliran Kondisi Rasio Injeksi Injeksi 0,1 dan Temperatur 300 °C Untuk Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 30 |
| Gambar 4.3 | Rangkaian Gambar Pola Aliran Kondisi Rasio Injeksi Injeksi 0,5 dan Temperatur 100 °C Untuk Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 31 |
| Gambar 4.4 | Rangkaian Gambar Pola Aliran Kondisi Rasio Injeksi Injeksi 0,5 dan Temperatur 300 °C Untuk Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 33 |
| Gambar 4.5 | Rangkaian Gambar Pola Aliran Kondisi Rasio Injeksi Injeksi 0,1 dan Temperatur 100 °C Untuk Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 34 |
| Gambar 4.6 | Rangkaian Gambar Pola Aliran Kondisi Rasio Injeksi Injeksi 0,1 dan Temperatur 300 °C Untuk Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 36 |
| Gambar 4.7 | Rangkaian Gambar Pola Aliran Kondisi Rasio Injeksi Injeksi 0,5 dan Temperatur 100 °C Untuk Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 37 |

| | | |
|-------------|--|----|
| Gambar 4.8 | Rangkaian Gambar Pola Aliran Kondisi Rasio Injeksi Injeksi 0,5 dan Temperatur 300 °C Untuk Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 39 |
| Gambar 4.9 | Scaling Citra Kondisi Ketinggian <i>Step</i> 20 mm | 41 |
| Gambar 4.10 | Scaling Citra Kondisi Ketinggian <i>Step</i> 40 mm | 41 |
| Gambar 4.11 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Upstream</i> Y=1 Dengan Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 42 |
| Gambar 4.12 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Upstream</i> Y=2 Dengan Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 43 |
| Gambar 4.13 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Upstream</i> Y=3 Dengan Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 43 |
| Gambar 4.14 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Upstream</i> Y=4 Dengan Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 44 |
| Gambar 4.15 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Upstream</i> Y=5 Dengan Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 44 |
| Gambar 4.16 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Downstream</i> Y=1 Dengan Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 46 |
| Gambar 4.17 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Downstream</i> Y=2 Dengan Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 46 |
| Gambar 4.18 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Downstream</i> Y=3 Dengan Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 47 |
| Gambar 4.19 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Downstream</i> Y=4 Dengan Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 47 |
| Gambar 4.20 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Downstream</i> Y=5 Dengan Tinggi <i>Step</i> 20 mm | 48 |
| Gambar 4.21 | Grafik Standar Deviasi Kondisi Dengan Dan Tanpa Injeksi Pada Y=1 Untuk Ketinggian <i>Step</i> 20 mm | 49 |
| Gambar 4.22 | Grafik Standar Deviasi Kondisi Dengan Dan Tanpa Injeksi Pada Y=2 Untuk Ketinggian <i>Step</i> 20 mm | 49 |
| Gambar 4.23 | Grafik Standar Deviasi Kondisi Dengan Dan Tanpa Injeksi Pada Y=3 Untuk Ketinggian <i>Step</i> 20 mm | 50 |
| Gambar 4.24 | Grafik Standar Deviasi Kondisi Dengan Dan Tanpa Injeksi Pada Y=4 Untuk Ketinggian <i>Step</i> 20 mm | 50 |

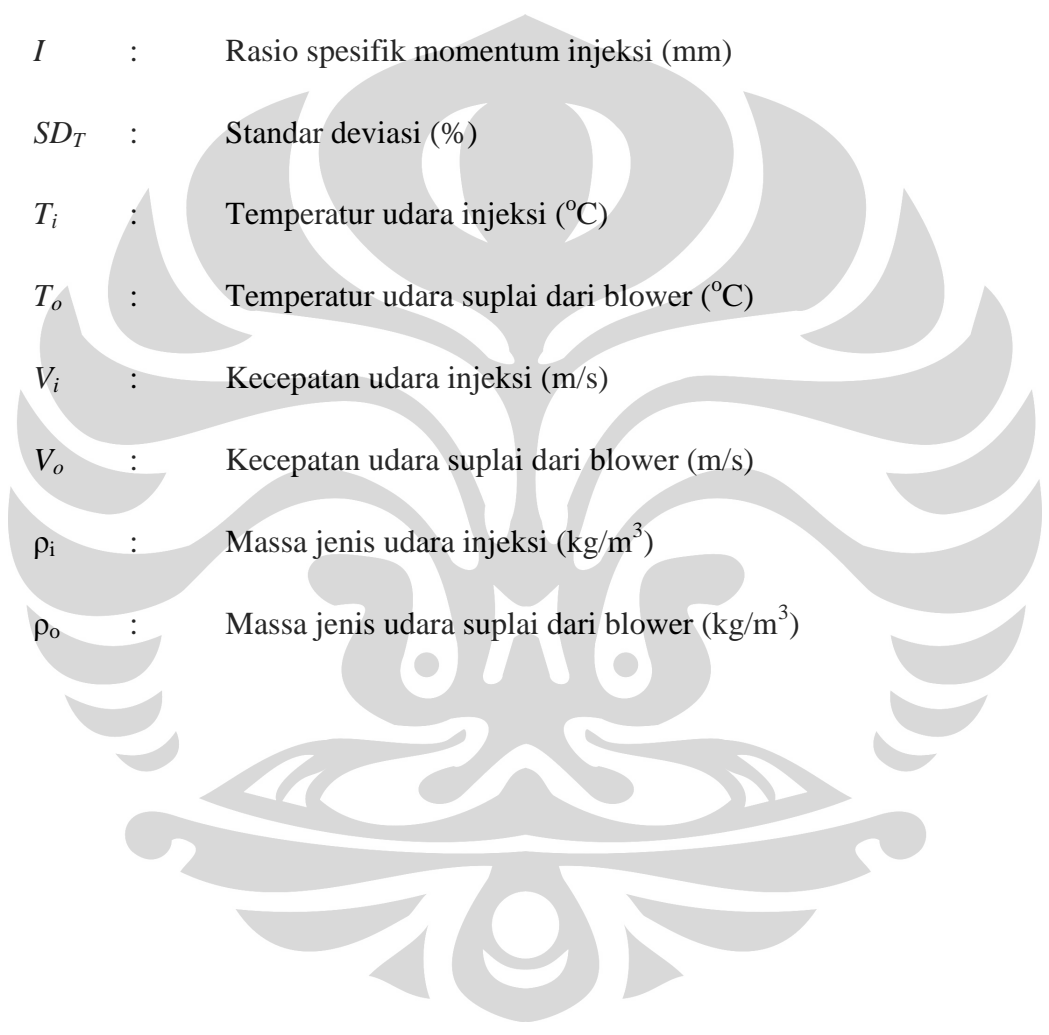
| | | |
|-------------|---|----|
| Gambar 4.25 | Grafik Standar Deviasi Kondisi Dengan Dan Tanpa Injeksi Pada Y=5 Untuk Ketinggian <i>Step</i> 20 mm | 51 |
| Gambar 4.26 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Upstream</i> Y=1 Dengan Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 52 |
| Gambar 4.27 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Upstream</i> Y=2 Dengan Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 52 |
| Gambar 4.28 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Upstream</i> Y=3 Dengan Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 53 |
| Gambar 4.29 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Upstream</i> Y=4 Dengan Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 53 |
| Gambar 4.30 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Upstream</i> Y=5 Dengan Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 54 |
| Gambar 4.31 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Downstream</i> Y=1 Dengan Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 55 |
| Gambar 4.32 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Downstream</i> Y=2 Dengan Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 55 |
| Gambar 4.33 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Downstream</i> Y=3 Dengan Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 56 |
| Gambar 4.34 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Downstream</i> Y=4 Dengan Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 56 |
| Gambar 4.35 | Grafik Perbandingan Kondisi Injeksi Dan Tanpa Injeksi Bagian <i>Downstream</i> Y=5 Dengan Tinggi <i>Step</i> 40 mm | 57 |
| Gambar 4.36 | Grafik Standar Deviasi Kondisi Dengan Dan Tanpa Injeksi Pada Y=1 Untuk Ketinggian <i>Step</i> 40 mm | 58 |
| Gambar 4.37 | Grafik Standar Deviasi Kondisi Dengan Dan Tanpa Injeksi Pada Y=2 Untuk Ketinggian <i>Step</i> 40 mm | 58 |
| Gambar 4.38 | Grafik Standar Deviasi Kondisi Dengan Dan Tanpa Injeksi Pada Y=3 Untuk Ketinggian <i>Step</i> 40 mm | 59 |
| Gambar 4.39 | Grafik Standar Deviasi Kondisi Dengan Dan Tanpa Injeksi Pada Y=4 Untuk Ketinggian <i>Step</i> 40 mm | 59 |
| Gambar 4.40 | Grafik Standar Deviasi Kondisi Dengan Dan Tanpa Injeksi Pada Y=5 Untuk Ketinggian <i>Step</i> 40 mm | 60 |

DAFTAR TABEL

| | Hal |
|--|-----|
| Tabel 3.1 Spesifikasi <i>Nebulizer</i> | 19 |
| Tabel 3.2 Spesifikasi Lampu dan Lembar Cahaya | 20 |
| Tabel 3.3 Spesifikasi Alat Visualisasi Eksperimental | 20 |
| Tabel 3.4 Nilai Parameter Uji | 26 |



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) |
| ρ_i | : | Massa jenis udara injeksi (kg/m^3) |
| ρ_o | : | Massa jenis udara suplai dari blower (kg/m^3) |

BAB 1

PENDAHULUAN

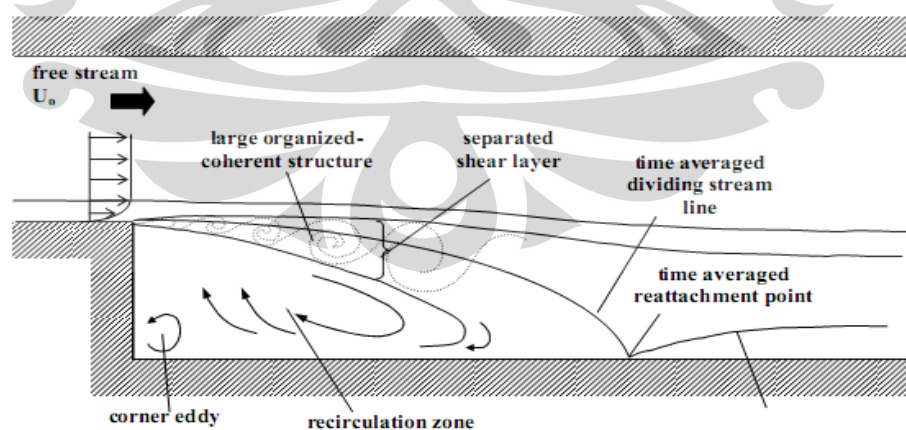
1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi pada saat ini sedang mengalami kemajuan yang pesat dan dapat dikatakan sedang dalam masa dimana persentase laju peningkatannya terbesar dibandingkan masa-masa sebelumnya. Fenomena ini terjadi dikarenakan keperluan manusia atas berbagai macam hal untuk memenuhi kepentingannya sangat tinggi, sehingga berbagai metode atau pandangan yang sebelumnya kurang diperhatikan kini menjadi lebih ditelusuri. Kemajuan teknologi ini terbentuk dari suatu jalur dasar yang menjadi pedoman untuk zaman modern ini dengan tema *green technology*.

Green technology mengusung tidak hanya energi baru yang menghasilkan emisi dan performa yang lebih baik, namun juga peningkatan efisiensi dari sistem yang sudah digunakan pada saat ini. Dengan meningkatkan efisiensi sistem yang sudah ada, dapat menghemat biaya dibandingkan menemukan atau membuat teknologi baru serta mengurangi terjadinya fenomena krisis energi yang diperkirakan akan melanda dunia pada masa depan. Peningkatan efisiensi ini dapat dilakukan khususnya untuk performa alat di bidang yang berhubungan dengan aliran fluida seperti *aerofoil*, *combustor* ataupun aliran keluaran pada pompa baik di industri ataupun komersil. Usaha peningkatan efisiensi ini dapat dikatakan sebagai kemampuan mengkonversi energi menjadi lebih baik dibandingkan kemampuan sebelumnya, baik dari suatu sistem ataupun alat.

Salah satu kajian studi spesifik dari konversi energi bidang termofluida adalah ilmu medan resirkulasi, dimana fenomena ini terjadi karena adanya separasi (pemisahan) aliran. Aplikasi dari studi medan resirkulasi ini mencakup berbagai macam bidang, dimulai dari *vortex shredding* suatu benda dengan geometri *aerofoil*, pengaruh geometri *blade* (sudu) dan olakan untuk aplikasi alat turbo, sistem kontrol jet aktif yang bergelombang, sistem *flame holding* pada suatu *combustor*, dan lain-lain.

Suatu medan resirkulasi yang terjadi karena separasi dapat diikuti proses penyatuan kembali (pertautan), namun bisa tidak diikuti proses pertautan juga. Proses yang tidak diikuti pertautan kembali ada pada aliran yang melewati *bluff body*, sedangkan contoh aliran resirkulasi yang diikuti pertautan kembali adalah pada alat yang akan diteliti pada makalah yaitu aliran kanal dimana terjadi perbesaran mendadak. Perbesaran mendadak ini diwujudkan dengan geometri yang sedemikian rupa sehingga terbentuk seperti anak tangga yang terbalik sehingga dinamakan *backward-facing step*. Pada Gambar 1 dapat terlihat beberapa elemen penting pada aliran resirkulasi pada geometri perbesaran mendadak ini diantaranya proses aliran resirkulasi (*recirculation zone*), kemudian lapisan geser yang terseparasi (*shear layer*) dan terakhir lapisan dimana aliran berkembang kembali (*redevelping boundary layer*). Dengan pola aliran seperti ini, turbulensi yang sangatlah besar serta mempengaruhi sifat *transport* turbulensi. Sifat tersebut ditentukan oleh suatu parameter bernama intensitas turbulensi sehingga dapat meningkatkan laju perpindahan momentum, laju perpindahan panas maupun laju perpindahan massa dalam jangka tertentu. Namun stabilitas dari medan aliran seperti ini sangatlah buruk sehingga diperlukan suatu metode untuk meningkatkan sifat *transport* sehingga memberikan eksitasi eksternal terhadap aliran. Salah satu metode yang digunakan adalah metode injeksi jet pulsatif ataupun kontinu (*continuous / pulsative jet injection*).



Gambar 1. Pola aliran resirkulasi *backward-facing step*

1.2 Perumusan Masalah

Masalah yang ditelusuri adalah peningkatan parameter laju perpindahan momentum, kalor dan massa melalui analisa gambaran karakteristik medan aliran resirkulasi pada *backward-facing step* dengan injeksi jet. Pengaturan rasio momentum ditentukan dengan mengatur kecepatan injeksi jet dari kompresor udara serta kecepatan aliran bebas oleh *blower*.

Setelah mengatur rasio injeksi maka yang diatur berikutnya adalah bidang visualisasi aliran pada *test section*. Bagian ini terbagi menjadi dua yaitu titik posisi injeksi partikel analisa dan metode pengambilan gambar partikel. Setelah gambar didapatkan melalui *image capturing device*, maka gambar harus diolah sehingga dapat dianalisa dengan *image processing*.

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah mendapatkan gambaran karakteristik dari sifat *transport* turbulensi sebagai fungsi parameter dinamika fluida aliran, karakteristik kanal aliran dan eksitasi eksternal pada aliran resirkulasi dimana hal tersebut digunakan sebagai dasar untuk perancangan yang lebih efisien dibandingkan perancangan sebelumnya untuk aliran kompleks pada bidang-bidang keteknikan.

Tujuan ini didasarkan oleh potensi eksitasi eksternal yang dikaji pada saat ini secara umum masih menimbulkan kemungkinan interferensi antara ketidak-tunakan terkait turbulensi terhadap komponen gangguan dari ekstasim.

1.4 Pembatasan Masalah

Penelitian yang dilakukan mempunyai beberapa kondisi pengerjaan sebagai berikut:

- Titik injeksi dari partikel diposisikan sebelum bagian *test section* dan menggunakan dua unit *nebulizer*.
- Menggunakan konsep *dark room* sebagai upaya pengendalian cahaya masuk untuk proses penangkapan medan aliran resirkulasi oleh *high speed camera / digital camcorder*.
- Parameter yang digunakan dalam penelitian adalah rasio momentum 0,1 dan 0,5 untuk temperatur 100 °C dan 300 °C . Geometri dari *test section* yang divariasikan adalah tinggi *step* 20 mm dan 40 mm serta jarak injeksi sebesar 20 mm dan 40 mm.

Pada penelitian ini dilakukan beberapa asumsi juga diantaranya adalah :

- Aliran injeksi jet yang keluar dari *slot* dianggap seragam untuk parameter kecepatan dan temperatur, sehingga hanya satu titik (titik tengah) dari *slot* yang diukur kecepatan dan temperaturnya.
- Aliran bebas yang terjadi mempunyai kecepatan yang seragam seluas penampang yang digunakan
- Tidak terjadi perubahan fase dari partikel aliran berupa *olive oil* akibat temperatur injeksi yang tinggi pada daerah resirkulasi

1.5 Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan langsung secara studi eksperimental oleh penulis bersama mahasiswa jenjang S-2 dan rekan jenjang S-1 pada Laboratorium Mekanika Fluida yang berada di Departemen Teknik Mesin Universitas Indonesia. Percobaan dilakukan dengan mengatur beberapa parameter eksperimental seperti geometri *backward facing step*, rasio momentum injeksi , temperatur injeksi sehingga didapatkan suatu gambar partikel medan aliran resirkulasi yang jelas dimana gambaran ini ditangkap oleh alat *high speed camera* dan *digital camcorder*. Akhirnya gambar yang diolah dengan *software digital image processing* dan akhirnya didapatkan batasan partikel yang dapat dianalisa.

1.6 Sistematika Penulisan

Berikut adalah penjabaran bab yang dituliskan oleh penulis pada makalah yang disesuaikan dengan sistematika penulisan skripsi :

BAB 1 PENDAHULUAN

Bab ini terdiri dari latar belakang, tujuan, sistematika , batasan masalah dan metodologi penelitian.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan teori dasar yang berhubungan dengan aliran fluida pada *backward facing step*.

BAB 3 METODE PENELITIAN

Memberikan penjelasan mengenai alat yang digunakan dari komponen hingga sistem secara menyeluruh beserta prosedur pengambilan data.

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab yang menjelaskan hasil analisa dan pengolahan data yang didapatkan pada proses eksperimental.

BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Memberikan kesimpulan dari semua tahap proses penelitian yang telah dilakukan serta beberapa masukan untuk hal yang berhubungan dengan bidang penelitian ini serta saran untuk penelitian berikutnya.

BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA

Dengan banyaknya aplikasi dari medan resirkulasi untuk meningkatkan laju perpindahan momentum, massa dan kalor pada saat ini di berbagai bidang keteknikan maka terbentuklah berbagai macam alat (*tools*) yang membantu kegiatan eksperimental untuk meningkatkan kemajuan dalam bidang tersebut. Berdasarkan perkembangan teori turbulensi, maka alat seperti CFD (*computational fluid dynamics*) yang sudah digunakan dalam dunia perindustrian untuk *tracing*^[1] ataupun instrumen penunjang eksperimental medan resirkulasi akan semakin maju, namun teori dasar yang menjadi pedoman semua perkembangan teknologi tersebut tidak dapat diabaikan.

2.1 *Separated-Reattaching Flow*

Separated – reattaching flow merupakan suatu kejadian atau fenomena aliran fluida dimana fluida tersebut terseparasi dekat dengan batas padatnya lalu bertaut kembali dengan batas padatnya (*reattachment*) sehingga menghasilkan fluida dengan karakteristik tertentu. Aplikasi dari dasar fenomena ini mencakup banyak hal diantaranya *airfoil* , geometri kendaraan, pompa dan paling umum pada aplikasi sistem pembakaran yang menggunakan aliran resirkulasi untuk membuat pembakaran menjadi stabil. Salah satu studi mengenai sistem pembakaran ini adalah analisis numerik mengenai perubahan aliran tak tunak dan dinamika api dengan teknik *large-eddy-simulation*^[2] dan model LES untuk pembakaran turbulen *premixed* dan *non-premixed*^[3] dimana pada penelitian ini menjelaskan simulasi untuk menginjeksikan bahan bakar pada daerah resirkulasi dari *separated-reattaching flow*.

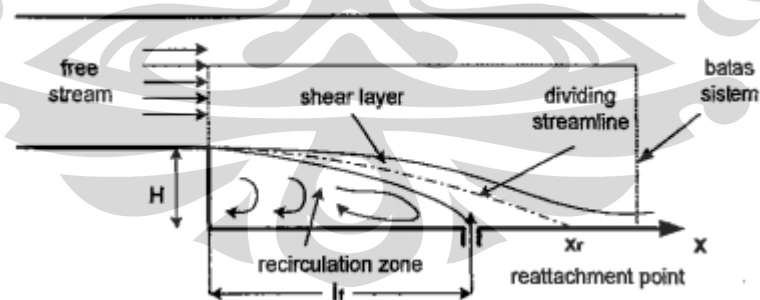
Beberapa penelitian telah dilakukan baik melalui *modelling* maupun eksperimental mengenai fenomena *separated-reattaching flow* ini. Salah satu contoh adalah penggunaan jet sintetik untuk mengontrol aliran yang terseparasi^[4] dimana dengan simulasi ini diharapkan mendapatkan efisiensi yang baik dalam mengatur aliran. Penelitian dasar yang mendukung fenomena dasar lain ini adalah

penggunaan *particle image velocimetry (PIV)* dan pengukuran tekanan pada *forward facing step* untuk mempelajari karakteristik aliran separasi^[5]. Mengenai bidang *reattachment* juga dipelajari dalam penelitian mengenai efek ketinggian *step* terhadap titik *reattachment*^[6].

Bidang lain yang menggunakan fenomena dasar separasi dan pertautan kembali adalah bidang aerodinamika dimana dengan menggunakan SCRAMJET dan pengaturan zona resirkulasi untuk mengurangi tekanan total secara aerodinamis^[7]. Dengan adanya efek *suction* dan *blowing* terhadap aliran separasi sangat berpengaruh dimana salah satunya adalah injeksi yang mempengaruhi karakteristik resirkulasi.

2.2 Backward-Facing Step

Backward-facing step merupakan suatu geometri dimana suatu jalur aliran mendapatkan pelebaran (*contraction*) mendadak sehingga tampak seperti anak tangga yang terbalik^{[22][23]}. Aliran yang melewati geometri ini akan menghasilkan aliran separasi sehingga terbentuk lapisan geser, zona resirkulasi dan lapisan batas yang berkembang kembali. Gambar 2.1 menjelaskan secara umum gambaran dari geometri *backstep* dimana geometri ini sudah dilengkapi titik injeksi beserta parameter yang berperan dalam aliran tersebut.



Gambar 2.1 Backward-facing step

Aliran separasi terjadi tepat pada ujung *step* sehingga membentuk lapisan geser bebas (*free shear layer*). Pada titik tersebut terbentuk garis aliran (*streamline*) yang bersifat paralel terhadap dinding *backstep*. Garis pembagi ini akan mencapai bagian bawah dari dinding geometri dan titik dimana dinding dan

dividing streamline ini bersentuhan adalah titik pertautan kembali atau *reattachment point* (X_r). *Reattachment point* ini didefinisikan sebagai titik dimana gesekan permukaan dinding lokal rata-rata sama dengan nol. Kecepatan aliran rata-rata berdasarkan waktu (*time-averaged streamwise velocity*) pada titik *reattachment point* ini sangat kecil dan secara tiba-tiba aliran membalik menjadi keadaan turbulen. Hal ini menyebabkan tekanan pada *reattachment point* cukup besar. Gradien tekanan searah aliran kurang lebih seimbang dengan gradien tegangan geser normal total dari fluida.

Pada gambar 2.1 dapat dilihat juga bahwa injeksi mempunyai posisi sebelum *reattachment point* sehingga sebelum fluida mengalami pertautan, gangguan dari injeksi akan memaksa aliran bersifat jauh lebih turbulen dibandingkan aliran tanpa injeksi jet.

Berbagai macam perkembangan dan penelitian juga dilakukan terhadap geometri *backward-facing step* ini, diantaranya penelitian perhitungan tegangan geser dengan model Smagorinsky^[8] dimana geometri *backstep* lebih kompleks dan mencari validitas model tersebut menggunakan DNS (*direct numerical simulations*). Penelitian numerikal dilanjutkan dengan meneliti aliran laminar dengan algoritma *viscous-spitting vortex*^[9]. Penelitian dasar yang berlanjut adalah penelitian mengenai dispersi partikel pada geometri *backward-facing step* satu sisi^[10] dimana partikel dengan diameter yang tertentu dialirkan dengan aliran yang melewati geometri *backward-facing step* dan diukur dengan laser anemometer.

Geometri *backward-facing step* yang dimodifikasi juga telah banyak diteliti dimana salah satunya adalah penelitian mengenai pola aliran dengan injeksi berdasarkan *porous injection*^[11]. Pada penelitian ini, aliran dengan injeksi dari dasar plat berlubang dianalisa terhadap aliran fluida yang dialiri melalui *backward-facing step*.

Mengenai penggabungan studi separasi dan *backward-facing step* dibahas pada penelitian PIV pada geometri *backstep-facing* yang dapat diatur^[12]. Pada penelitian ini terdeteksi osilasi atau fluktuasi untuk aliran frekuensi rendah yang diuji. Selain itu kajian mengenai efek penghisapan dan peniupan terhadap

karakteristik fluida untuk geometri *backward-facing step*^[13] juga telah dilakukan. Pendekatan lain terhadap analisa *backward-facing step* adalah mengenai perpindahan kalor laminar pada fluida yang beradiasi pada geometri tersebut^[14]. Sedangkan untuk bidang gabungan dengan pembakaran diperkenalkan penelitian medan *density* pada ruang bakar supersonik dengan konfigurasi *backward-facing step*^[15].

2.3 Lapisan Batas, Lapisan Geser dan Separasi

Lapisan batas pada suatu kajian mekanika fluida adalah lapisan fluida yang parameter kecepatannya dipengaruhi oleh tegangan geser, dimana kecepatan pada lapisan batas ini mendekati kecepatan pada aliran utamanya. Lapisan batas mempunyai karakteristik mengikuti garis aliran dan dengan Bergeraknya lapisan ini sepanjang benda alir maka tegangan geser akan menghambat partikel-partikel fluida sehingga melambat. Dengan melambatnya fluida maka lapisan batas akan semakin tebal seiring jarak dari titik hulu. Fluida yang berada di dalam lapisan batas juga mengalami gradien tekanan dimana jika tekanan berkurang ke arah hilir (*downstream*) akan memperbesar momentum lapisan ataupun sebaliknya (*upstream*).

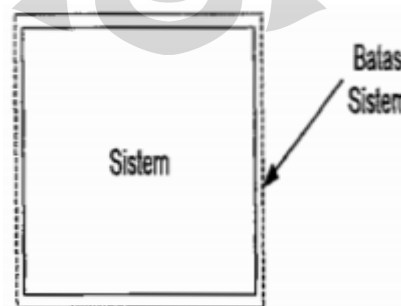
Lapisan geser merupakan lapisan yang terbentuk karena efek *adverse pressure gradient* dan kontak yang kuat dengan permukaan dinding di titik *reattachment point*. Lapisan ini terbentuk seiring hilangnya lapisan batas yang berada pada aliran bebas (*free flow*) dimana pada Gambar 2.1 lapisan geser digambarkan sebagai garis nyata yang akan mencapai permukaan dinding *backstep* menuju *reattachment zone*. Pada Gambar 2.1 juga menggambarkan suatu bagian aliran yang berbelok ke daerah resirkulasi dikarenakan *adverse pressure gradient* yang kuat.

Penelitian mengenai model lapisan batas LES untuk aliran terpisah^[16] dilakukan sebagai wujud aplikasi dari dasar fenomena ini, dimana dengan menggunakan *backward facing-step flow*, data yang didapatkan menghasilkan *output* yang sesuai dengan referensi.

Separasi merupakan fenomena yang menyebabkan semua kejadian di bagian sebelumnya terjadi, dimana secara teknis separasi adalah pemisahan lapisan batas dengan batas permukaan padatnya. Hal yang menyebabkan fenomena ini adalah *adverse pressure gradient* walaupun hal ini bukan merupakan syarat utama terjadinya separasi. Dengan adanya separasi, maka akan terbentuk 2 aliran yang mempunyai arah gerak yang berbeda yaitu aliran yang bergerak paralel dengan aliran utamanya dan aliran yang mempunyai arah berlawanan dan bahkan membentuk aliran resirkulasi karena terjebak. Aliran ini mempunyai sifat kecepatan yang rendah, berlawanan dengan aliran utama yang mempunyai kecepatan tinggi.

2.4 Sistem dan Volume Atur

Kumpulan dari materi dengan identitas tetap (partikel-partikel fluida yang mempunyai karakter sama), dimana materi tersebut dapat bergerak, mengalir dan melakukan kontak dengan lingkungannya disebut sistem^[21]. Dimana volume atur adalah volume di dalam ruang yang dapat dilalui fluida. Terdapat berbagai macam ukuran dari sistem dimulai dari yang besar seperti lautan hingga berukuran yang sangat kecil seperti partikel. Partikel pada fluida dapat bergerak dan berinteraksi dengan lingkungan namun mempunyai massa yang konstan dimana hal ini mempunyai hubungan dengan Hukum Newton mengenai Hukum Kekekalan Massa dimana hukum tersebut menyatakan bahwa massa dari sistem adalah konstan. Sistem yang didefinisikan pada penelitian ini adalah sistem yang berisikan partikel-partikel fluida yang bergerak pada geometri *backward-facing step*.



Gambar 2.2 Sistem dan Volume Kendali

Pembatas dari volume atur adalah permukaan atur, dimana geometri dari volume kendali tidak terbatas dan dapat berupa apa saja. Batas dari volume atur seringkali dibuat berdekatan dengan batas sistem. Pada penelitian ini, volume atur digunakan untuk menganalisa aliran fluida alam geometri alat berupa *backward-facing step*. Volume atur yang diterapkan pada penelitian ini berupa volume yang stagnan, dimana nilainya selalu tetap.

2.5 Eksitasi Eksternal

Eksitasi eksternal dimaksudkan sebagai suatu aliran sekunder berasal dari luar yang dialirkan menuju aliran utama (primer) sehingga akan terjadi perubahan pola pergerakan aliran. Eksitasi ini dapat ditempatkan di berbagai posisi dan salah satunya adalah pada medan resirkulasi untuk kanal terbuka, yaitu zona dimana fluida terperangkap dan membentuk aliran resirkulasi.

Pengkajian mengenai eksitasi eksternal untuk geometri *backward-facing step* dimulai menggunakan fluida jet injeksi sekunder dari bagian bawah kanal pada bagian hulunya sehingga menghasilkan perubahan koefisien perpindahan panas yang cukup besar pada kanal. Penelitian eksitasi eksternal ini kemudian menghasilkan kesimpulan bahwa jumlah aliran massa dapat mengubah aliran utama (*free flow*), bentuk dan intensitas turbulensi serta laju perpindahan panas pada kanal aliran tersebut.

Setelah beberapa perkembangan lebih lanjut mengenai eksitasi eksternal ini, baik dari posisi injeksi hingga fluida injeksi maka aplikasi eksitasi eksternal pada aliran resirkulasi makin luas dan makin ditelusuri pada bidang keteknikan.

Beberapa penelitian yang berdasarkan eksitasi eksternal berupa injeksi diantaranya adalah efek *rheology* mikro pada injeksi mikro pada dinamika partikel^[17] yang mempelajari sifat *injection moulding* pada geometri *backward-facing step* mikro. Selain menggunakan injeksi mikro, penggunaan ukuran *droplet* dalam *fuel spray*^[18] digunakan untuk menentukan LES pada sistem tersebut.

2.6 Visualisasi Berkecepatan Tinggi Beerbasis Lembar Cahaya (Light Sheet Based High Speed Visualization)

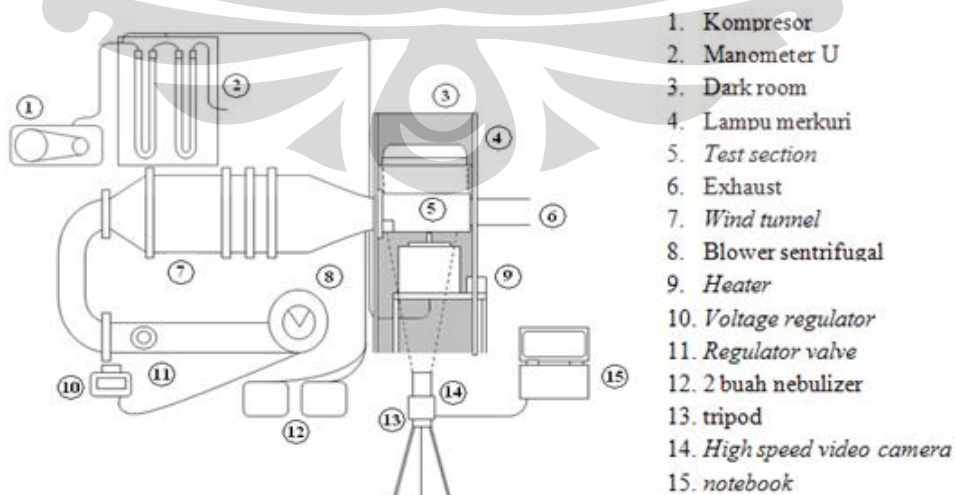
Perolehan data yang mempunyai sifat empiris dan komprehensif khususnya untuk mempelajari struktur aliran resirkulasi dapat diperoleh dengan menggunakan metode visualisasi berdasarkan lembaran cahaya sehingga mampu mendapatkan citra dari suatu gerakan dengan kecepatan tinggi, dimana citra ini menjelaskan mengenai pergerakan partikel fluida dalam geometri uji.

Beberapa metode visualisasi sudah diterapkan dalam penelitian diantaranya adalah *Digital Particle Image Velocimetry* (DPIV) dimana citra dengan bentuk partikel dapat diperoleh. Selain itu, alat seperti *Laser Doppler Anemometer* dapat digunakan sesuai dengan ukuran pemberian partikel yang berpengaruh pada kecepatan. Salah satu metode penggunaan PIV adalah teknik atau tata cara untuk pengukuran terhadap medan aliran dinding pada bidang *biofluid mechanics*^[19] ataupun penggunaan PIV *stereoscopic* untuk mendapatkan karakteristik struktur aliran turbulen yang dihasilkan oleh laser^[20].

BAB 3

METODE PENELITIAN

Penelitian yang berdasarkan turbulensi pada geometri *backward-facing step* ini merupakan tahap lanjutan dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya dimana bila pada penelitian sebelumnya menjelaskan aspek distribusi temperatur, sifat pembakaran dalam *test section* hingga analisa *computational fluid dynamics* (CFD) , maka masalah dalam penelitian kali ini mempunyai metode dan hasil yang berbeda. Menggunakan *nebulizer* sebagai pemecah partikel (*atomizer*) , maka akan ditangkap citra oleh alat perekam gambar seperti *digital camera* atau *high speed camera* pada bagian *test section*. Pengaturan cahaya dilakukan dengan membuat *dark room* disekitar *test section* agar kualitas gambar yang ditangkap berdasarkan *light sheet based visualization of flow field* menjadi semakin baik. *Supply* dari aliran bebas berasal dari *blower* sedangkan injeksi dilakukan dengan memasukkan *compressed air* dari kompresor gedung dimana sebelum memasuki *test section* akan melalui *heater* untuk dipanaskan dulu. Parameter pemanasan yang digunakan ada 2 buah yaitu 100 °C dan 300 °C. Parameter lain adalah rasio momentum yang mengatur perbandingan kecepatan aliran bebas dan aliran injeksi. Skema peralatan secara umum terdapat pada Gambar 3.1 .



Gambar 3.1 Skema eksperimental alat



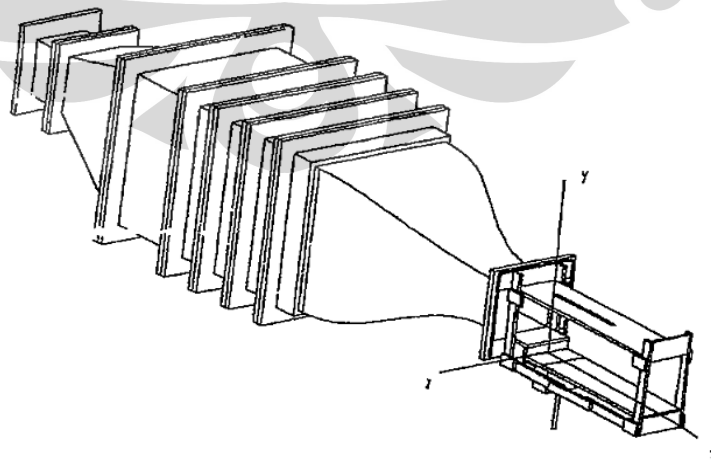
Gambar 3.2 Foto alat penelitian secara keseluruhan

3.1 Peralatan Penelitian

Peralatan dalam penelitian untuk pengambilan data eksperimental sesuai Gambar 3.1 antara lain adalah :

a. *Wind Tunnel* Skala Kecil

Wind tunnel dalam penelitian eksperimental adalah alat yang menghasilkan udara dengan profil kecepatan seragam seluas permukaan kerjanya pada bagian *nozzle* keluaran yang berhubungan dengan *inlet test section*. Gambar 3.3 menggambarkan skema gabungan antara *wind tunnel* dan *test section*.



Gambar 3.3 *Wind tunnel* dengan *test section*

Wind tunnel ini terdiri dari beberapa komponen sesuai Gambar 3.3, diantaranya :

- Penyearah aliran / *Straightener*

Bagian dari *wind tunnel* yang berfungsi untuk mengatur arah aliran udara atau menyearahkan aliran udara , dimana rangkaian *wind tunnel* ini terdiri dari 2 penyearah. Penyearah pertama terletak pada bagian dimana penampang berubah dari pipa menjadi kotak. Penyearah kedua terletak setelah *diffuser* dimana dimensi penyearah ini lebih besar.

- *Diffuser*

Diffuser berfungsi sebagai pereduksi kecepatan aliran udara pada *wind tunnel* , dimana hal ini dilakukan untuk mengurangi turbulensi udara yang dihasilkan oleh *blower*. Posisi *diffuser* berada setelah bagian penyearah pertama.

- Lapisan penyekat / *Screens*

Seperti Gambar 3.3, *wind tunnel* terdiri dari beberapa bagian luasan dan bagian ini dipisahkan oleh lapisan penyekat berupa *meshwire* dengan ukuran 18 lubang per inchi². Fungsinya adalah mengurangi turbulensi udara yang keluar menuju *inlet test section* , dimana setelah melewati beberapa lapisan *screens* ini diharapkan aliran mempunyai sifat aliran laminar.

- *Converging Nozzle*

Bagian yang diharapkan dapat menghasilkan distribusi kecepatan aliran fluida yang seragam. Bagian *nozzle* ini mempunyai *contraction ratio* sebesar 9,5:1.

- *Settling Chamber*

Bagian yang terdiri dari *section-section* dari *wind tunnel* yang mempunyai *screens*. Bagian ini dapat di bongkar pasang agar dapat dibersihkan secara berkala.

b. *Blower Sentrifugal*

Merupakan alat yang berguna untuk menghasilkan / menyuplai udara *ambient* dengan kecepatan yang ditentukan. Blower ini dapat diatur kecepatan udara dengan merubah bukaan dimulai dari nilai -1 hingga 11. Ukuran koneksi *blower* dengan pipa paralon adalah sebesar 4 inchi dengan energi listrik sebagai dsar peggerak. *Blower* ini juga digabungkan dengan *voltage regulator* untuk mengatur keluaran daya sehingga dapat menghasilkan kecepatan udara yang lebih rendah agar visualisasi lebih baik.



Gambar 3.4 *Blower sentrifugal*

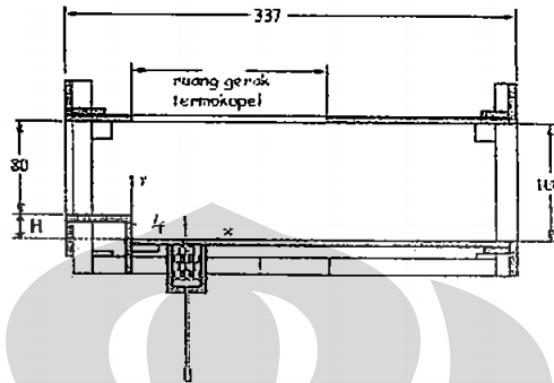
c. *Exhaust Valve / Katup Buang*

Katup yang diletakkan setelah *blower* ini digunakan untuk membuang udara keluar untuk mengurangi kecepatan udara. Posisi bukaan katup ini selalu dalam keadaan 100% terbuka, hal ini dilakukan untuk mengurangi kecepatan udara, sehingga visualisasi yang dilakukan menjadi lebih jelas.

d. *Test Section*

Bagian dari *setup* ekperimental dimana kegiatan pengambilan data dilakukan dengan dimensi 80 mm x 80 mm untuk luasan permukaan *inlet* dan tinggi tangga (H) yang dapat diatur sesuai kondisi percobaan. Panjang total dari *test section* adalah 337 mm. Pada bagian dasar terdapat *line slot* yang merupakan titik injeksi jet selebar *test section* , dimana l_f menunjukkan jarak dari *step* hingga *slot* injeksi sesuai Gambar 3.5.

Dengan ukuran geometri *backstep* seperti ini, titik pertautan (*reattachment point*) berada disekitar $5,5 H$ [2].



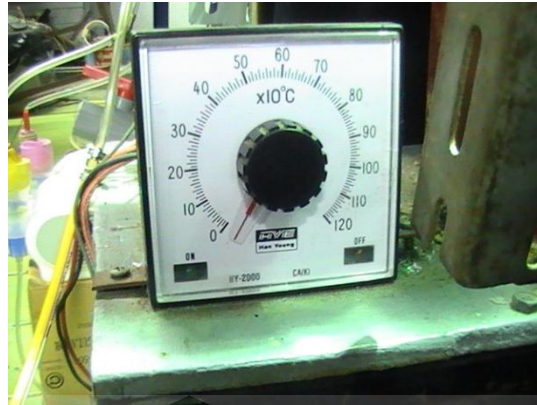
Gambar 3.5 Tampak samping *test section* beserta dimensi

e. Kompresor Udara

Merupakan alat pendistribusi udara bertekanan yang mengalir menuju *slot* injeksi dari *test section*. Sebelum memasuki injeksi, udara harus diatur kecepatannya melalui manometer kapiler yang sudah terkalibrasi kemudian melalui bagian *heater* untuk mengkondisikan udara sesuai dengan kebutuhan eksperimental.

f. *Heater*

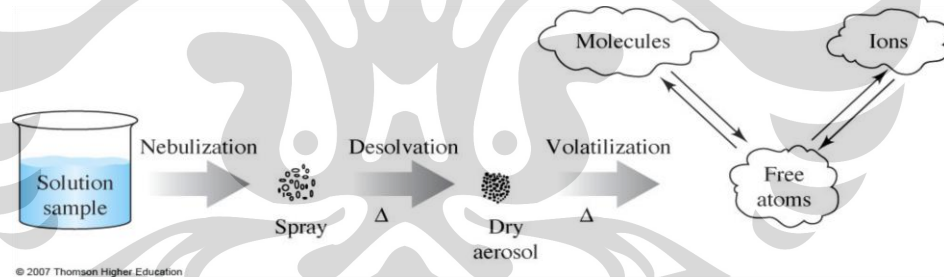
Bagian dari pengkondisian udara masuk injeksi, dimana udara yang telah melewati manometer kapiler dipanaskan sehingga menghasilkan udara bertemperatur tinggi sesuai prasyarat percobaan. Kemampuan *heater* bertipe *induction coil heating* ini mencapai pemanasan $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan daya 2000 Watt. Udara panas yang telah melewati *heater* akan diteruskan ke *test section* bagian *slot* injeksi berwadah kecil berisi bola-bola kecil untuk meratakan aliran di dalam *test section*.



Gambar 3.6 Heater Control Unit

g. *Nebulizer*

Merupakan alat yang menggunakan prinsip atomisasi untuk menghasilkan partikel-partikel kecil dari fluida yang dianalisa untuk pola turbulensi pada *backward-facing step*. Prinsip kerja alat ini ditunjukkan pada Gambar 3.7 dimana dari bentuk *liquid*, sampel akan di bentuk menjadi *spray*, kemudian diikuti proses *desolvation* dan *volatilization*.



Gambar 3.7 Skema prinsip kerja *nebulizer*

Alat ini mempunyai beberapa komponen, diantaranya adalah *portable compressor* yang bekerja dengan daya 1000 Watt untuk udara menghasilkan tekanan tinggi yang digunakan untuk proses atomisasi. *Fluida* yang akan dikabutkan ditempatkan pada *nebulizer cup* yang mempunyai bentuk sedemikian rupa sehingga pada saat udara bertekanan tinggi memasuki *cup* akan terjadi proses atomisasi. Aliran kabut tersebut dialirkan menuju bagian keluar *wind tunnel* mendekati *inlet test section*. Gambar 3.8 merupakan *nebulizer* yang digunakan.



Gambar 3.8 Nebulizer

Tabel 3.1 menjelaskan mengenai spesifikasi dari *nebulizer* yang digunakan dimana sampel fluida yang diatomisasi adalah *olive oil*.

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 μ 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 |

h. *Light Sheet Emitter*

Light Sheet Emitter atau alat penghasil cahaya berdasarkan prinsip lembaran yang digunakan adalah lampu gas merkuri dengan daya 400 Watt. Tabel 3.2 menunjukkan spesifikasi dari lampu yang digunakan, dimana lembaran penghasil *light sheet* dipasangkan dipermukaan pendar lampu berupa material seng yang diberikan *slot* tipis.

Tabel 3.2 Spesifikasi lampu dan lembar cahaya

| Lembar Cahaya | |
|--------------------------|---|
| Sumber cahaya | <i>Halogen Lamp (1000 W) or Mercury Lamp</i> |
| Tebal lembar cahaya | Ketebalan, $t = 0.4 \text{ mm}$ |
| Intensitas lembar cahaya | Bervariasi kurang dari 3% dari nilai puncak di bagian pusat |

i. *High Speed Video Camera*

Peralatan terakhir untuk prosedur eksperimental adalah alat perekam berupa *High Speed Video Camera* yang mempunyai ketelitian kuantitatif yang tinggi untuk menangkap gambar. Tabel 3.3 menjelaskan detail spesifikasi *High Speed Video Camera* yang digunakan.

Tabel 3.3 Spesifikasi alat visualisasi eksperimental

| Visualisasi | |
|-------------|---------------------------------|
| Camera | <i>High speed video camera</i> |
| Recording | <i>4000 frame/s</i> |
| Exposure | <i>1/4000 s (shutter speed)</i> |
| Digitizing | VITcam video capture |
| Image | 480 x 640 (.avi format) |
| Resolution | 280 dpi |

Perlu diperhatikan untuk bagian *recording* bahwa kecepatan yang digunakan untuk eksperimen bukanlah 4000 *fps* namun 125 *fps*. 4000 *fps* merupakan kemampuan maksimal kamera, sedangkan digunakan 125 *fps* dikarenakan kemampuan menangkap visualisasi hanya terbatas pada jangka *frame* tersebut.

j. *Voltage Regulator*

Merupakan alat yang berfungsi membatasi beda tegangan listrik sesuai yang dikehendaki dimana *range* dari *voltage regulator* ini dimulai dari 0 volt hingga 230 volt. Alat ini digunakan untuk mengatur tegangan tiga buah alat yaitu 2 buah *nebulizer* dan dan pompa sentrifugal.



Gambar 3.9 *Voltage regulator*

k. *Dark Room*

Merupakan *set* untuk pengambilan data dimana pengaturan cahaya yang masuk pada daerah pengambilan data dapat diatur. Untuk mendapatkan citra yang optimal diperlukan lingkungan yang sangat gelap, dimana tidak ada sumber cahaya selain dari sumber penerangan utama yaitu lampu merkuri / halogen.



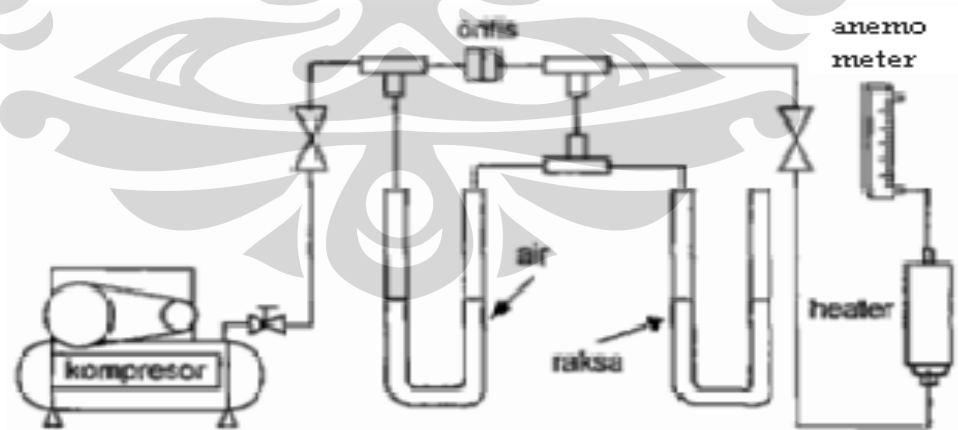
Gambar 3.10 Dark room

3.2 Peralatan Pengukuran

Peralatan pengukuran yang sudah dikalibrasi sesuai standar digunakan untuk mendapatkan data mentah, diantaranya adalah sebagai berikut :

a. Capillary Manometer

Merupakan alat yang berguna untuk mengukur debit udara yang dialirkan dari kompresor menuju *test section* bagian injeksi jet. Alat ini harus dikalibrasi terlebih dahulu untuk memudahkan kegiatan eksperimental. Kalibrasi yang dilakukan terhadap manometer ini adalah kalibrasi kecepatan keluar pada *slot* injeksi jet menggunakan *digital anemometer*.



Gambar 3.11 Skema manometer kapiler

Sesuai skema pada Gambar 3.11, udara dari kompresor akan melewati manometer kapiler terlebih dahulu. Udara yang melewati manometer ini

akan menekan air dan raksa, dimana manometer raksa berfungsi sebagai pembaca *back pressure*. Nilai *back pressure* ini harus dijaga konstan melalui pengaturan bukaan katup dimana nilai konstan Δh ini sebesar 250 mmHg. Nilai yang dibaca adalah perbedaan ketinggian untuk manometer media air. Kemudian kecepatan keluar yang diukur dengan *anemometer* pada bagian injeksi jet diukur dan dibuat grafik karakteristik dari parameter tersebut untuk mengatur rasio momentum injeksi.

b. *Digital Thermometer*

Termometer *digital* digunakan untuk proses kalibrasi *heater* dari *setup* eksperimental. Temperatur yang keluar dari *heater* dan pada saat di *slot* injeksi mempunyai perbedaan temperatur yang besar, oleh karena itu *probe* dari termometer ini ditempatkan pada *slot* injeksi udara panas.

c. *Digital Anemometer*

Anemometer yang digunakan bertipe , dimana digunakan filamen semikonduktor untuk mengukur kecepatan fluida yang melewatinya. *Anemometer* ini digunakan untuk mengkalibrasi dua kecepatan, yaitu kecepatan aliran bebas dan kecepatan *slot* injeksi jet.

3.3 Prosedur Penelitian

Pengambilan data dapat dilakukan setelah melakukan beberapa tahapan prosedur terlebih dahulu dan pengaturan beberapa parameter tersebut harus berdasarkan rasio spesifik momentum injeksi yang telah ditentukan, sesuai persamaan dibawah :

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

$I = \text{Rasio Momentum Spesifik}$

$V_i = \text{Kecepatan Injeksi}$ $\rho_i = \text{Massa Jenis Udara Injeksi}$

$V_o = \text{Kecepatan Udara Suplai}$ $\rho_o = \text{Massa Jenis Udara Suplai}$

Dimana ρ_o dan ρ_i adalah kerapatan udara untuk aliran bebas dan aliran injeksi secara berturut-turut. Parameter V_o dan V_i adalah kecepatan udara bebas dan injeksi. Berikut adalah beberapa tahapan pengaturan parameter kerja :

a. Pengaturan Kecepatan Blower dan Injeksi Jet

Kecepatan pada aliran bebas diatur menggunakan *blower* dengan mengatur antara tegangan pada *voltage regulator* dan bukaan dari *blower* itu sendiri, terdapat 12 bukaan dimulai dari bukaan terkecil sebesar -1 hingga bukaan maksimum sebesar 11. *Voltage regulator* yang digunakan mempunyai kapasitas hingga 250 volt. Kecepatan udara yang masuk ke *test section* merupakan parameter yang digunakan sehingga harus dikalibrasi terlebih dahulu. Selain itu, bukaan katup buang juga divariasikan, namun pada kegiatan eksperimental katup selalu terbuka 100%. Untuk mengatur kecepatan injeksi jet, digunakan data hasil kalibrasi kecepatan udara yang masuk ke *slot* injeksi. Pengaturan kedua parameter kecepatan ini diatur sedemikian rupa sehingga rasio spesifik momentum mempunyai nilai 0,1 dan 0,5.

b. Pengaturan Temperatur Injeksi

Setelah mendapatkan rasio injeksi yang diinginkan, maka temperatur pada *heater* yang sudah terkalibrasi harus disesuaikan dengan kecepatan udara injeksi. Pengukuran temperatur dilakukan pada *slot* injeksi pada *test section* dan diambil beberapa data sehingga data yang diambil tergolong *valid*. Agar mendapatkan temperatur yang stabil khususnya pada temperatur tinggi, *heater* perlu didiamkan 15 hingga 30 menit sehingga seluruh *test section* sudah mendapatkan suhu yang merata.

c. Pengaturan *Nebulizer* dan Pencahayaan

Pengaturan *nebulizer* dilakukan sedemikian rupa agar partikel aliran yang dialiri dapat memberikan gambaran aliran yang cukup jelas. Dengan

menggunakan dua buah *nebulizer* diharapkan konsentrasi asap yang dihasilkan menjadi lebih baik pada visualisasinya. Kecepatan *outflow* selang *nebulizer* dapat diabaikan karena kecepatan *free flow* dari *blower* jauh lebih besar. Untuk pencahayaan, posisi yang ditempatkan rangka dasar harus menempati posisi dimana tepat di tengah *test section* sehingga partikel yang ditangkap dapat divisualisasi secara maksimal.

d. Pengaturan *High Speed Video Camera* dan *Video Camera*

Setting dari *High speed video camera* atau *video camera* sangat penting dalam proses visualisasi partikel aliran terutama posisi dan sudut *recording* dari kedua alat tersebut. Konfigurasi lain yang tak kalah penting adalah fokus dari lensa, bukaan diafragma, *shutter speed*, *recording time*, serta pengaturan tampilan pada *laptop* sebagai penerima data. *Setting* yang digunakan untuk pengambilan data penelitian ini adalah *shutter speed* sebesar 62 *fps* untuk *high speed video camera* dan 25 *fps* untuk *video camera*.

e. Pengolahan Citra

Data yang diperoleh dari kedua alat perekam gambar merupakan video yang tidak dapat diolah secara langsung. Oleh karena itu dengan menggunakan *software* pemecah video, akan didapatkan data berupa ribuan gambar untuk diolah dengan *software image processing*. Data gambar yang ditangkap tidak dapat digunakan pada kondisi mentah sehingga perlu dilakukan berbagai macam pengolahan dari pembersihan partikel pengotor hingga peningkatan kontras agar partikel aliran dapat dianalisa, sehingga pada akhirnya data sudah siap untuk dianalisa. Namun penggunaan pengolahan citra ini ada batasannya dimana jika gambar data mentah kurang mencukupi pencahayaannya, proses pengolahan citra menjadi sulit dilakukan dan walaupun dapat dilakukan sangat tidak optimal hasil yang diberikan.

3.4 Kondisi Percobaan

Terdapat berbagai kondisi percobaan diantaranya adalah rasio injeksi, tinggi dari *step* , jarak *step* hingga temperatur injeksi yang masuk pada *slot* injeksi jet. Pada Tabel 3.4 dijelaskan secara singkat mengenai kombinasi kondisi percobaan yang diambil.

Tabel 3.4 Nilai parameter uji

| 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}) |
|-----------------------------|---------------------------------|--|--|
| 2H = 40 mm | 0,1 | 1,2 m/s dan 30 ⁰ C 1,8 m/s dan 30 ⁰ C | 0,42 m/s dan 100 ⁰ C 0,78 m/s dan 300 ⁰ C |
| 4H = 80 mm | 0,5 | 1,2 m/s dan 30 ⁰ C 2,5 m/s dan 30 ⁰ C | 0,94 m/s dan 100 ⁰ C 2,5 m/s dan 300 ⁰ C |
| Temp (⁰C) | | ρ (kg/m³) | |
| 30° Celcius | | 1.165 kg/m ³ | |
| 100° Celcius | | 0.9461 kg/m ³ | |
| 300° Celcius | | 0.6159 kg/m ³ | |

Selain itu, parameter yang diatur adalah tata cara pengambilan gambar dimana digunakan dua buah alat pengambil gambar, yaitu *video camera* dan *high speed video camera*.

BAB 4

ANALISA DAN PEMBAHASAN

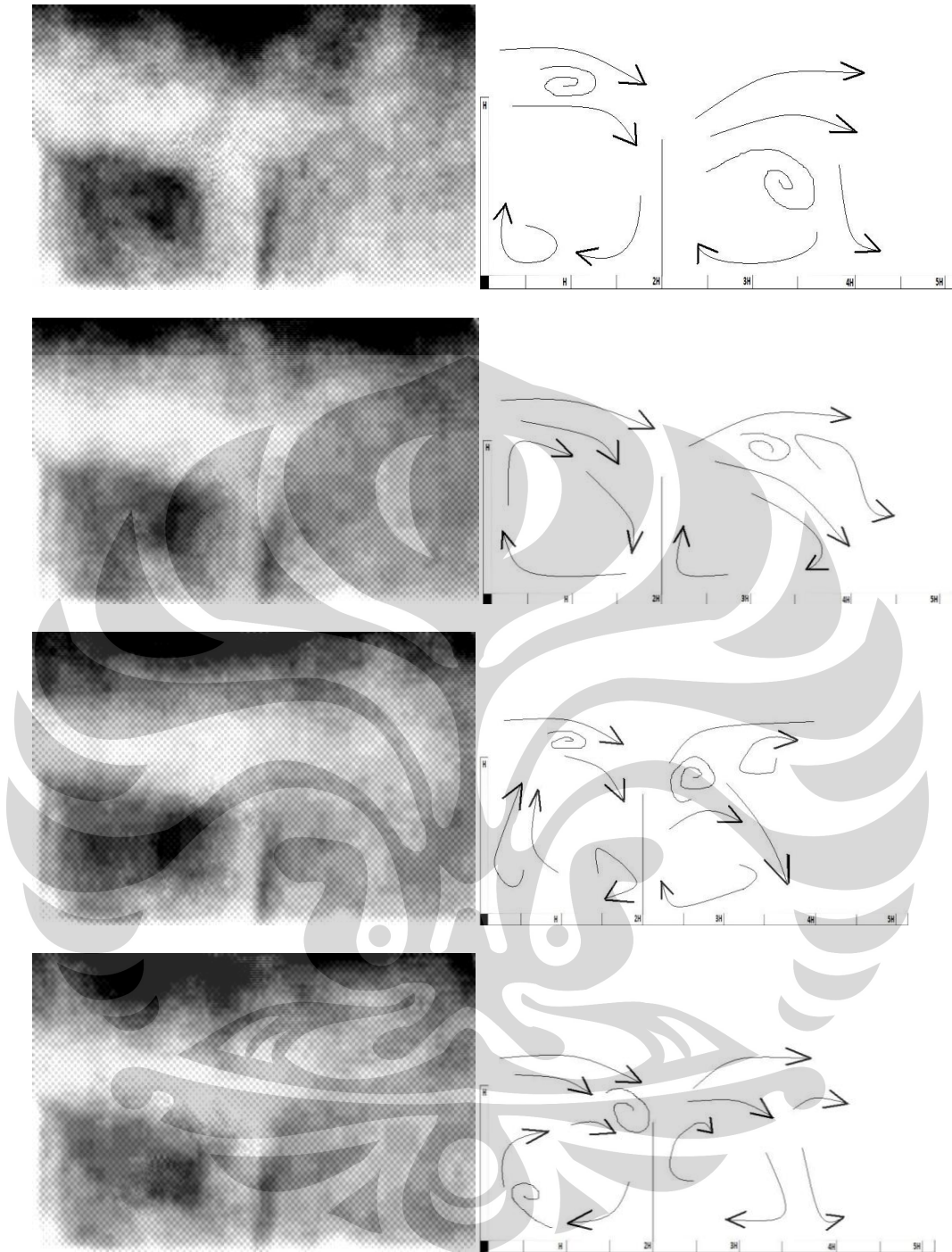
Penggunaan metode visualisasi yang telah dilakukan pada saat eksperimental akan menghasilkan data berupa gambar-gambar yang menggambarkan karakteristik dari aliran dengan injeksi gas panas pada daerah resirkulasi. Gambar tersebut kemudian diolah menggunakan *tools* dari *image processing* sehingga data-data berupa gambar tersebut dapat dianalisa. Hasil pengolahan data tersebut akan dibagi berdasarkan dua buah pandangan, yaitu dari segi kualitatif dan kuantitatif. Segi kualitatif menjelaskan mengenai fenomena yang terjadi dalam aliran pada *backward-facing step* dengan injeksi gas panas dimana partikel asap yang mengalir akan dianalisa pola pergerakan selama berada di daerah visualisasi. Sedangkan analisa kuantitatif akan menjelaskan mengenai sifat aliran berdasarkan angka yang diperoleh dari *image processing* yang kemudian dilakukan proses *averaging* dari 100 *sample data*.

4.1 Analisa Kualitatif

Prosedur eksperimental untuk injeksi gas panas pada aliran resirkulasi dilakukan dalam berbagai kondisi dan berikut adalah pembagian analisa kualitatif berdasarkan ketinggian *step* , temperatur dan rasio injeksi.

4.1.1 Ketinggian *step* 20 mm

Data visualisasi yang diperoleh untuk menggambarkan pola aliran dengan injeksi pada daerah resirkulasi ini salah satunya menggunakan kondisi ketinggian *step* sebesar 20 mm atau H . Variasi yang dilakukan pada kondisi ini adalah rasio injeksi dan temperatur injeksi. Variasi yang akan dianalisa secara kualitatif untuk kondisi ketinggian *step* 20 mm ini adalah kondisi temperatur 100 °C dan 300°C , serta rasio injeksi sebesar 0.1 dan 0.5. Analisa ini juga berdasarkan dari daerah pada aliran resirkulasi ini, yaitu daerah *upstream* dan *downstream*.



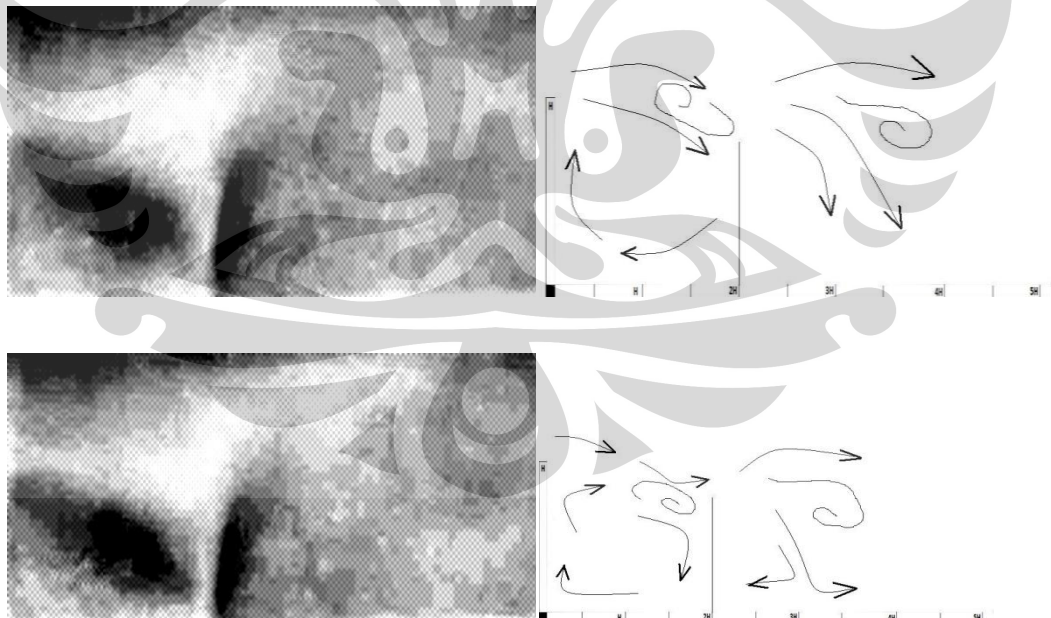
Gambar 4.1 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.1 dan temperatur 100 °C untuk tinggi *step* 20 mm

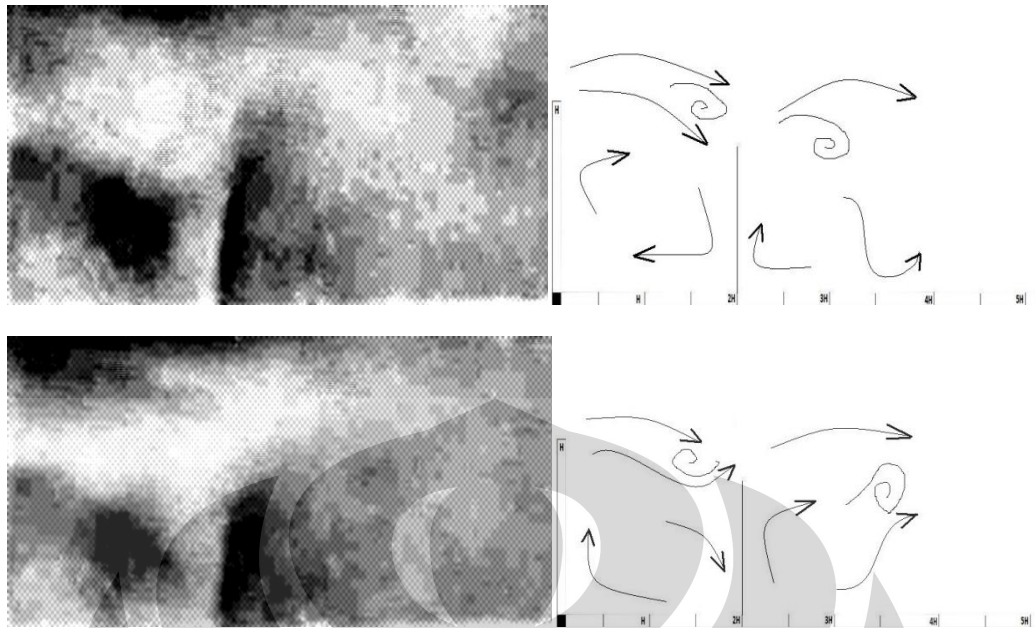
Rangkaian gambar pertama yang dianalisa adalah kondisi rasio injeksi 0.1 dan temperatur 100 °C. Hal pertama yang dapat di analisa adalah terdapat palung pada daerah *upstream* dimana hal ini ditunjukkan dengan daerah gelap yang tidak tertembus oleh partikel aliran, sedangkan untuk daerah *downstream* hal ini tidak berlaku. Partikel aliran menutupi

seluruh daerah *downstream* , hal ini menunjukkan bahwa aliran resirkulasi di daerah tersebut tergolong cukup kuat, sedangkan untuk di daerah *upstream* tergolong lemah diakibatkan munculnya palung tersebut.

Untuk tingkat turbulensi , daerah yang dikatakan mempunyai nilai yang tinggi adalah daerah pada gambar dengan nilai RGB tertinggi atau dengan kata lain paling pekat partikel alirannya. Pada gambar dapat dilihat bahwa letak turbulensi tertinggi ada pada daerah *shear layer* dimana aliran dari *free stream* mulai mengalami separasi dan mengenai daerah injeksi. Mengenai injeksi itu sendiri dapat dilihat bahwa cukup tegak, namun ketinggiannya yang tidak mencapai *step* menunjukkan bahwa injeksi tersebut tidak mampu menembus *shear layer*.

Pada ilustrasi Gambar 4.1 digambarkan arah-arah aliran dan pola pergerakannya serta tingkat turbulensi tinggi yang digambarkan dengan simbol rotasi. Arah aliran ini disesuaikan dengan gambar data visualisasi yang didapatkan.

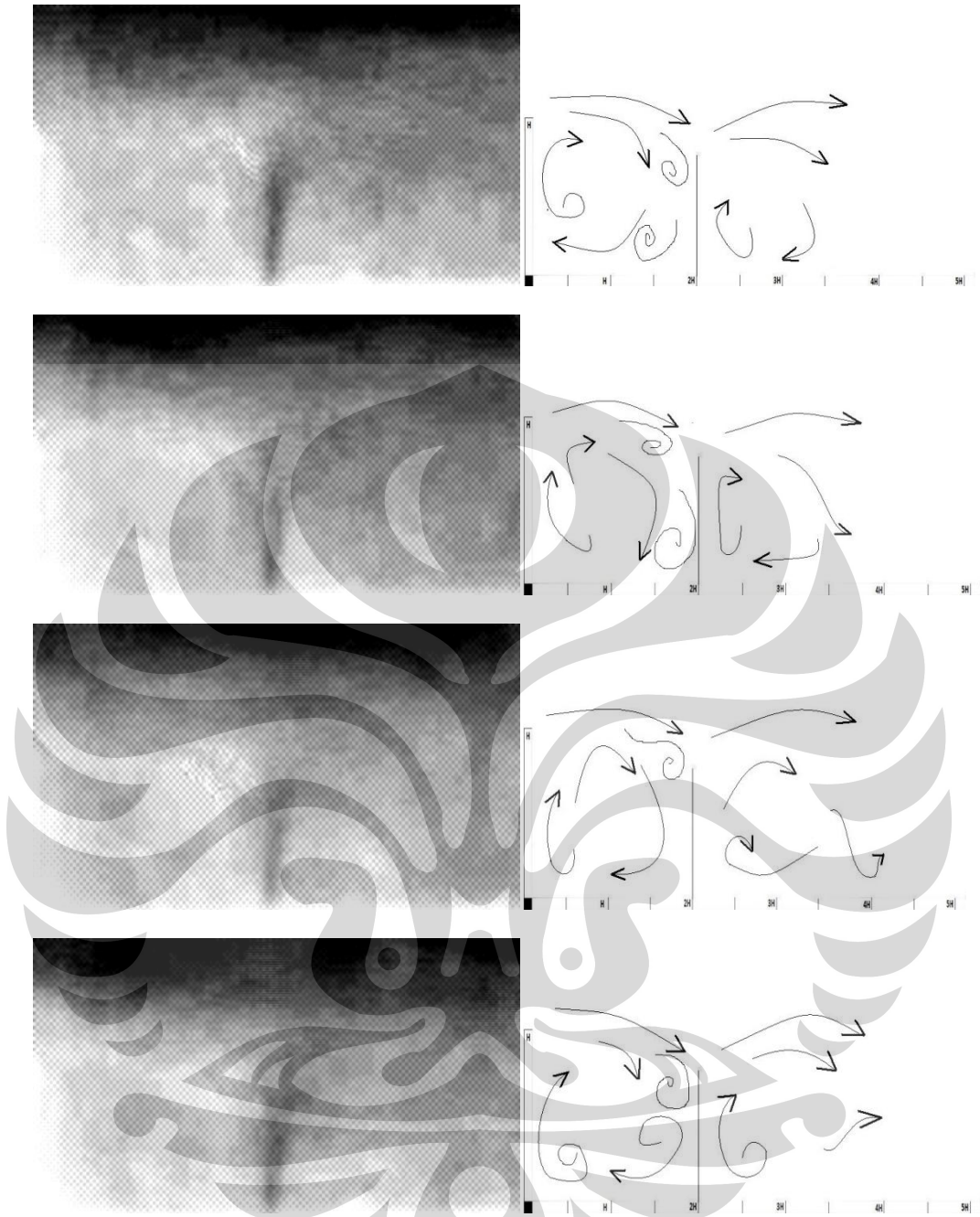




Gambar 4.2 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.1 dan temperatur 300 °C untuk tinggi *step* 20 mm

Kondisi berikutnya adalah peningkatan temperatur dari 100 °C menjadi 300 °C dengan rasio injeksi yang sama. Hasil yang hampir sama diperoleh dibandingkan pada kondisi sebelumnya dimana palung masih terbentuk pada daerah *upstream* dan daerah dengan turbulensi tinggi pada daerah *shear layer*. Selain itu, daerah pada *downstream* tetap tertutup oleh partikel aliran sehingga resirkulasi di daerah tersebut dapat dikatakan cukup kuat dan hal ini dapat dilihat pada bagian kiri rangkaian Gambar 4.2.

Hal yang membedakan antara kondisi 100 °C dan 300 °C adalah besar ruang kosong yang ditimbulkan setelah daerah injeksi. Fenomena ruang kosong ini dinamakan "*barrel effect*" dimana efek ini akan membesar pada saat temperatur injeksi ditingkatkan. Selain itu, injeksi yang dihasilkan pada mempunyai ketinggian yang lebih besar dibanding temperatur 100 °C.

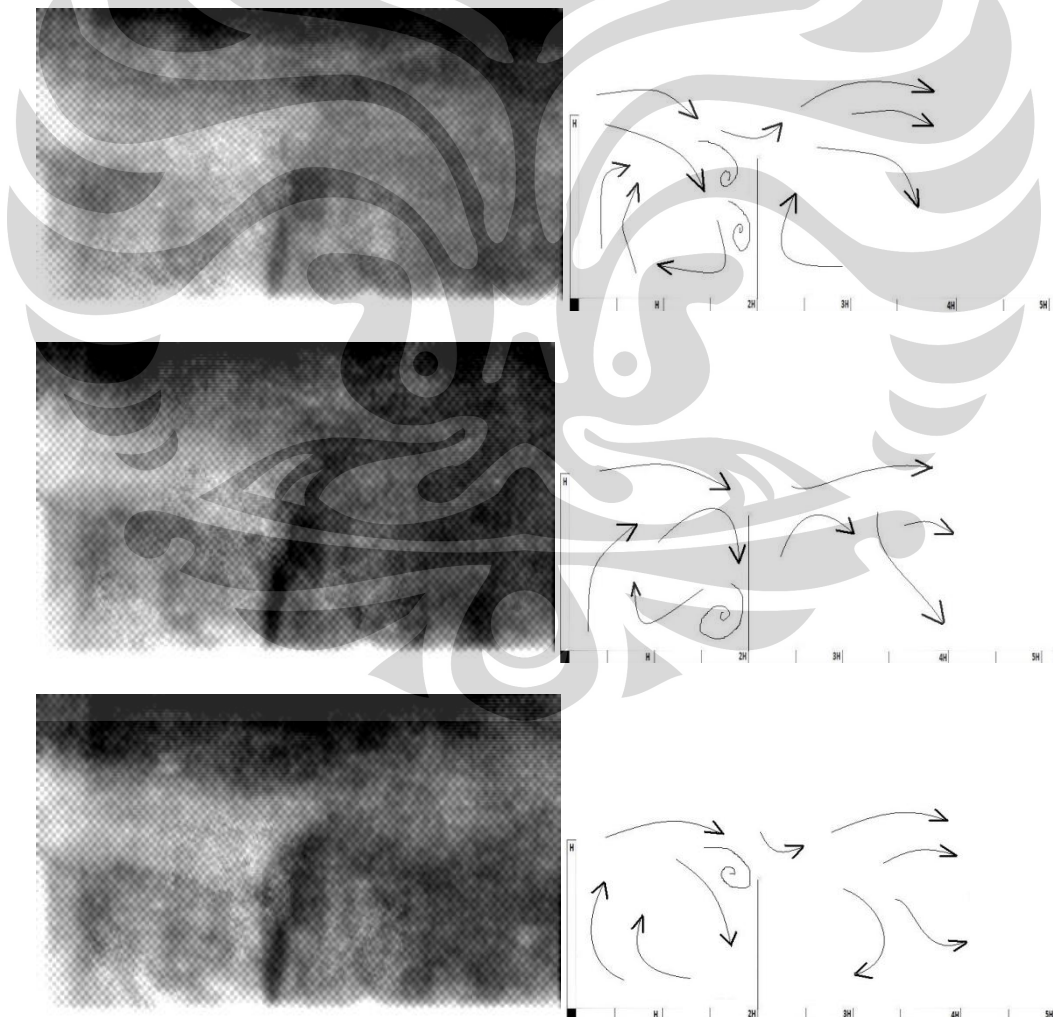


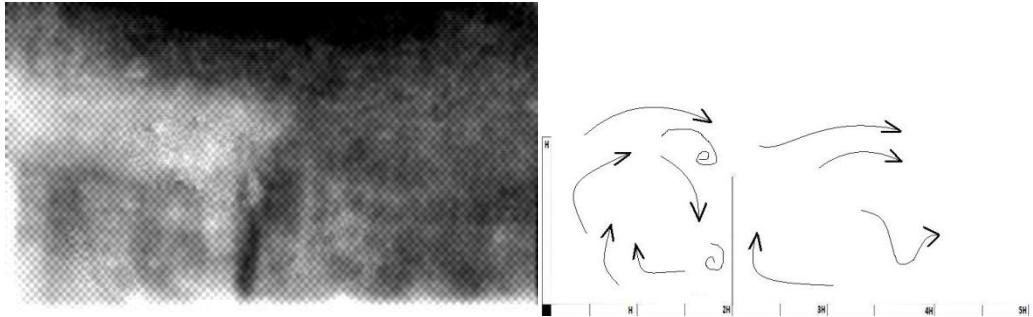
Gambar 4.3 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.5 dan temperatur 100 °C untuk tinggi *step* 20 mm

Variasi untuk analisa Gambar 4.3 menggunakan parameter rasio injeksi 0.5 dan temperatur injeksi 100°C. Untuk kondisi percobaan ini daerah yang mempunyai turbulensi paling tinggi adalah daerah resirkulasi *upstream* dimana hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.3 bahwa daerah dengan partikel paling pekat berada di daerah tersebut. Selain itu pada ilustrasi digambarkan banyak simbol rotasi pada daerah resirkulasi

upstream yang lebih menunjukkan bahwa terdapat banyak daerah turbulen pada bagian tersebut.

Untuk daerah kedua daerah *downstream* dan *upstream* dapat dikatakan bahwa kedua daerah tersebut mempunyai resirkulasi yang relatif kuat karena tidak terbentuk palung pada kedua daerah tersebut. Hal terakhir yang dapat dianalisa adalah injeksi yang lebih tegak dibandingkan rasio injeksi 0.1 sehingga mampu menembus wilayah *shear layer* dengan lebih kuat. Dengan kemampuan menembus *shear layer* lebih kuat ini, maka makin banyak partikel aliran yang menuju daerah *upstream* sehingga menyebabkan terisinya daerah tersebut dengan partikel aliran.





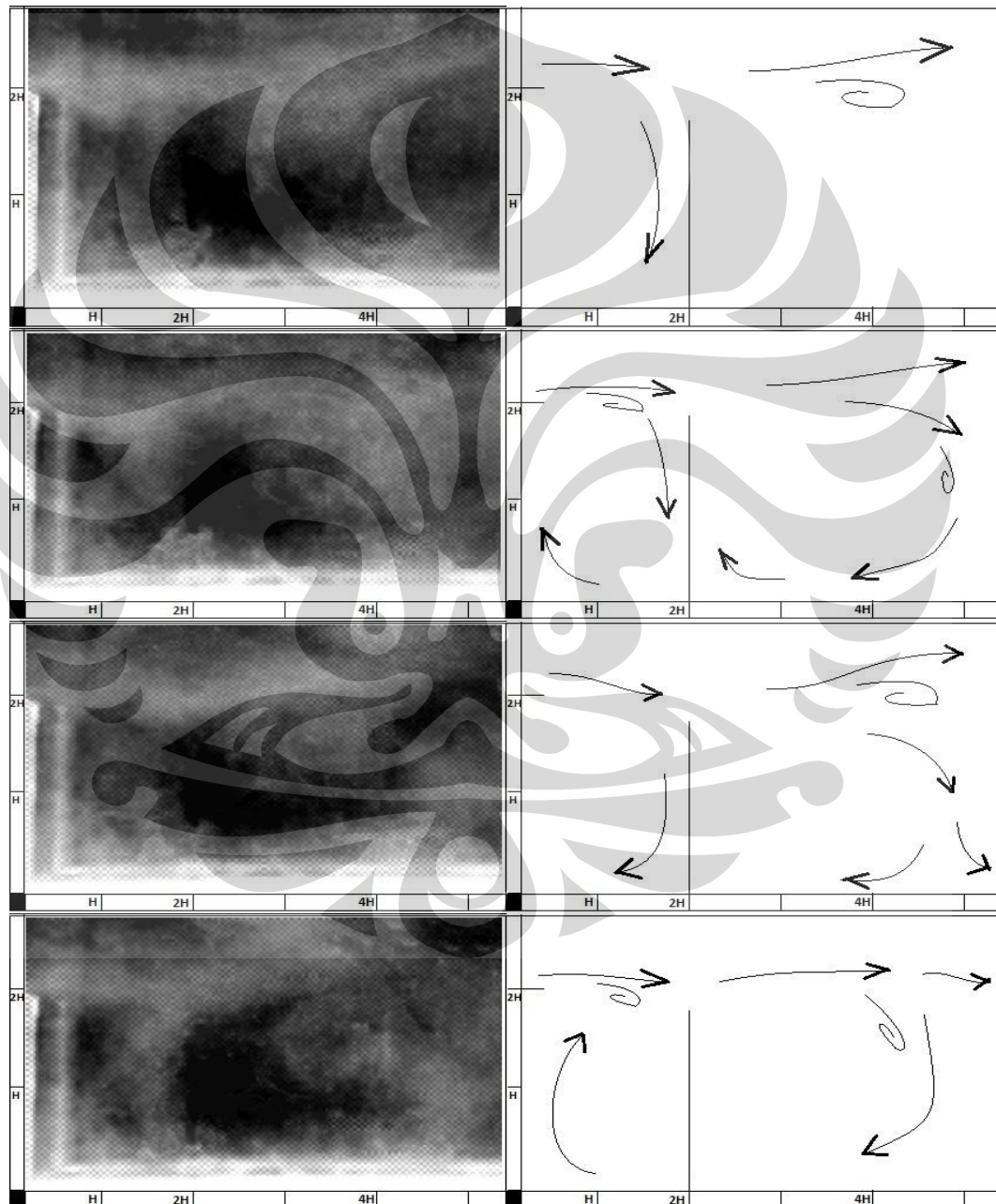
Gambar 4.4 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.5 dan temperatur 300 °C untuk tinggi *step* 20 mm

Kondisi terakhir yang dianalisa untuk ketinggian *step* 2 cm adalah kondisi rasio injeksi 0.5 dan temperatur 300 °C. Kondisi ini merupakan penggabungan dari kondisi-kondisi sebelumnya dan hasil yang ditunjukkan berbeda dibanding kondisi sebelumnya. Hal ini berdasarkan Gambar 4.4 bahwa hanya resirkulasi di daerah *upstream* saja yang masih memiliki nilai RGB yang tinggi, sedangkan pada daerah *downstream* walaupun tidak dapat dikatakan aliran resirkulasi lemah tetapi terjadi penurunan resirkulasi pada daerah tersebut. Penurunan resirkulasi ini juga ditunjukkan dengan mulai terbentuknya palung pada daerah *downstream*.

Injeksi yang digambarkan cukup tegak dan masih terdapat “*barrel effect*” yang diakibatkan oleh kenaikan temperatur injeksi. Peningkatan rasio injeksi dan temperatur ini menyebabkan penurunan resirkulasi pada daerah *downstream* dimana untuk rasio injeksi akan meningkatkan *block effect* dari injeksi, sehingga lebih banyak aliran separasi yang akan menuju daerah *upstream* dibanding menuju *downstream*. Sedangkan kenaikan temperatur yang menghasilkan “*barrel effect*” akan mengurangi daerah *downstream* sehingga akan mengurangi resirkulasi pada daerah tersebut secara langsung.

IV.1.2 Ketinggian *step* 40 mm

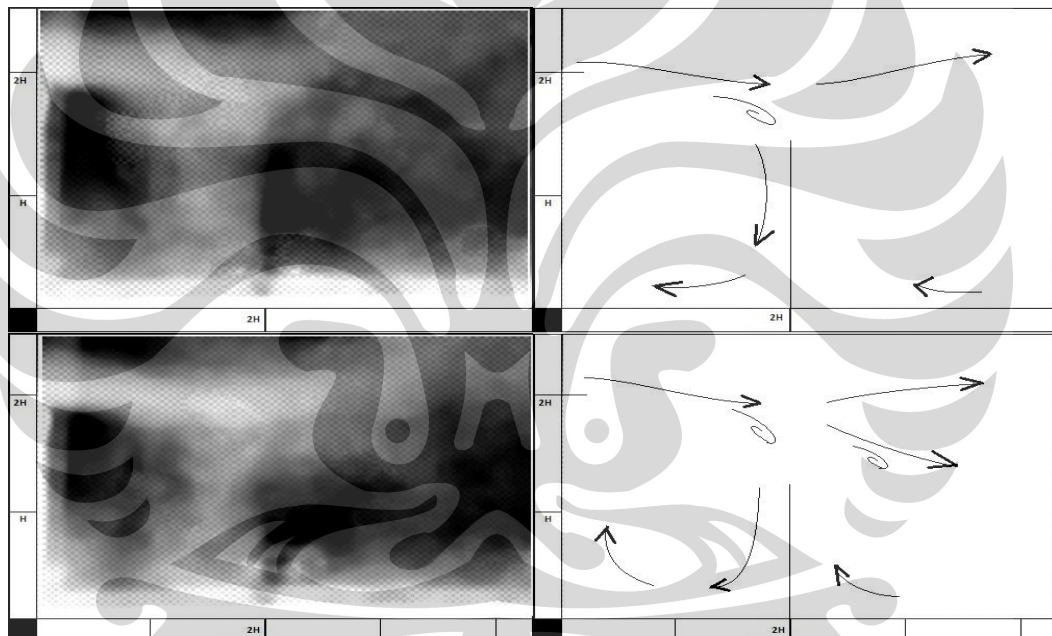
Perubahan pada ketinggian *step* diharapkan memberi hasil yang berbeda dengan variasi kondisi eksperimental lainnya seperti temperatur dan rasio injeksi yang sama. Analisa akan diawali seperti untuk kondisi ketinggian *step* 20 mm yaitu kondisi temperatur 100 °C dan rasio injeksi 0.1.

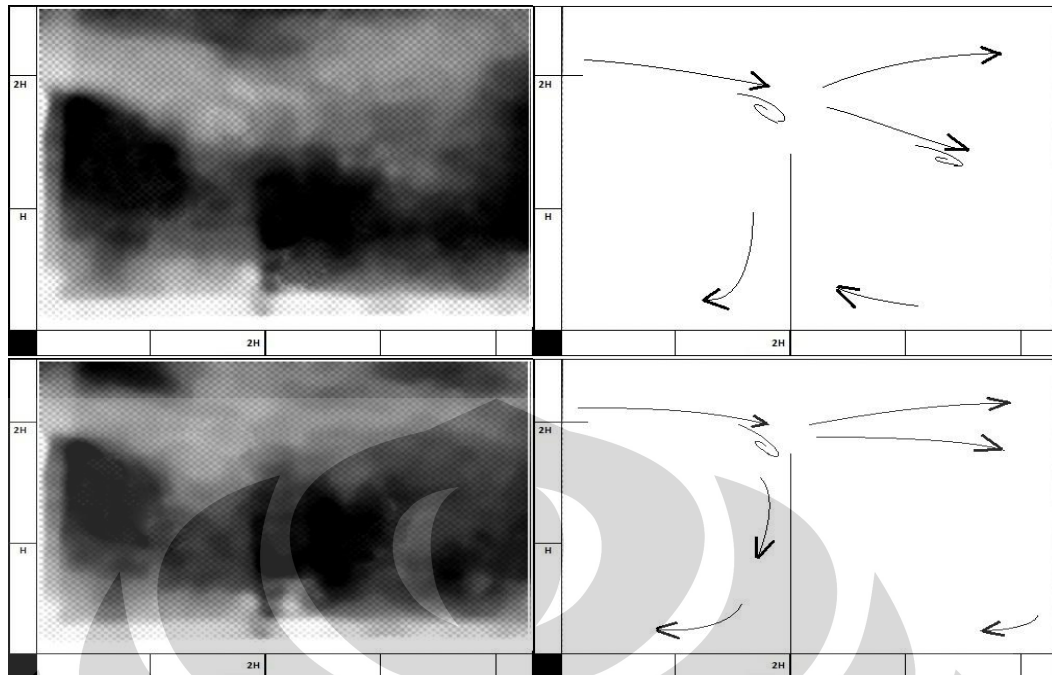


Gambar 4.5 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.1 dan temperatur 100 °C untuk tinggi *step* 40 mm

Analisa yang dapat dilakukan dengan acuan Gambar 4.5 dimana terlihat jelas bahwa tingkat turbulensi untuk hampir semua daerah tergolong rendah. Namun, dengan menganalisa Gambar 4.5 dapat dilihat bahwa terdapat aliran resirkulasi pada daerah *upstream* dan *downstream* dimana diantara kedua daerah tersebut, berdasarkan ukuran palung yang terbentuk maka daerah *upstream* mempunyai resirkulasi yang lebih kuat.

Bentuk injeksi yang dihasilkan cukup tegak dan hal ini berbeda dengan kondisi pada saat ketinggian *step* sebesar H . Hal ini menunjukkan bahwa *block effect* terdapat pada injeksi gas panas yang ada.



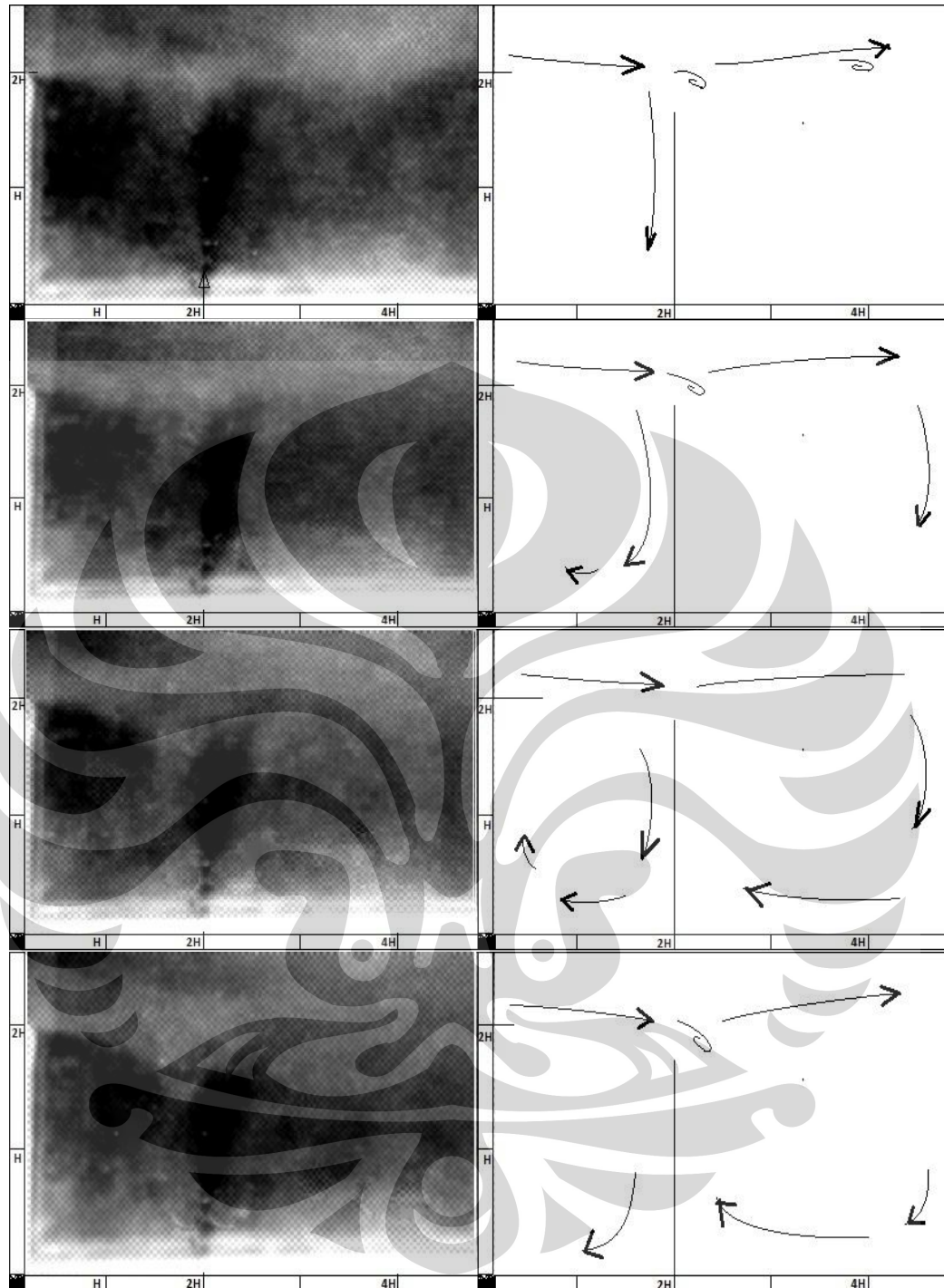


Gambar 4.6 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.1 dan temperatur 300 °C untuk tinggi *step* 40 mm

Peningkatan temperatur pada ketinggian *step* 40 mm menunjukkan hasil yang sama seperti ketinggian *step* 20 mm dimana *barrel effect* yang diciptakan menjadi lebih besar dibandingkan pada kondisi injeksi temperatur 100 °C. Hal ini mengakibatkan aliran resirkulasi pada daerah *downstream* menjadi lebih rendah dengan membesarnya palung pada daerah tersebut. Untuk daerah *upstream* mempunyai palung yang besar dimana hal ini menandakan kedua daerah *upstream* dan *downstream* mempunyai daerah resirkulasi yang lemah.

Untuk tingkat turbulensi, daerah yang mempunyai nilai tertinggi adalah daerah *shear layer* dan hal ini digambarkan pada ilustrasi pada Gambar 4.6 untuk semua urutan gambar yang diberikan.

Mengenai injeksi gas panas yang dihasilkan, efek yang diberikan dari temperatur tidak banyak dan bahkan terlihat tidak berubah dari segi ketinggian injeksi walaupun injeksi yang dihasilkan cukup tegak dibandingkan injeksi pada kondisi temperatur 100 °C.



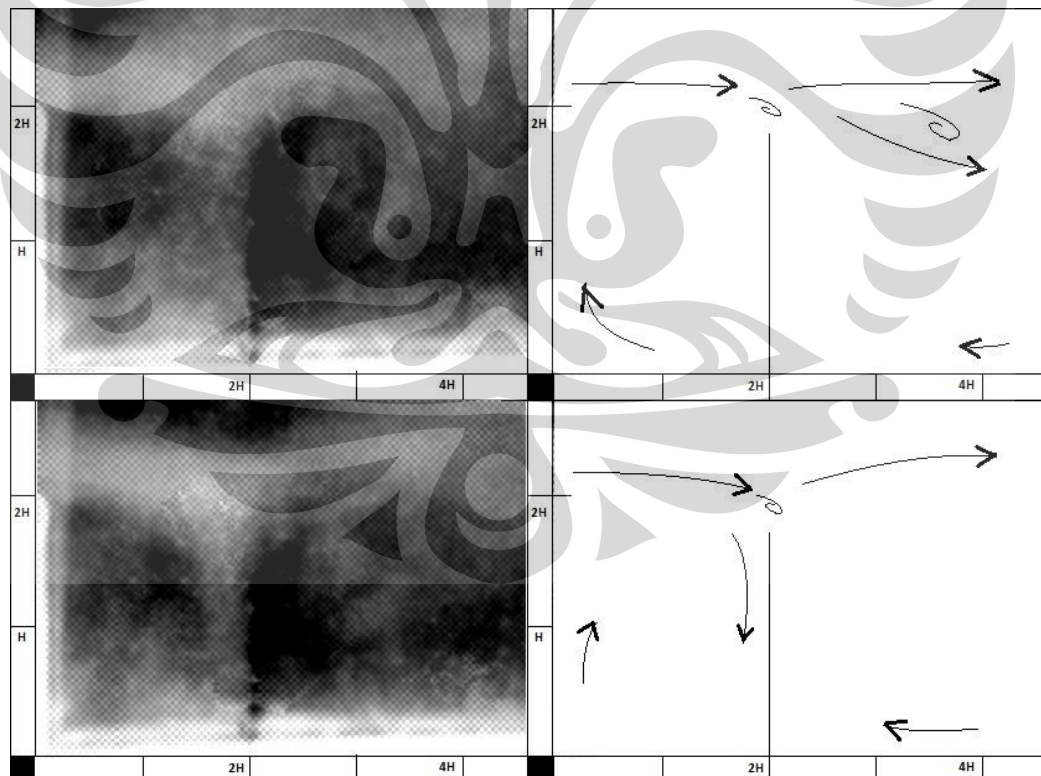
Gambar 4.7 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.5 dan temperatur 100 °C untuk tinggi *step* 40 mm

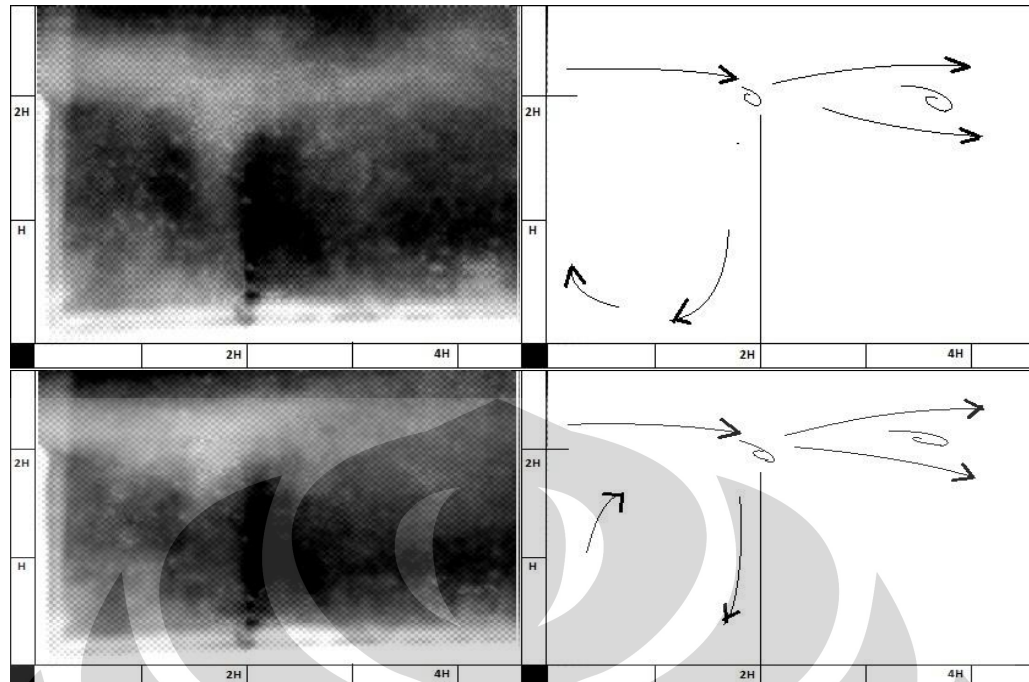
Analisa kondisi ketiga untuk ketinggian *step* 40 mm ini mempunyai beberapa hasil yang sama seperti kondisi sebelumnya diantaranya adalah terbentuknya palung pada bagian *upstream* yang menunjukkan bahwa resirkulasi pada bagian tersebut relatif lemah. Pada

bagian *downstream* menunjukkan bahwa palung yang terbentuk hanya sedikit dan dapat dikatakan bahwa resirkulasi pada bagian ini cukup kuat.

Untuk tingkat turbulensi, walaupun tidak setinggi kondisi ketinggian *step* H daerah *downstream* mempunyai daerah turbulensi yang cukup tinggi dibandingkan daerah-daerah lain seperti *upstream* atau daerah *shear layer*. Berdasarkan ilustrasi, turbulensi ini juga tidak selalu ada dia=karenakan kepekatan partikel aliran yang fluktuatif.

Pada bagian eksitasi eksternal, injeksi yang dihasilkan lebih tegak dibandingkan rasio injeksi 0.1 walaupun kurang terlihat secara langsung. Hal ini menunjukkan bahwa *block effect* untuk kondisi ini lebih besar dibandingkan kedua kondisi sebelumnya yang mempunyai rasio injeksi 0.1.





Gambar 4.8 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.5 dan temperatur 300 °C untuk tinggi *step* 40 mm

Bagian analisa kualitatif terakhir adalah kondisi rasio injeksi 0.5 dan temperatur 300 °C. Pada Gambar 4.8 ditunjukkan bahwa tingkat turbulensi yang ada lebih besar dibandingkan kondisi lain untuk ketinggian *step* 40 mm. Dimana tingkat turbulensi tertinggi pada kondisi ini berada pada daerah *shear layer* dimana partikel aliran cukup pekat pada daerah ini. Daerah berikutnya yang juga mempunyai turbulensi tinggi adalah daerah *downstream* walaupun tidak selalu mempunyai nilai yang tinggi.

Mengenai kekuatan resirkulasi dari *upstream* dan *downstream* aliran ini, dapat dilihat bahwa pada bagian *downstream* mempunyai palung yang besar sedangkan *upstream* mempunyai palung yang kecil. Hal ini menunjukkan bahwa resirkulasi di daerah *upstream* cukup kuat sedangkan di daerah *downstream* cukup lemah.

Injeksi yang dihasilkan cukup tegak yang menunjukkan bahwa *block effect* pada kondisi ini cukup besar dibandingkan kondisi lainnya dengan rasio injeksi 0.1. Selain itu, efek temperatur terlihat pada *barrel effect* yang terbentuk pada bagian belakang titik injeksi yang mempunyai

daerah kosong yang besar dibandingkan kondisi temperatur injeksi 100 °C. Gabungan kedua efek ini menghasilkan fenomena yang kurang lebih sama dengan kondisi *step* 20 mm , dimana resirkulasi pada bagian *downstream* akan mengecil dan pada bagian *upstream* akan membesar.

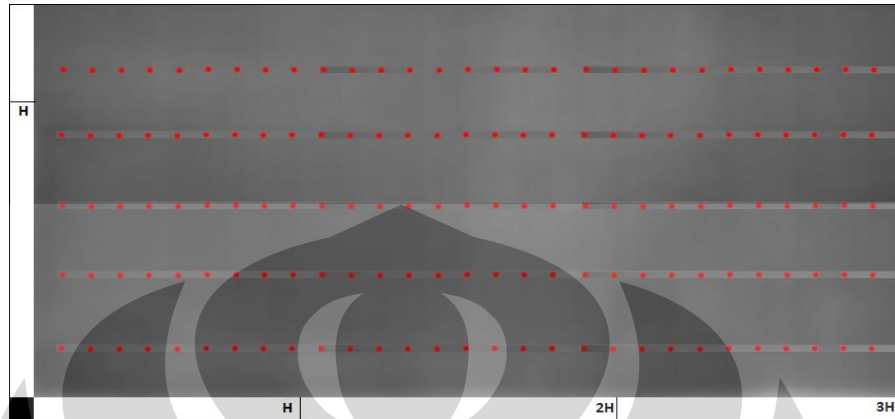
4.2 Analisa Kuantitatif

Analisa ini mempunyai tujuan untuk mendapatkan karakteristik aliran pada geometri *backward-facing* berdasarkan angka RGB pada mode *grayscale* atau mode warna hitam-putih, dimana hal ini dimaksudkan agar memperoleh tingkat kecerahan atau keredupan partikel analisa pada aliran.

Metode yang digunakan untuk analisa kuantitatif ini berdasarkan pengambilan nilai RGB yang sudah didapatkan melalui *image processing* dimana proses ini sudah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Pengambilan nilai RGB ini ditentukan posisinya melalui penyekalaan dari gambar digital terhadap panjang asli dari alat eksperimental. Untuk analisa kuantitatif ini digunakan pengambilan titik data RGB untuk tiap 2 mm ukuran asli dengan sumbu x positif, sehingga setelah kalibrasi ukuran asli dengan ukuran pada citra berupa *pixel* akan didapatkan posisi titik yang akan diambil datanya. Untuk sumbu y positif , digunakan metode jumlah baris yang konstan yaitu sebanyak 5 baris. Karena metode tersebut , maka ketinggian antar baris untuk tiap citra dapat bervariasi bergantung pada ukuran *cropping* citra tersebut dalam langkah *image processing*.

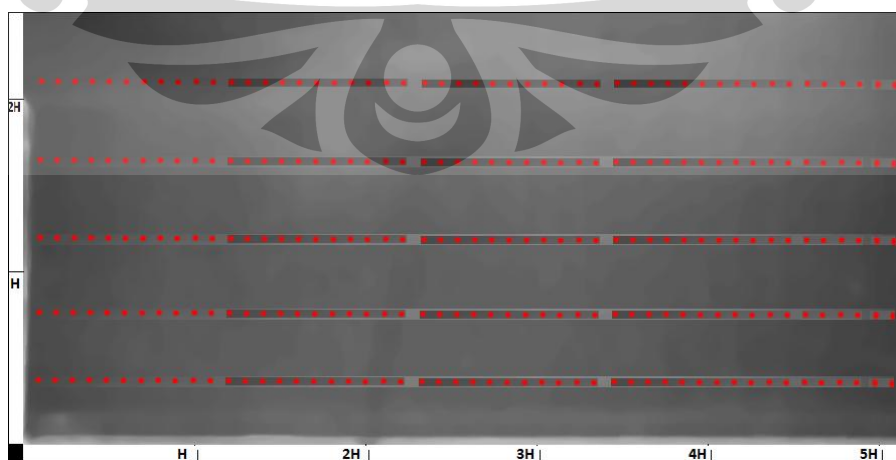
Dengan kedua informasi tersebut dan ukuran rata-rata citra sebesar 1000 x 400 pixel, maka akan didapatkan kurang lebih 250 data untuk satu citra. Ketelitian ini dianggap cukup untuk mewakili persebaran RGB pada suatu gambar. Terlebih digunakan 100 *sample* citra yang digunakan untuk mendapatkan data yang valid. Setelah mendapatkan semua data dari 100 citra tersebut, nilai RGB yang didapatkan kemudian dirata-ratakan sehingga nilai *average* merupakan nilai akhir yang digunakan untuk analisa kuantitatif.

Berikut adalah ilustrasi dari 2 jenis koordinat pengambilan data yang digunakan untuk analisa kuantitatif yaitu kondisi ketinggian H (20 mm) dan 2H (40 mm) :



Gambar 4.9 Koordinat akuisisi data citra kondisi ketinggian *step* 20 mm

Penyekalaan pada Gambar 4.9 adalah untuk kondisi dengan ketinggian *step* sebesar 20 mm. Pada penyekalaan ini digunakan jarak antar titik searah sumbu x positif sebesar 2 mm ukuran asli sedangkan untuk arah sumbu y positif menggunakan metode 5 baris dan jarak antara baris sudah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Baris pertama adalah baris titik yang posisinya teratas, deret berikutnya baris ke-2 dan seterusnya hingga baris ke-5 pada bagian terdekat dengan dasar plat *test section*. Pada analisa ini baris pertama akan diberi koordinat $y = 1$, dan seterusnya hingga $y = 5$. Dimana $y(1) = 4.4$ mm, $y(2) = 8.8$ mm, $y(3) = 13.2$ mm, $y(4) = 17.6$ mm, dan $y(5) = 22$ mm



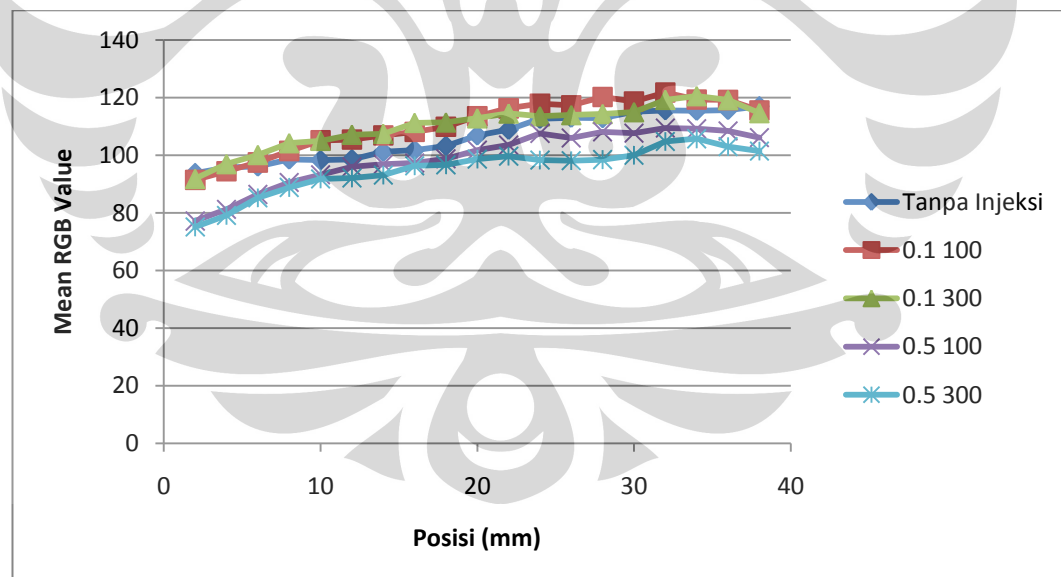
Gambar 4.10 Koordinat akuisisi data citra kondisi ketinggian *step* 40 mm

Gambar 4.10 menggambarkan penyekalaan untuk kondisi ketinggian *step* sebesar 40 mm. Prinsip yang digunakan untuk memberi posisi titik pengambilan data sama dengan kondisi *step* 20 mm, sehingga menghasilkan koordinat $y(1) = 8.2$ mm, $y(2) = 16.4$ mm, $y(3) = 24.6$ mm, $y(4) = 32.8$ mm, dan $y(5) = 41$ mm.

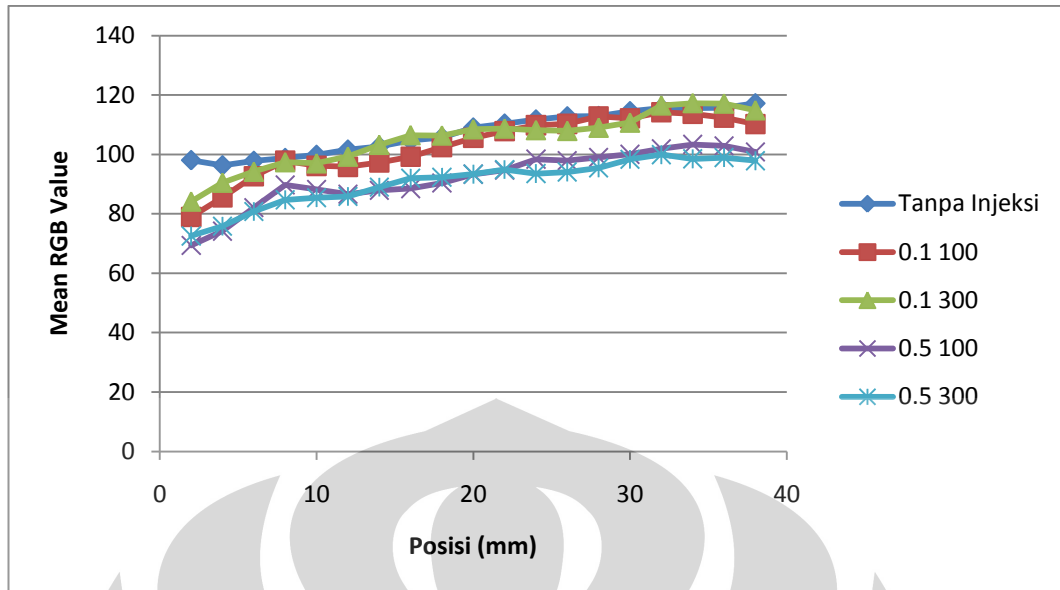
Analisa kuantitatif ini dilakukan pada dua bagian berbeda yaitu daerah *upstream* (daerah sebelum titik injeksi) dan daerah *downstream* (daerah setelah titik injeksi). Atas dasar metode ini, maka semua analisa akan berdasarkan kedua daerah ini.

4.2.1 Ketinggian *step* 20 mm

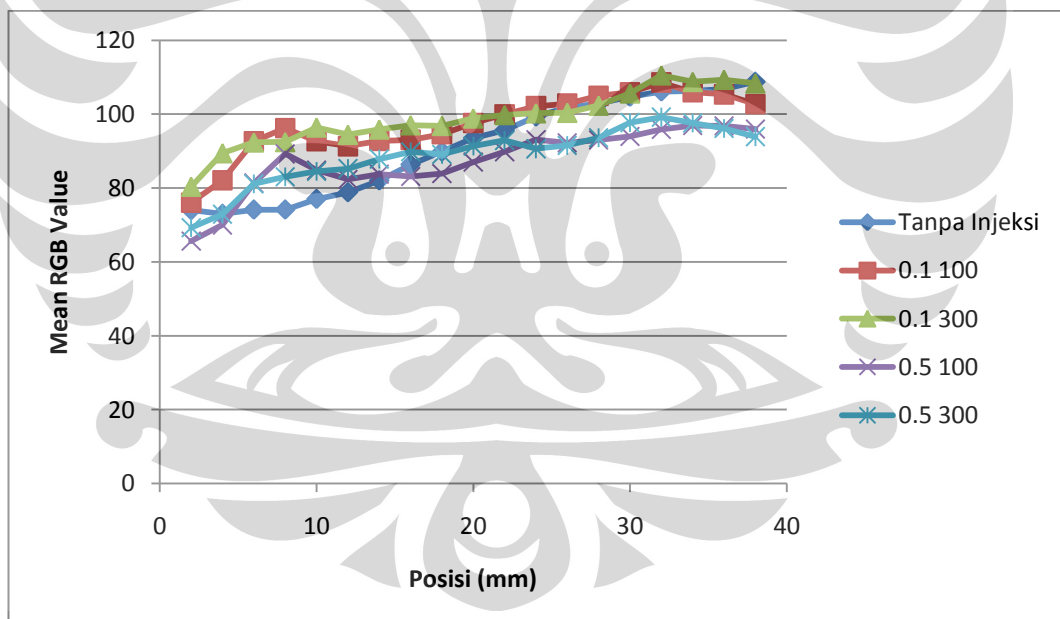
Data RGB akhir yang berupa data rata-rata dari 100 *sample* yang telah didapatkan kemudian dikelompokkan berdasarkan ketinggian dan akhirnya semua kondisi injeksi dibandingkan dengan kondisi pada saat tidak diberikan injeksi gas panas.



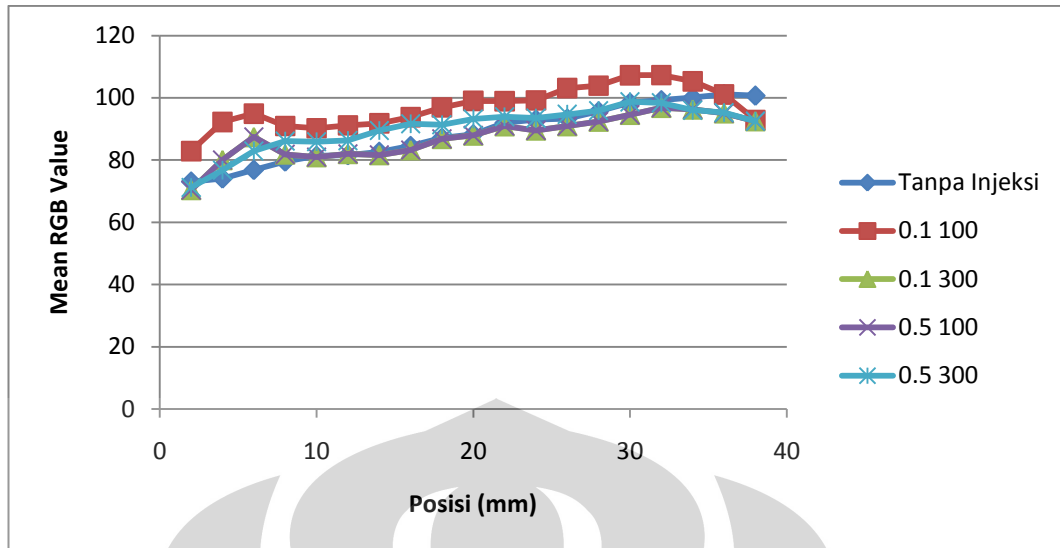
Gambar 4.11 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* $y=1$ pertama dengan tinggi *step* 20 mm



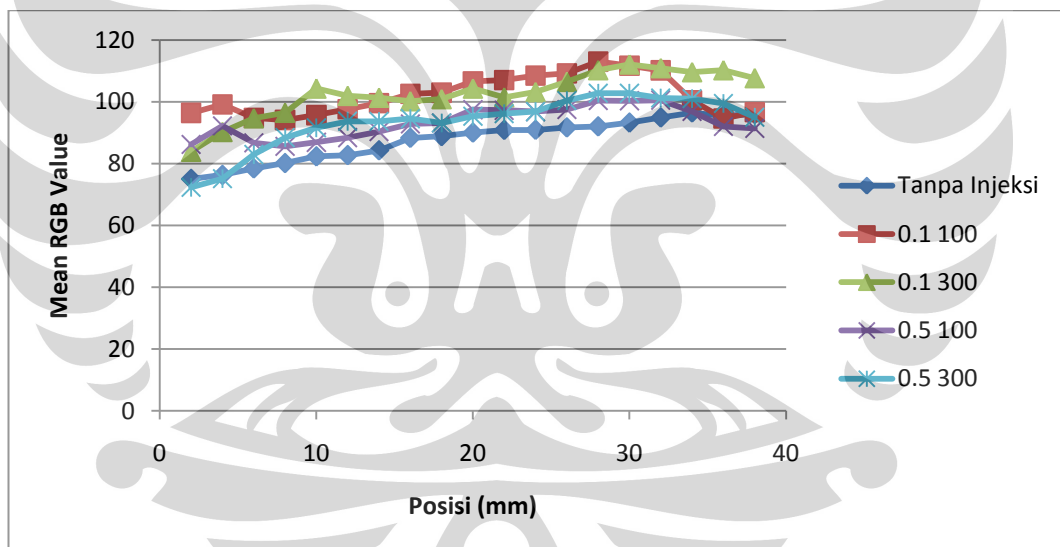
Gambar 4.12 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* $y=2$ dengan tinggi *step* 20 mm



Gambar 4.13 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* $y=3$ dengan tinggi *step* 20 mm



Gambar 4.14 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* $y=4$ dengan tinggi *step* 20 mm



Gambar 4.15 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* $y=5$ dengan tinggi *step* 20 mm

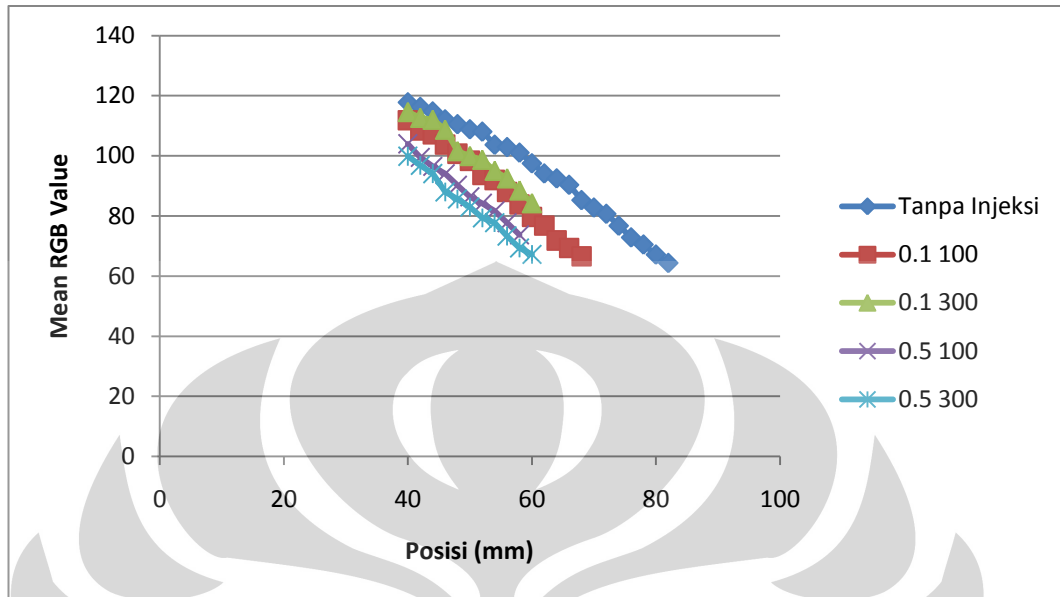
Pada kelima urutan gambar diatas yang menjelaskan mengenai grafik nilai RGB pada daerah *upstream*, dimulai pada $y=1$ dimana dari titik 1 hingga 39 menunjukkan pola meningkat untuk semua kondisi baik dengan ataupun tanpa injeksi. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi partikel seiring berjalannya sesuai arah sumbu x positif akan mengalami

peningkatan. Pada data koordinat $y=1$ ini ditunjukkan bahwa kondisi rasio injeksi memiliki nilai yang lebih tinggi dibanding kondisi tanpa injeksi dan kondisi rasio injeksi memiliki nilai yang lebih rendah dibanding kedua kondisi sebelumnya. Hal ini dikarenakan pada kondisi rasio injeksi 0.5, *block effect* yang dihasilkan oleh injeksi akan lebih besar dan menghasilkan tinggi injeksi yang lebih besar. Hal ini akan mengakibatkan partikel pada $y=1$ terhalang dan bergerak menuju daerah *upstream* sehingga konsentrasi partikel akan berkurang. Hal sebaliknya terjadi pada rasio injeksi 0.1, dimana injeksi diberikan tidak tinggi dan akan menambah partikel pada $y=1$ dan karena momentum *free stream* yang tinggi akan menghasilkan penyebaran merata menuju *upstream* dan daerah *downstream*, tidak seperti aliran tanpa injeksi dimana aliran akan mengalir bebas sehingga partikel akan tersebar, walaupun partikelnya tidak berkurang sebesar rasio 0.5. Grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 4.11 menjelaskan penjelasan yang diberikan.

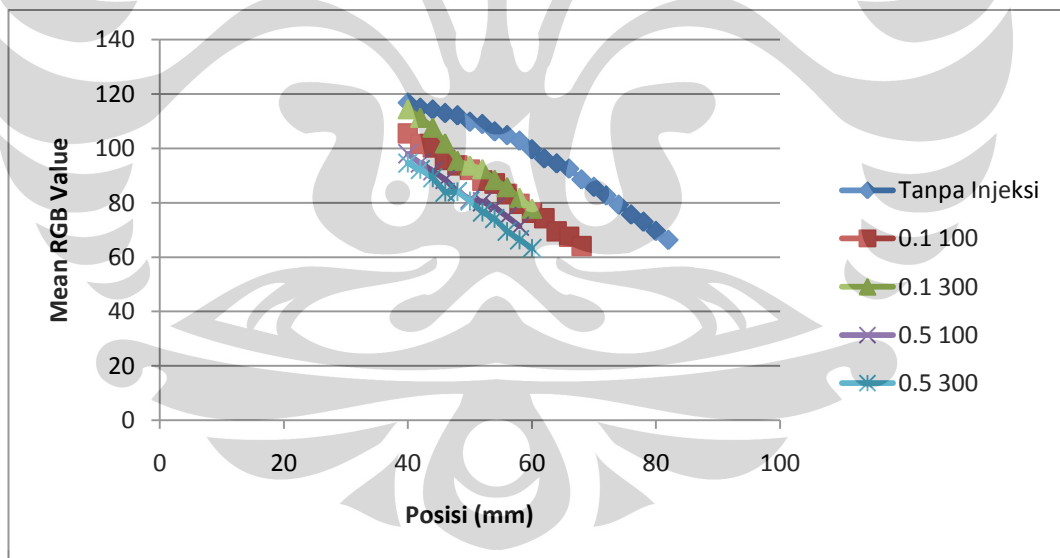
Kondisi pada $y=2$ hingga $y=5$ mendukung pernyataan sebelumnya, dimana kondisi tanpa injeksi mempunyai nilai yang cenderung stabil, sedangkan kondisi 0.1 menurun nilai konsentrasi partikelnya setelah *shear layer* terbelah oleh injeksi. Pada $y=3$ terdapat peningkatan nilai RGB pada jarak kurang lebih 9 mm, hal ini menunjukkan adanya kepekatatan partikel yang lebih tinggi kemudian menurun kembali yang menunjukkan adanya resirkulasi pada daerah tersebut. Pada grafik ketiga pada Gambar 4.13 ini rasio 0.5 mempunyai nilai RGB yang lebih tinggi dibandingkan kondisi tanpa injeksi. Hal ini menunjukkan bahwa sebaran partikel di daerah *upstream* lebih rata.

Koordinat $y=4$ pada Gambar 4.14 lebih menunjukkan bahwa sebaran pada daerah *upstream* lebih rata dimana 2 kondisi dengan rasio 0.5 mempunyai nilai umum RGB yang lebih tinggi dibanding salah satu kondisi rasio injeksi 0.1. Data koordinat berikutnya menunjukkan sebaran yang lebih fluktuatif, namun kondisi rasio 0.1 mempunyai nilai tertinggi

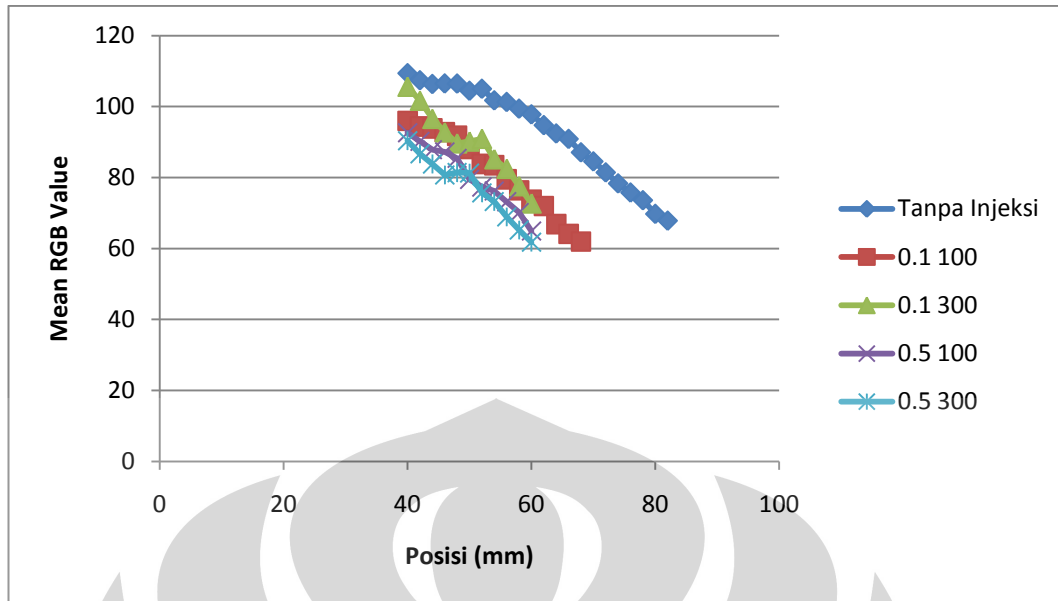
dikarenakan sebaran yang terjadi akibat pemisahan *shear layer* lebih merata menuju *upstream* dan *downstream*.



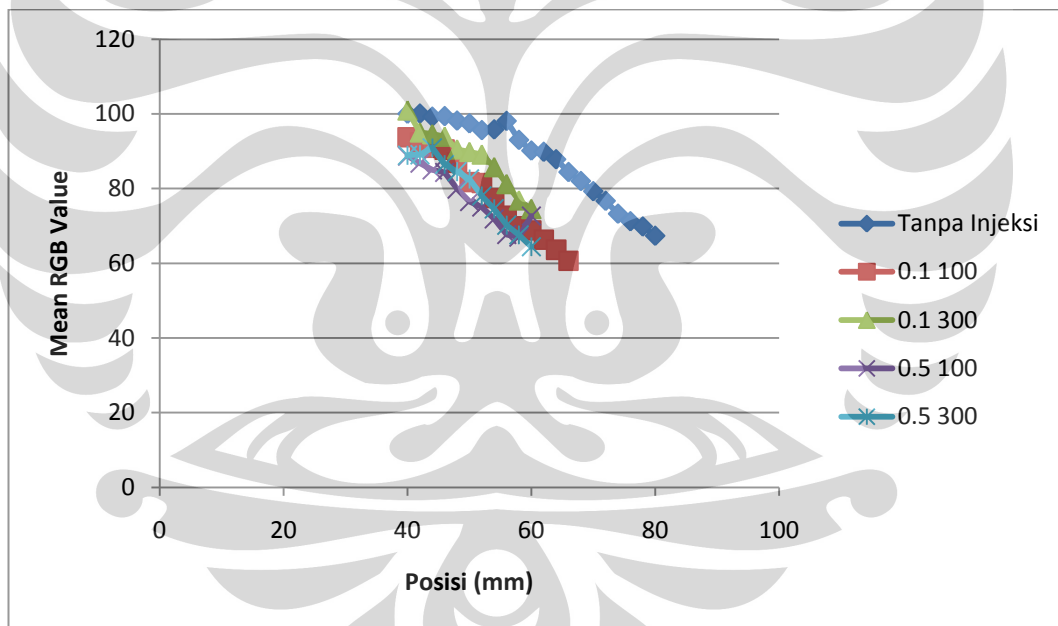
Gambar 4.16 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* $y=1$ dengan tinggi *step* 20 mm



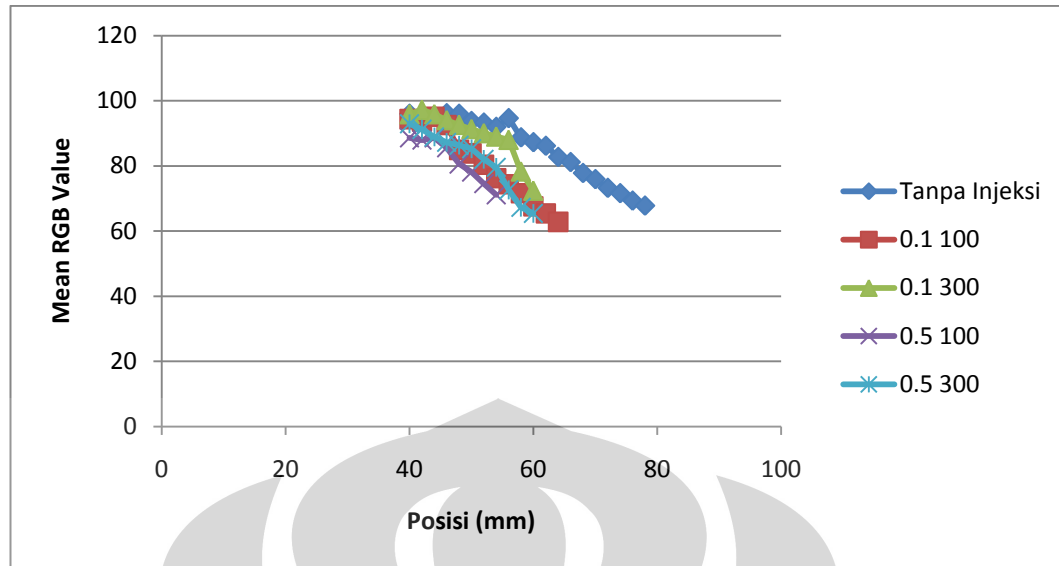
Gambar 4.17 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* $y=2$ dengan tinggi *step* 20 mm



Gambar 4.18 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* $y=3$ dengan tinggi *step* 20 mm



Gambar 4.19 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* $y=4$ dengan tinggi *step* 20 mm

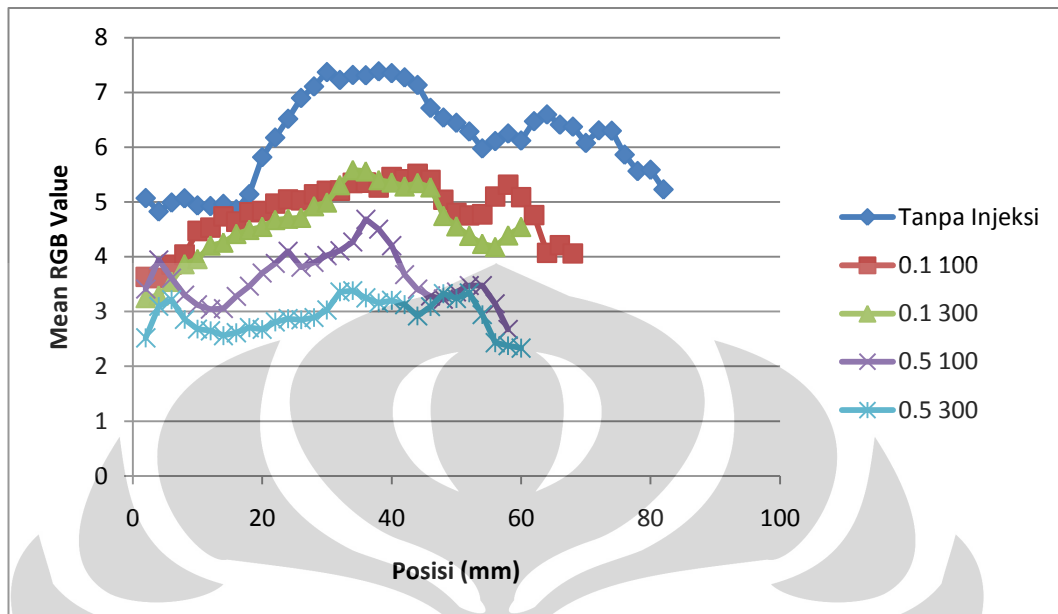


Gambar 4.20 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* $y=5$ dengan tinggi *step* 20 mm

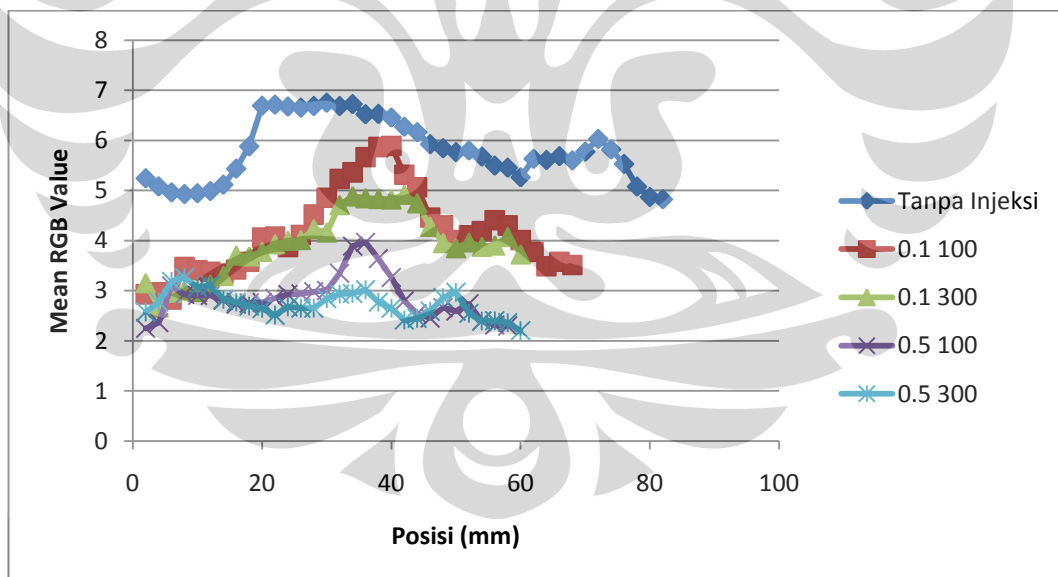
Sedangkan untuk grafik *downstream* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.16 hingga 4.20 mempunyai karakteristik yang berbeda, dimana untuk semua grafik ini kondisi tanpa injeksi mempunyai nilai RGB / kepekatan partikel yang paling tinggi. Hal ini dikarenakan tidak adanya halangan dari luar sehingga *shear layer* yang terbentuk setelah melewati *step* akan terus terkumpul dan terpecah secara lambat. Lapisan yang terpecah lambat itu akan mempunyai kepekatan yang mengalami peredupan lambat pula. Hal ini berbeda dibandingkan kondisi dengan injeksi, dimana untuk rasio 0.5 sebaran belahan *shear layer* sudah dihalangi dinding injeksi menuju daerah *upstream* dan hanya sebagian yang mengalir menuju daerah *downstream*. Hal ini ditunjukkan dengan nilai yang terendah antara 60 hingga 80, namun kepekatan untuk kondisi 0.5 tergolong rata pada daerah *downstream* karena nilai ini dipertahankan untuk kelima posisi yang ada.

Untuk injeksi dengan rasio 0.1, nilai RGB yang mengalami penurunan menunjukkan bahwa pada daerah *downstream* kepekatannya tidak konstan seperti rasio 0.5 namun memiliki konsentrasi partikel yang lebih besar. Namun karena partikelnya sudah tersebar menuju berbagai

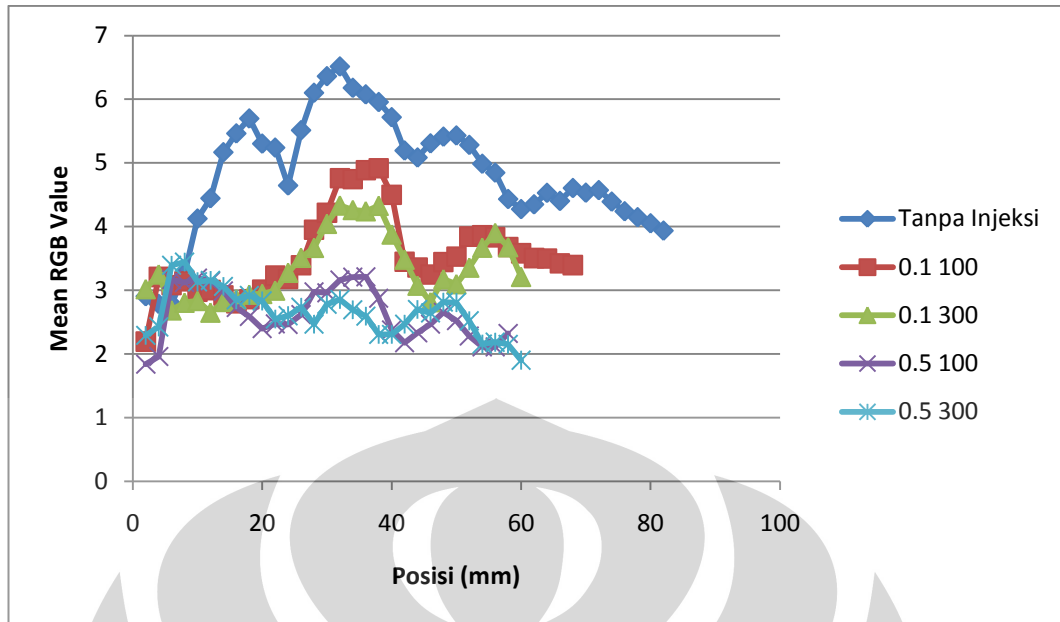
macam arah, nilai kepekatan ini tidak dapat sebesar nilai kepekatan kondisi tanpa injeksi.



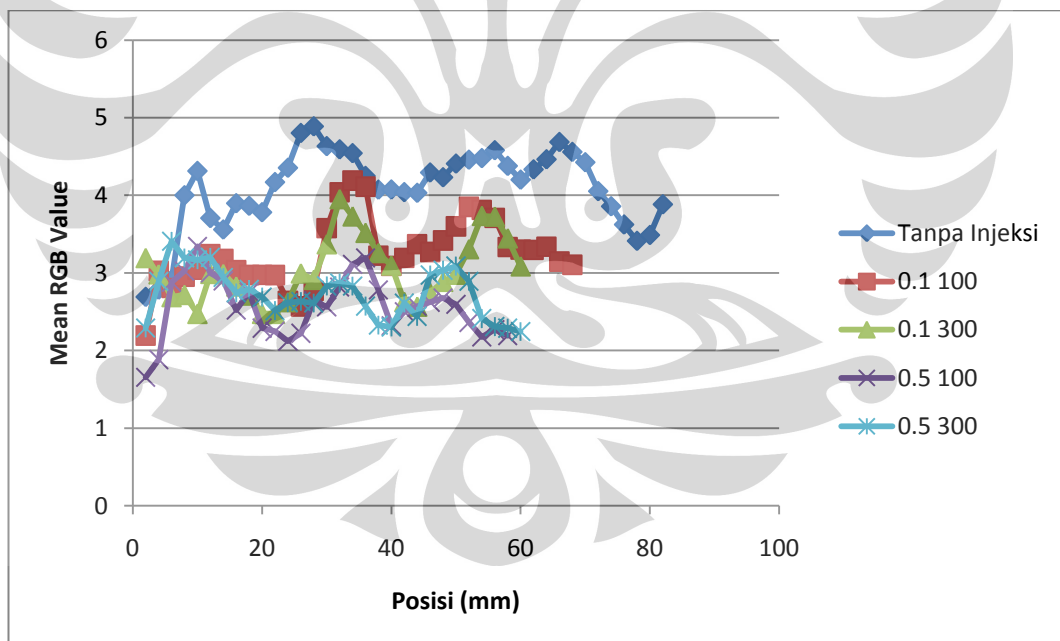
Gambar 4.21 Grafik standar deviasi kondisi dengan dan tanpa injeksi pada $y=1$ untuk ketinggian *step* 20 mm



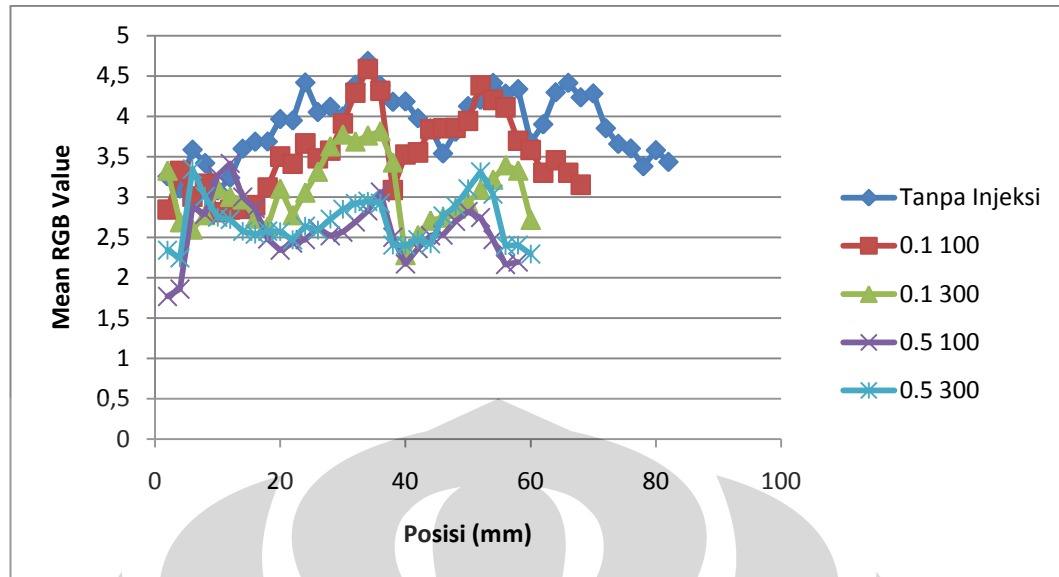
Gambar 4.22 Grafik standar deviasi kondisi dengan dan tanpa injeksi pada $y=2$ untuk ketinggian *step* 20 mm



Gambar 4.23 Grafik standar deviasi kondisi dengan dan tanpa injeksi pada $y=3$ untuk ketinggian *step* 20 mm



Gambar 4.24 Grafik standar deviasi kondisi dengan dan tanpa injeksi pada $y=4$ untuk ketinggian *step* 20 mm

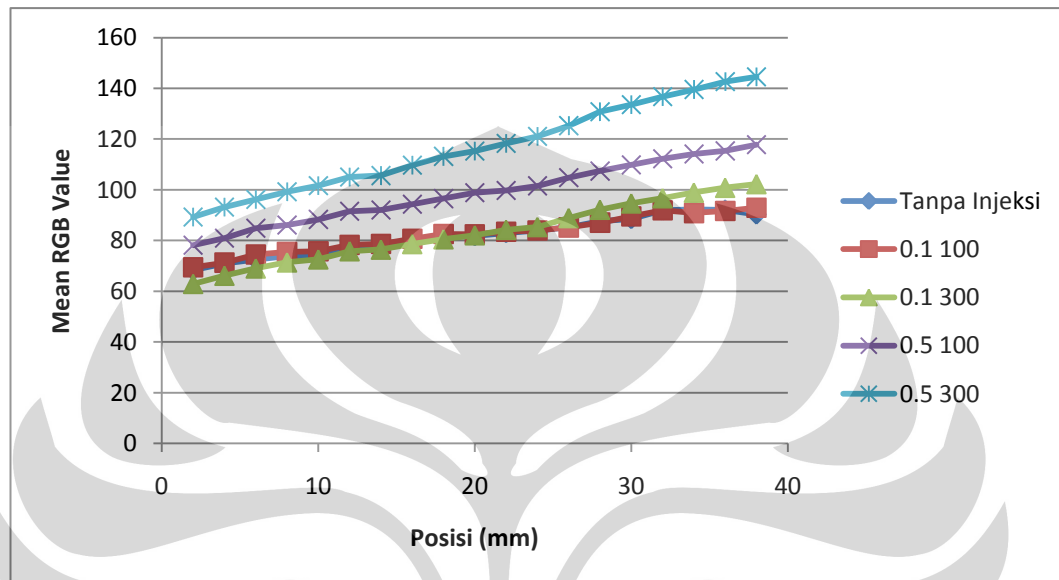


Gambar 4.25 Grafik standar deviasi kondisi dengan dan tanpa injeksi pada $y=5$ untuk ketinggian *step* 20 mm

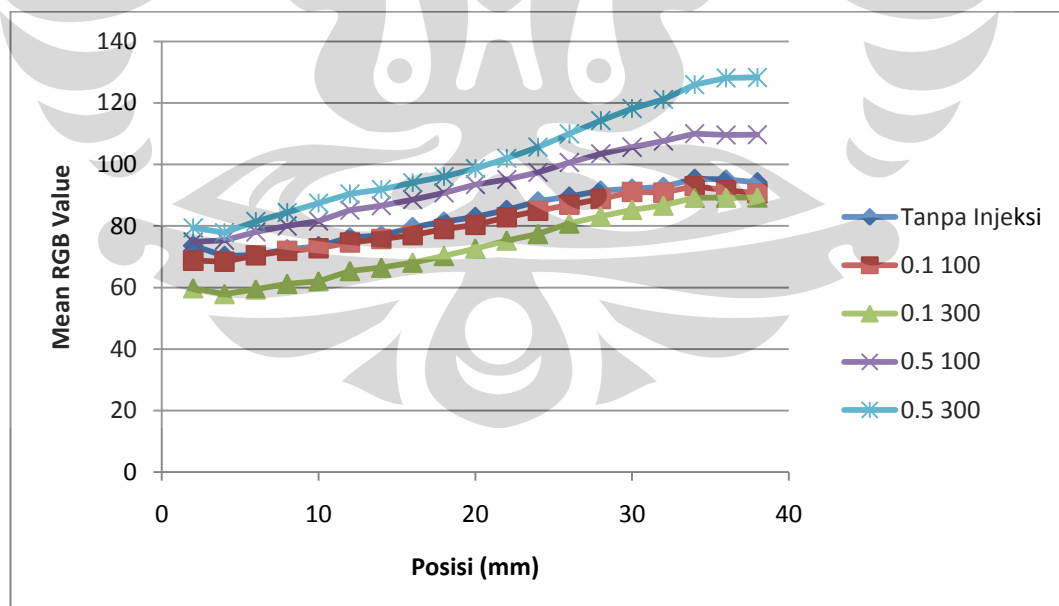
Pada Gambar 4.21 hingga 4.25 terdapat grafik standar deviasi untuk kondisi tanpa injeksi maupun kondisi injeksi dengan berbagai macam parameter seperti temperatur dan rasio injeksi. Kelima grafik ini berbeda dengan grafik analisa sebelumnya dimana jarak pada *backward-facing step* tidak terbagi menjadi *upstream* dan *downstream*. Pada kelima kelima grafik tersebut hal yang paling terlihat adalah kondisi tanpa injeksi memiliki standar deviasi terbesar walaupun nilainya menurun seiring semakin mendekatnya terhadap dinding dasar geometri. Hal ini disebabkan oleh tidak adanya sistem kontrol aktif pada aliran bebas tersebut sehingga sebaran yang dihasilkan oleh aliran tanpa injeksi akan lebih besar untuk berbagai posisi titik pengambilan data. Aliran tanpa injeksi mengalami standar deviasi yang lebih rendah dibanding tanpa injeksi karena aliran yang dihasilkan efek eksitasi eksternal tidak akan mengalami perubahan yang jauh dibandingkan aliran bebas dimana partikel aliran dapat bergerak bebas dan acak. Dengan adanya eksitasi eksternal, gerakan partikel akan terarah, seperti aliran yang tertahan dinding injeksi akan mengalami resirkulasi di daerah *upstream* dan hal ini akan terus terulang sehingga variasinya akan mengecil.

4.2.1 Ketinggian *step* 40 mm

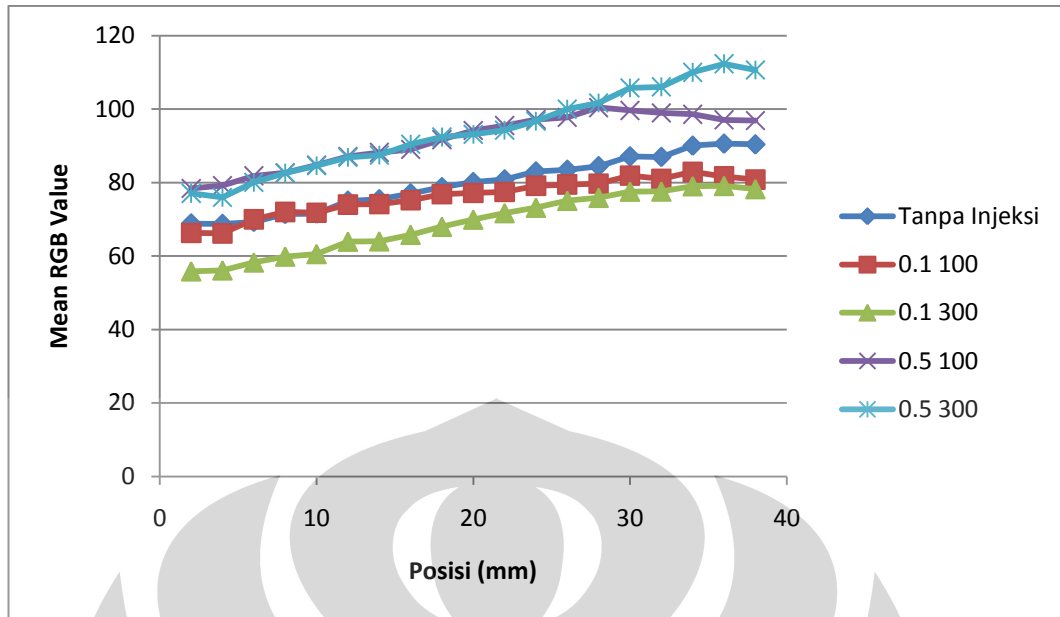
Analisa pada sub-bab ini menitikberatkan pada aliran dengan ketinggian *step* sebesar 40 mm, sama seperti analisa kualitatif. Berikut adalah rentetan grafik *upstream* dan *downstream* untuk kondisi tersebut.



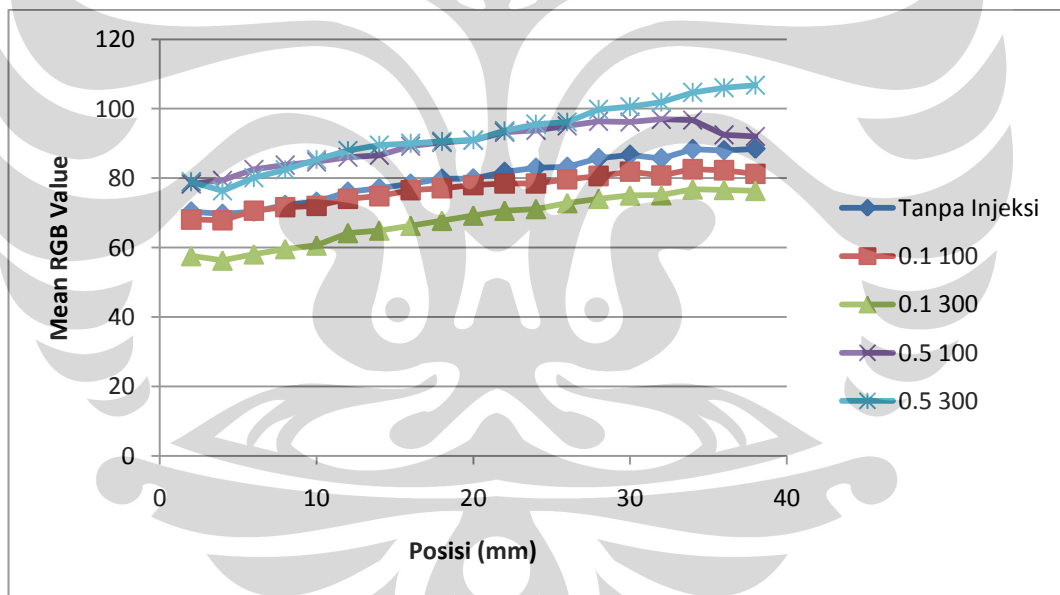
Gambar 4.26 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* $y=1$ dengan tinggi *step* 40 mm



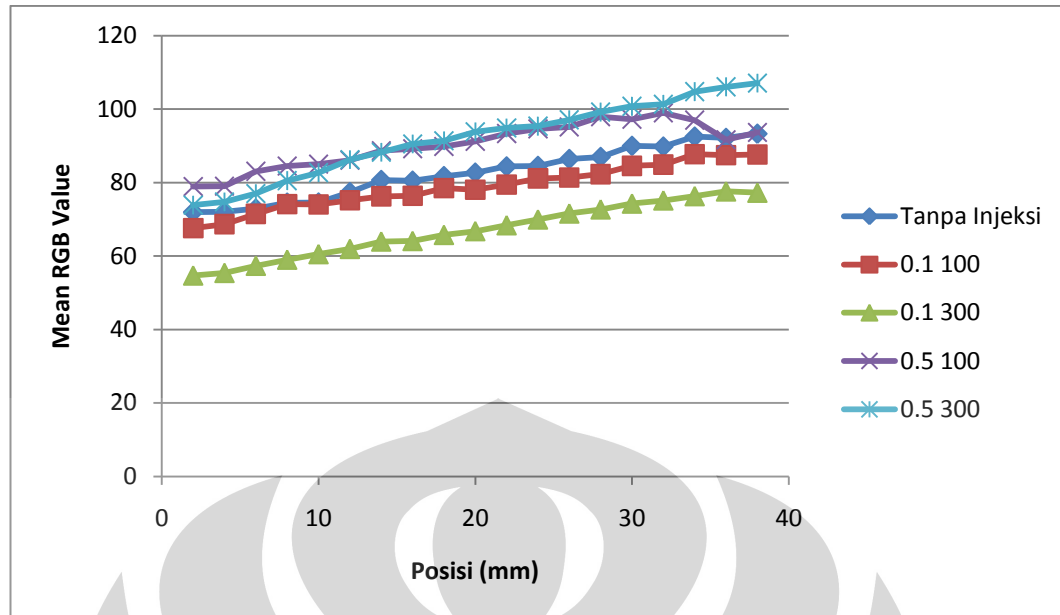
Gambar 4.27 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* $y=2$ dengan tinggi *step* 40 mm



Gambar 4.28 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* $y=3$ dengan tinggi *step* 40 mm



Gambar 4.29 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* $y=4$ dengan tinggi *step* 40 mm

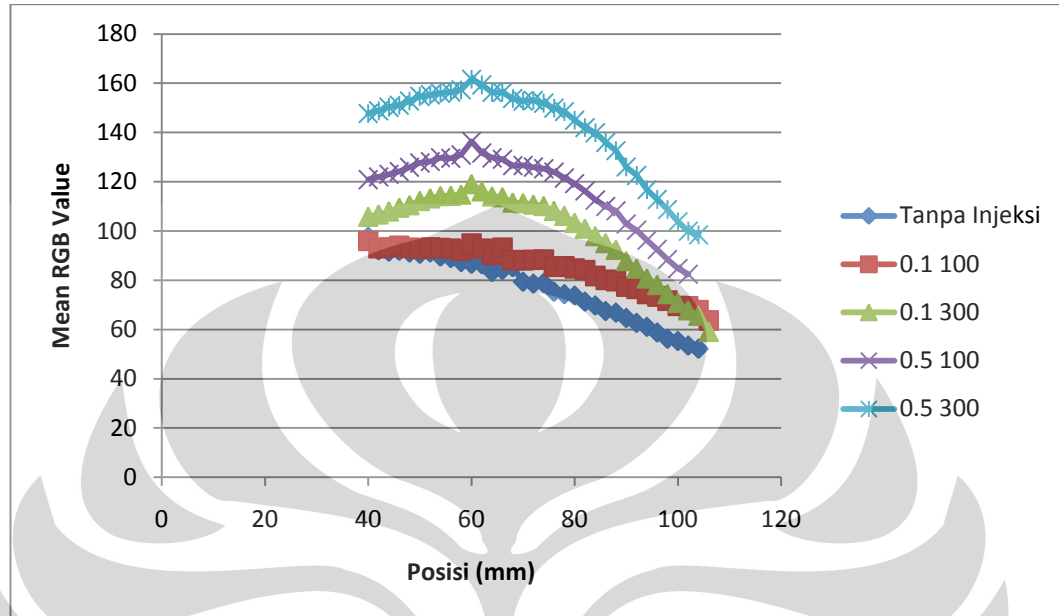


Gambar 4.30 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* $y=5$ dengan tinggi *step* 40 mm

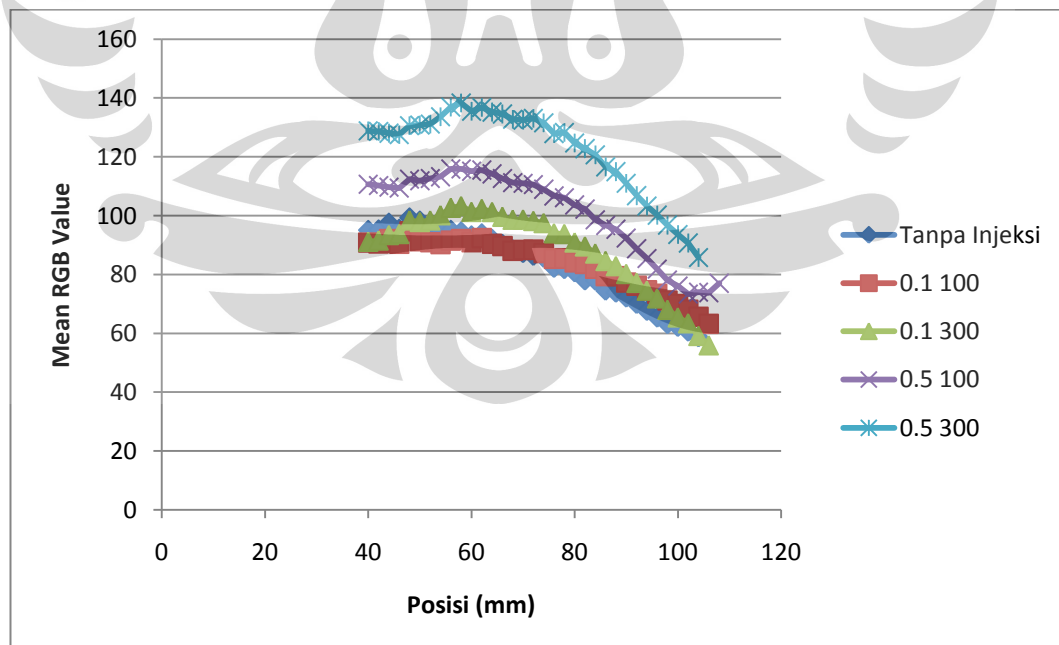
Pada grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.26 dapat dilihat bahwa terjadi fenomena yang berlawanan dengan apa yang terjadi pada tinggi *step* sebesar 20 mm dimana kondisi dengan rasio injeksi 0.5 mempunyai nilai konsentrasi partikel / kepekatan yang tertinggi dan rasio injeksi 0.1 mempunyai nilai terendah. Nilai untuk tanpa injeksi tidak berubah banyak dibandingkan tinggi *step* 20 mm. Hal ini dikarenakan gabungan variasi parameter antara rasio injeksi 0.5 dengan tinggi *step* 40 mm yang lebih tinggi akan mengoptimalkan sebaran aliran yang tersebar oleh dinding injeksi, sehingga sebaran akan merata dari *upstream* hingga *downstream*. Sedangkan untuk rasio injeksi 0.1 akan menghasilkan efek yang kurang optimal pada kondisi ini dikarenakan luasan *test section* yang membesar akibat meningginya *step*. Dengan meluasnya daerah ini, maka penyebaran partikel untuk rasio 0.1 akan lebih meluas dengan *supply* kepekatan partikel yang sama sehingga nilai kepekatan partikel akan berkurang jauh dibandingkan pada kondisi tinggi *step* sebesar 20 mm.

Pada Gambar 4.27 hingga 4.30 terjadi perubahan kepekatan partikel pada titik yang mendekati titik injeksi, menuju pengurangan partikel, hal ini dikarenakan persebaran partikel menuju daerah lain akibat

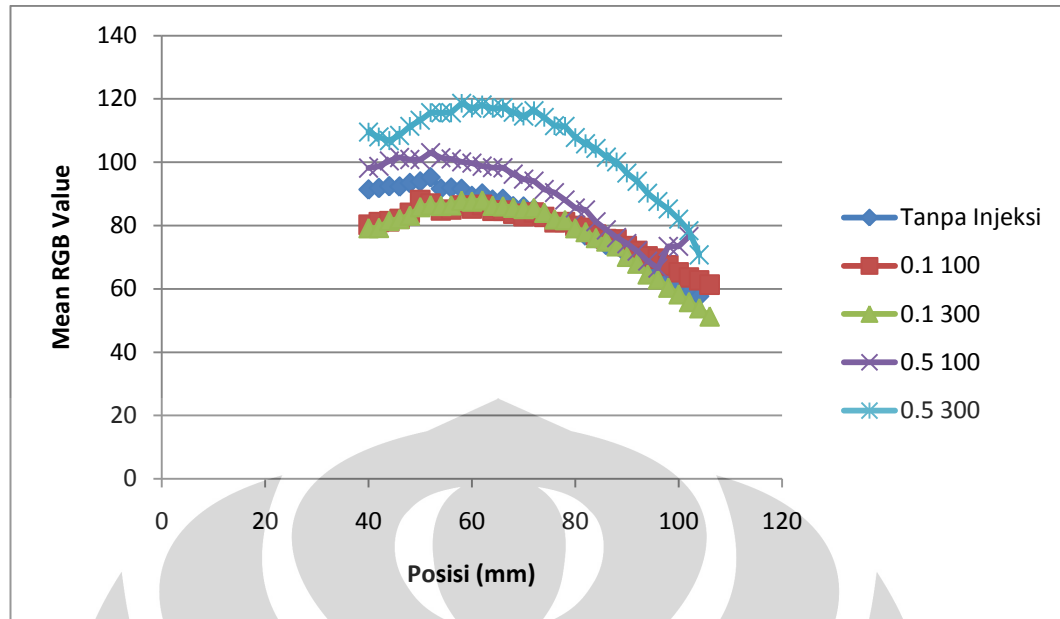
kontak dengan dinding injeksi atau bisa disebut dengan *block effect*. Mengenai persebaran dari partikel untuk masing-masing kondisi mempunyai gradien peningkatan yang konstan.



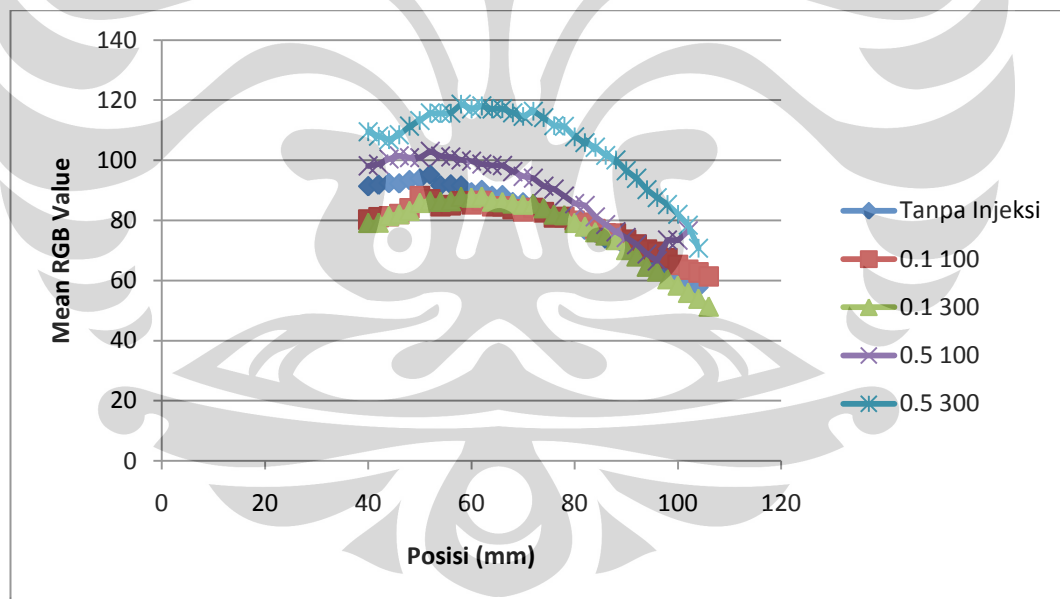
Gambar 4.31 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* $y=1$ dengan tinggi *step* 40 mm



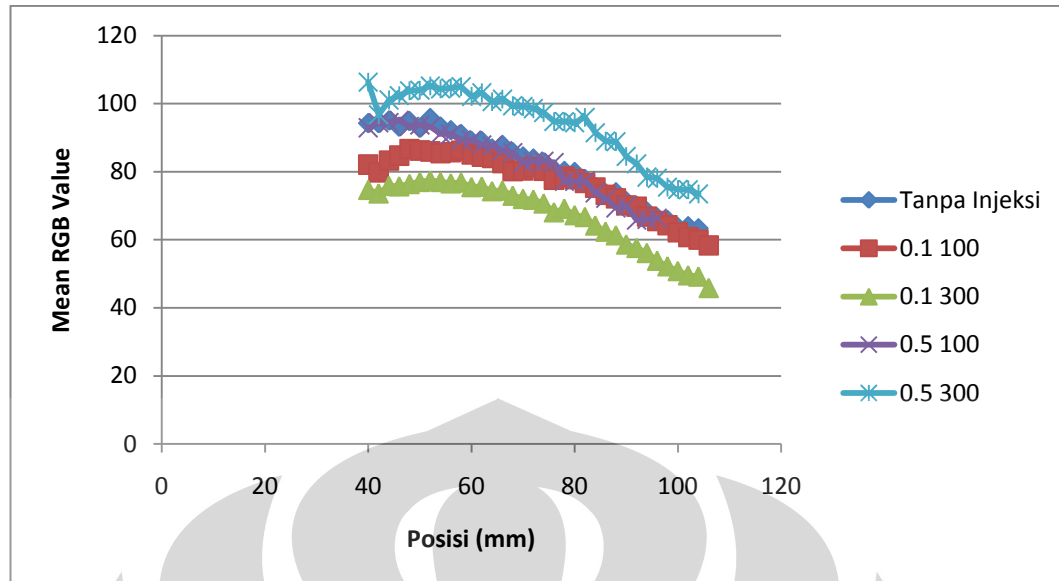
Gambar 4.32 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* $y=2$ dengan tinggi *step* 40 mm



Gambar 4.33 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* $y=3$ dengan tinggi *step* 40 mm

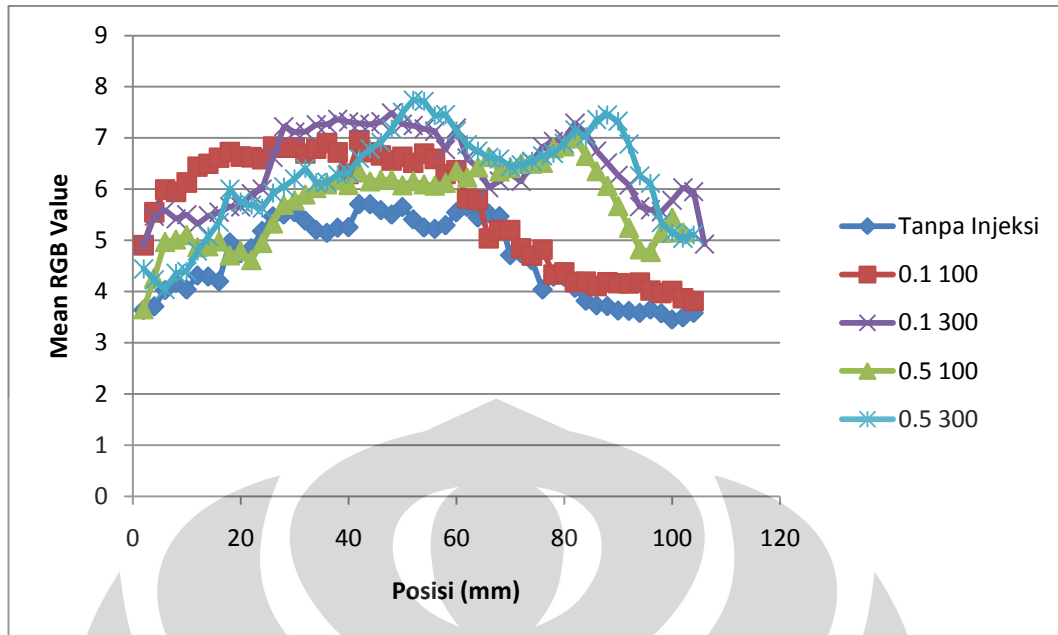


Gambar 4.34 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* $y=4$ dengan tinggi *step* 40 mm

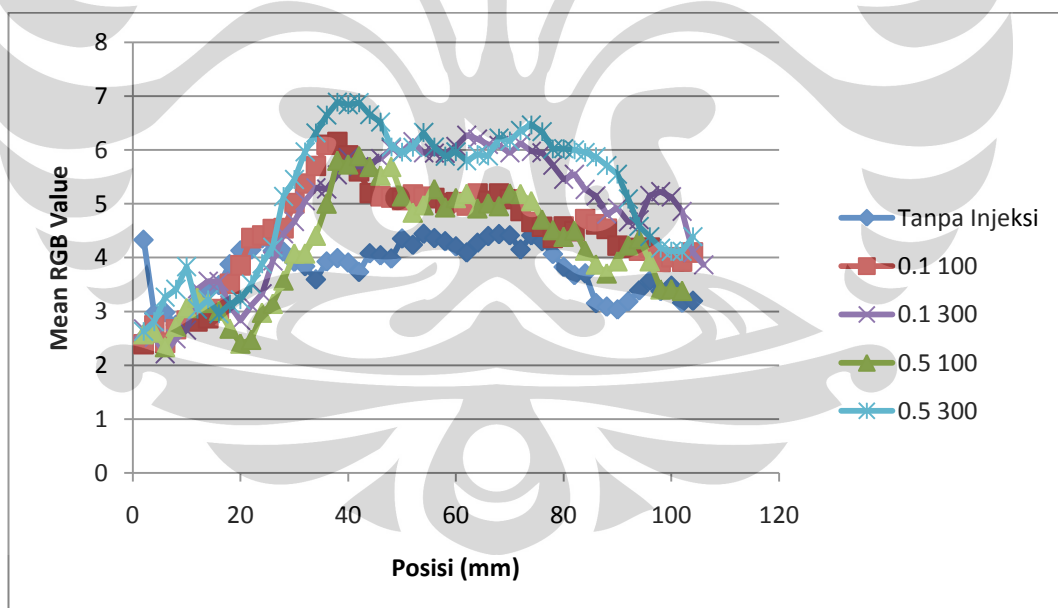


Gambar 4.35 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* $y=5$ dengan tinggi *step* 40 mm

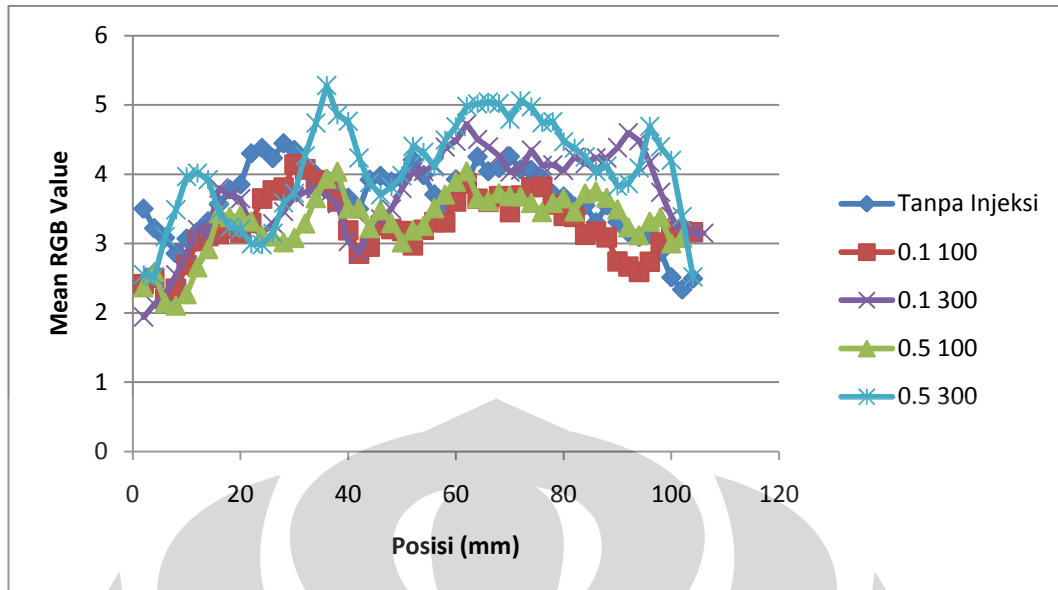
Dari Gambar 4.31 hingga Gambar 4.35 menunjukkan bahwa aliran dengan kondisi rasio injeksi 0.5 memiliki nilai RGB kepekatan tertinggi diikuti oleh kondisi rasio 0.1 dan terakhir dan terendah adalah kondisi tanpa injeksi. Sesuai dengan penjelasan pada bagian *upstream*, kondisi rasio injeksi 0.5 mempunyai sebaran yang rata hingga bagian *downstream* sedangkan rasio 0.1 mempunyai momentum yang tidak optimal untuk *step* 40 mm dikarenakan luasan penyebaran yang lebih besar. Namun kondisi rasio 0.1 masih mempunyai kepekatan yang lebih besar dibandingkan kondisi tanpa injeksi dikarenakan injeksi yang diberikan akan meningkatkan turbulensi dari aliran, sehingga kepekatan dari aliran akan meningkat, tidak seperti aliran tanpa injeksi yang akan mengalir namun mempunyai medan resirkulasi yang rendah. Fenomena yang dapat dilihat dari kelima grafik diatas adalah merapatnya kelima grafik pada ujung posisi $y=5$, hal ini dikarenakan pada titik ujung tersebut aliran sudah mulai mengalami proses *reattachment* sehingga kembali menjadi aliran laminar. Aliran laminar ini akan mengurangi kemampuan pendar dari partikel aliran karena dengan aliran turbulen lah visualisasi dapat dilakukan.



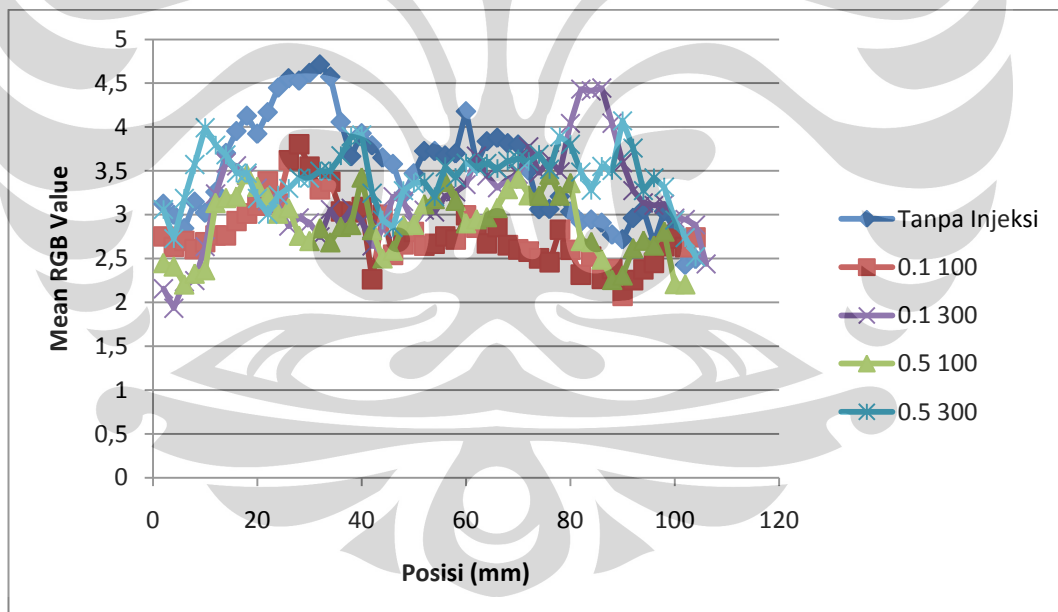
Gambar 4.36 Grafik standar deviasi kondisi dengan dan tanpa injeksi pada $y=1$ untuk ketinggian *step* 40 mm



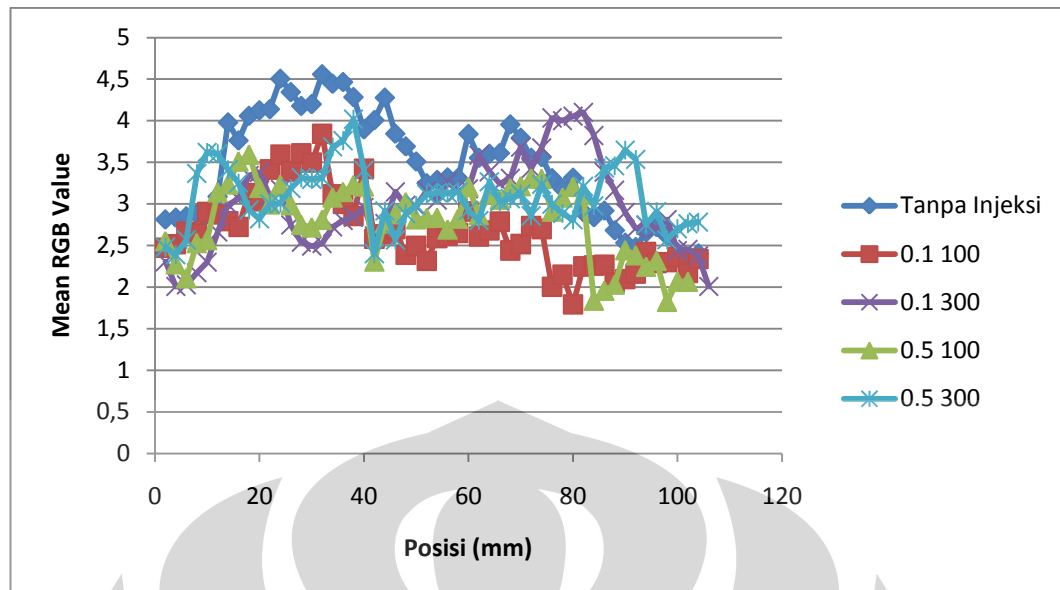
Gambar 4.37 Grafik standar deviasi kondisi dengan dan tanpa injeksi pada $y=2$ untuk ketinggian *step* 40 mm



Gambar 4.38 Grafik standar deviasi kondisi dengan dan tanpa injeksi pada $y=3$ untuk ketinggian *step* 40 mm



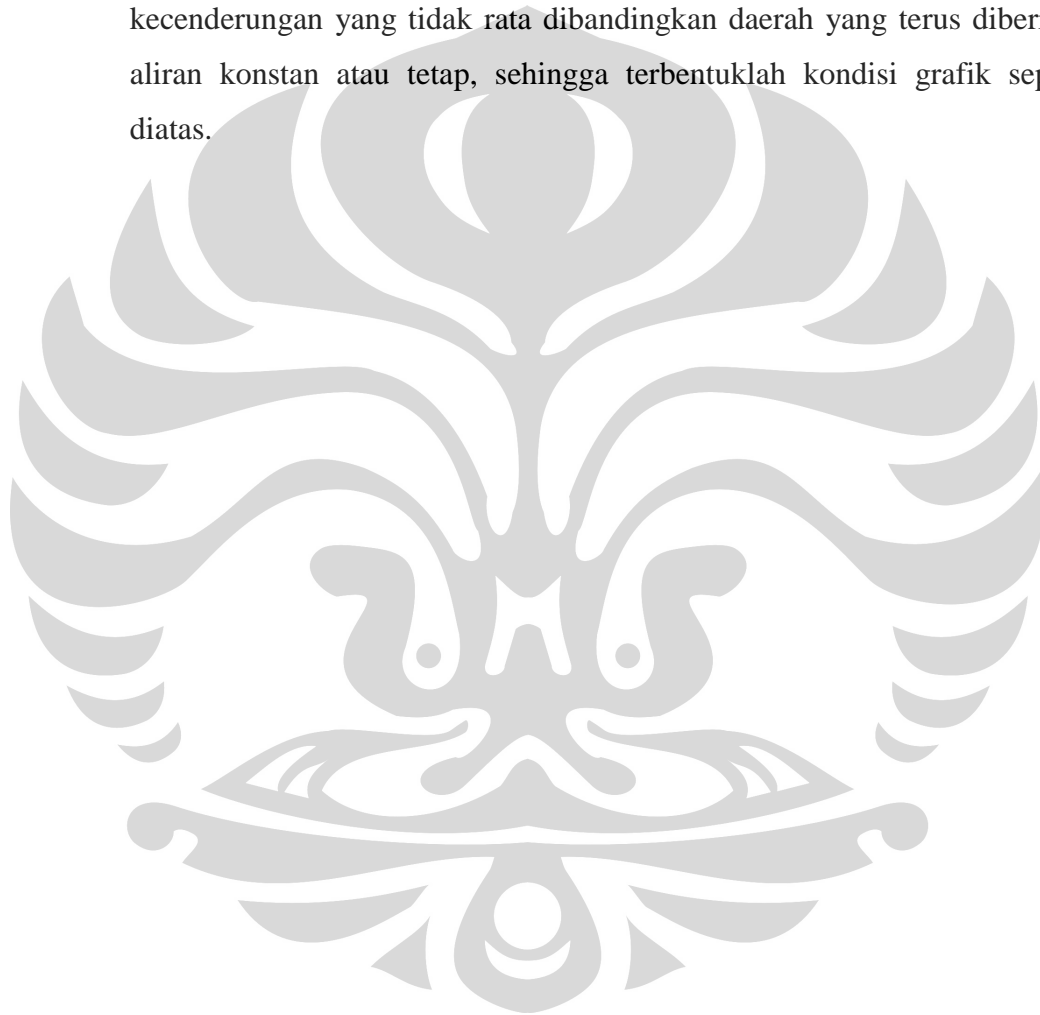
Gambar 4.39 Grafik standar deviasi kondisi dengan dan tanpa injeksi pada $y=4$ untuk ketinggian *step* 40 mm



Gambar 4.40 Grafik standar deviasi kondisi dengan dan tanpa injeksi pada $y=5$ untuk ketinggian *step* 40 mm

Bagian terakhir dari analisa ini adalah pembahasan mengenai standar deviasi untuk kondisi ketinggian *step* 40 mm. Dimana untuk kondisi tanpa injeksi, pada koordinat sepanjang y analisa mempunyai jangka nilai yang relatif konstan sehingga pada Gambar 4.40 yang melambangkan kondisi terdekat pada geometri menunjukkan kenaikan variasi pada kondisi dengan injeksi dan bukan peningkatan variasi pada kondisi tanpa injeksi. Pada gambar 4.36 dan 4.37 nilai deviasi tertinggi berada pada kondisi dengan rasio injeksi 0.5, baik temperatur 100 °C maupun 300 °C, dimana peningkatan deviasi ini terjadi pada jarak kurang lebih 40 mm yaitu titik injeksi, hal ini menunjukkan bahwa setelah injeksi gas panas yaitu di daerah *downstream*, aliran tersebut mengalami peningkatan turbulensi sehingga deviasi terhadap nilai RGB rata-rata akan membesar. Pada rasio momentum injeksi 0.1, injeksi massa dan momentum yang kecil untuk area *test section* yang membesar akan membuat injeksi itu sendiri tidak berpengaruh besar terhadap alirannya sehingga pada aliran tersebut tidak terlihat fluktuasi variasi yang besar pada titik 40 mm.

Pada Gambar 4.38 mulai terlihat fluktuasi standar deviasi sepanjang aliran untuk semua kondisi hingga pada Gambar 4.39 dan 4.40 mencapai puncak fluktuasi. Pergerakan aliran turbulen yang menyebabkan standar deviasi yang tinggi akan bergerak secara pulsatif atau bertahap dengan kata lain tidak berlanjut (tidak *continuous*) pada dasar geometri *test section*. Dengan adanya fenomena turbulen yang bertahap ini, maka ketinggian deviasi pada daerah mendekati dasar akan mempunyai kecenderungan yang tidak rata dibandingkan daerah yang terus diberikan aliran konstan atau tetap, sehingga terbentuklah kondisi grafik seperti diatas.



BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Setelah menganalisa dan mengolah data yang diperoleh dari eksperimen , maka dapat diambil beberapa kesimpulan . Diantaranya adalah :

- Efek dari perubahan momentum injeksi untuk aliran yang dipengaruhi eksitasi eksternal pada daerah resirkulasi adalah peningkatan *block effect* dari injeksi gas panas yang diberikan pada aliran dari *free stream*. Dengan meningkatnya rasio momentum injeksi dari 0.1 menjadi 0,5, dinding udara gas panas yang dihasilkan lebih tegak sehingga mampu mempengaruhi *shear layer* lebih baik dibandingkan dengan efek dinding yang lebih lemah. Dikarenakan efek dinding yang makin kuat, perubahan momentum injeksi akan menghasilkan aliran resirkulasi *upstream* yang lebih kuat dibanding momentum yang rendah.
- Efek dari peningkatan temperatur pada percobaan eksperimental adalah *barrel effect* yang dihasilkan pada bagian setelah injeksi. Dengan meningkatnya temperatur, maka efek tersebut akan meningkat sehingga palung yang terbentuk akan lebih besar. Dengan fenomena pembesaran palung ini, maka resirkulasi di daerah *downstream* akan menjadi semakin lemah.
- Perubahan tinggi dari *step* dari geometri *backward-facing* akan mempengaruhi intensitas resirkulasi baik di daerah *upstream* maupun di daerah *downstream*. Berdasarkan analisa RGB dari visualisasi , maka hasil yang lebih baik didapatkan untuk geometri dengan ketinggian *step* 2 cm dibandingkan 4 cm.
- Nilai standar deviasi menunjukkan variasi yang berada pada suatu titik terhadap nilai rata-rata, dan ini menunjukkan bahwa jika standar deviasi mempunyai nilai tinggi terdapat fluktuasi kecerahan pada titik tersebut. Fluktuasi tingkat kecerahan ini dapat menjadi acuan dari tingkat turbulensi pada berbagai koordinat titik pengambilan data.

5.2 Saran

Setelah melakukan proses eksperimental terhadap alat uji, terdapat juga beberapa saran untuk mengembangkan penelitian yang sudah ada diantaranya adalah menggunakan titik-titik yang berbeda atau *line* yang berbeda untuk kondisi eksperimental. Pada penelitian ini digunakan *sheet* yang ditembakkan pada bagian tengah *test section*, untuk penelitian selanjutnya dapat digunakan pergeseran baik pada sisi kanan atau sisi kiri *test section* untuk validasi karakteristik aliran pada *backward-facing step* secara menyeluruh.

Untuk memenuhi kondisi eksperimental diatas, diperlukan juga suatu metode untuk meratakan sebaran partikel pada *test section* sehingga konsentrasi partikel aliran kurang lebih sama untuk semua bidang. Hal ini dapat dilakukan dengan membuat *slot injection* untuk injeksi partikel aliran seperti injeksi gas panas pada bagian setelah *step*.

Selain itu, dapat digunakan metode lain untuk menganalisa partikel aliran seperti menggunakan pewarna (*dye*) sebagai partikel analisa untuk memudahkan analisa aliran. Selain itu untuk metode visualisasi dapat digunakan PIV (*Particle Image Velocimetry*) atau LDV (*Laser Doppler Velocimetry*) agar menghasilkan citra yang lebih jelas dan lebih rinci untuk karakteristik aliran pada *backward-facing step*.

DAFTAR REFERENSI

- [1] International Atomic Energy Agency. *Integration of Tracing With Computational Fluid Dynamics for Industrial Process Investigation*. (2004)
- [2] Huang , Ying , Yang , Vigor. *Unsteady Flow Evolution and Flame Dynamics In A Lean-premixed Swirl Stabilized Combustor*. Symposium on Turbulent and Shear Flow Phenomena.
- [3] Legier , J.P., Poinso, T. , Veynante, D. *Dynamically Thickened Flame LES Model For Premixed and Non-Premixed Turbulent Combustion*. Center for Turbulence Research (2000).
- [4] Wu, D., Avdis, A., Leschziner, M.A. *Simulation of Synthetic Jets In the Context of Controlling Separated Flow*. ESPRC BAE Systems
- [5] Sherry, Michael John, Lo Jacono , David, Sheridan , John, *Flow Separation Characterisation Of A Forward Facing Step Immersed In A Turbulent Boundary Layer*. Symposium on Turbulent and Shear Flow Phenomena (2009).
- [6] O'Malley, K., Fitt, A. D., Jones, T. V., *Models For High – Reynolds – Number Flow Down A Step*, Journal of Fluida Mechanics, Vol. 222, pp. 139 – 155 (1991)
- [7] Johnson , Michael Bernard . *Aerodynamic Control and Mixing with Ramp Injection*. Graduate Aeronautical Laboratories California Institute of Technology (2005)
- [8] Toschi , F. , et al. *Backward-facing Step Calculations Using the Shear Improved Smagorinsky Model*. Center for Turbulence Research (2006)
- [9] Barber, Robert W. , Fonty , Anne. *A Numerical Study of Laminar Flow Over a Confined Backward-Facing Step Using a Novel Viscous-Spitting Vortex Algorithm*. GRACM Congress on Computational Mechanics (2002)
- [10] 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)
- [11] Tsai, G., Lin, Y. C., Ma, W. J., Wang, H. W., Yang, J. T., *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

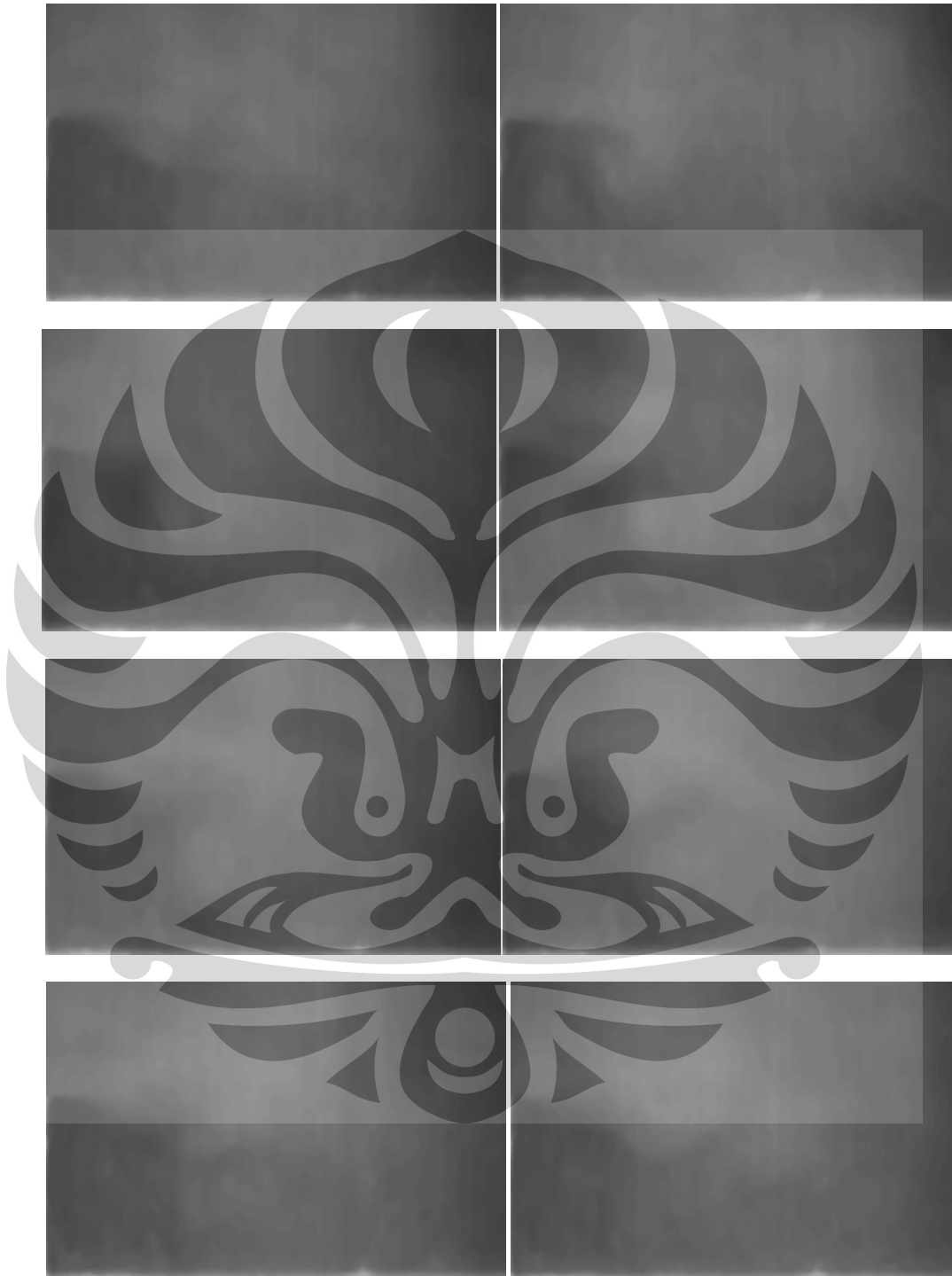
- [12] Di Cicca, G.M. , et al. *PIV Investigation On A Controlled Backward Facing Step Flow*. Proceedings of PSFVIP-4 (2003).
- [13] Abu – Nada, E., Al - Sarkhi, A., Akash, B., Al – Hinti, I., *Heat Transfer And Fluid Flow Characteristics of Separated Flows Encountered In A Backward – Facing Step Under The Effect Of Suction and Blowing*, Journal of Heat Transfer ASME, Vol. 129, 2007.
- [14] Chai, John C., Lee , HeeOk S. , Patankar , Suhas V. *Laminar Heat Transfer of A Radiating Fluid In a Backward Facing Step Flow*. International Symposium on Transport Phenomena in Thermal Engineering (1993)
- [15] Gabler , W., Mayinger, F., Hannappel, R.,. *Experimental and Numerical Investigation of the Density Field in a Supersonic Combustor with Backward Facing Steps*. Springer-Verlag (1995).
- [16] Diurno, G. V., Balaras, E., *Wall – Layer Models For LES of Separated Flows*, MD, USA : University of Maryland
- [17] Kauzlaric , D. , Greiner , A. , Korvink, J.G., *Modelling Micro-Rheological Effects In Micro Injection Moulding with Dissipative Particle Dynamics*. NSTI-Nanotech 2004 (2004).
- [18] Vuorinen, Ville . *LES of Certain Droplet Size Effects in Fuel Sprays*. Asito University : Dissertation
- [19] Berthe , Andre , et al. *The Wall-PIV Measurement Technique for Near Wall Flow Fields in Biofluid Mechanics*. Universitätsmedizin Berlin : Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2009)
- [20] Kahler, C.J., Dreyer, M. . *Dynamic 3D Stereoscopic PIV and Schlieren Investigation of Turbulent Flow Structures Generated by Laser Induced Plasma*. TU Braunschweig : Institut für Strömungsmechanik
- [21] Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., *Mekanika Fluida*, terj. Harinaldi, Budiarto (Jakarta: Erlangga, 2003).
- [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 1

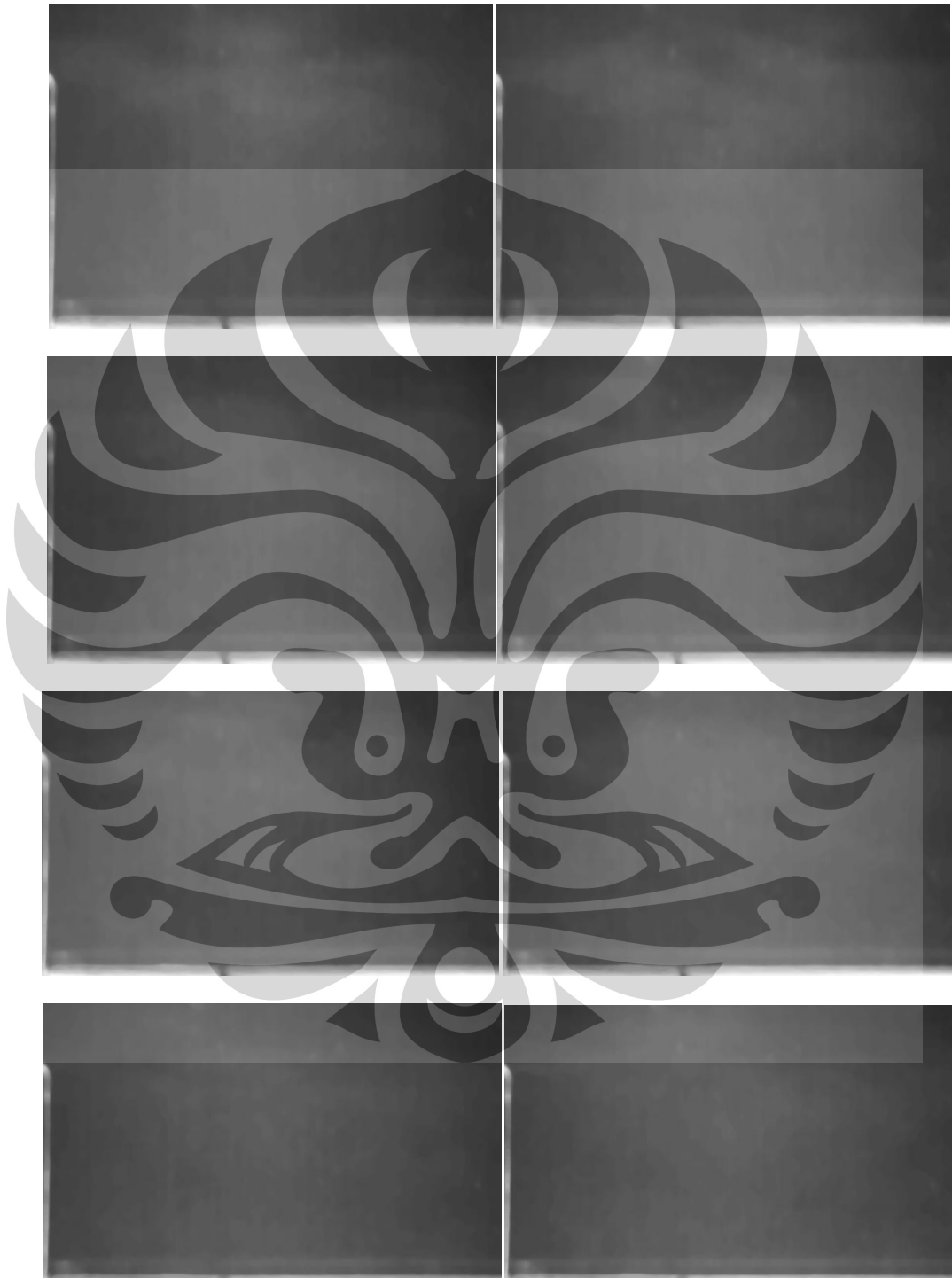
GAMBAR HASIL *HIGH SPEED VIDEO CAMERA*

Lanjutan

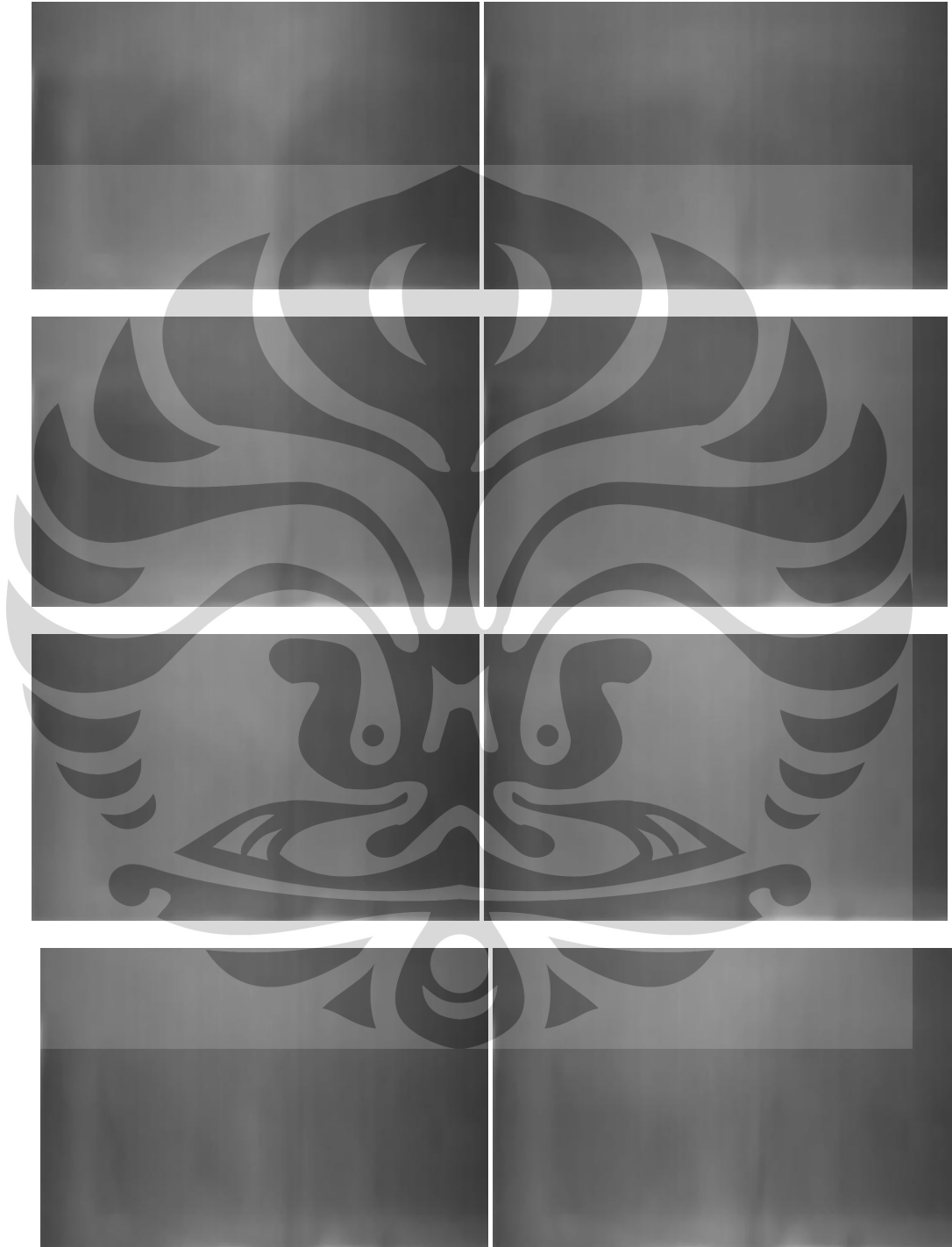
Kondisi Tanpa Injeksi Ketinggian *Step H*

Lanjutan

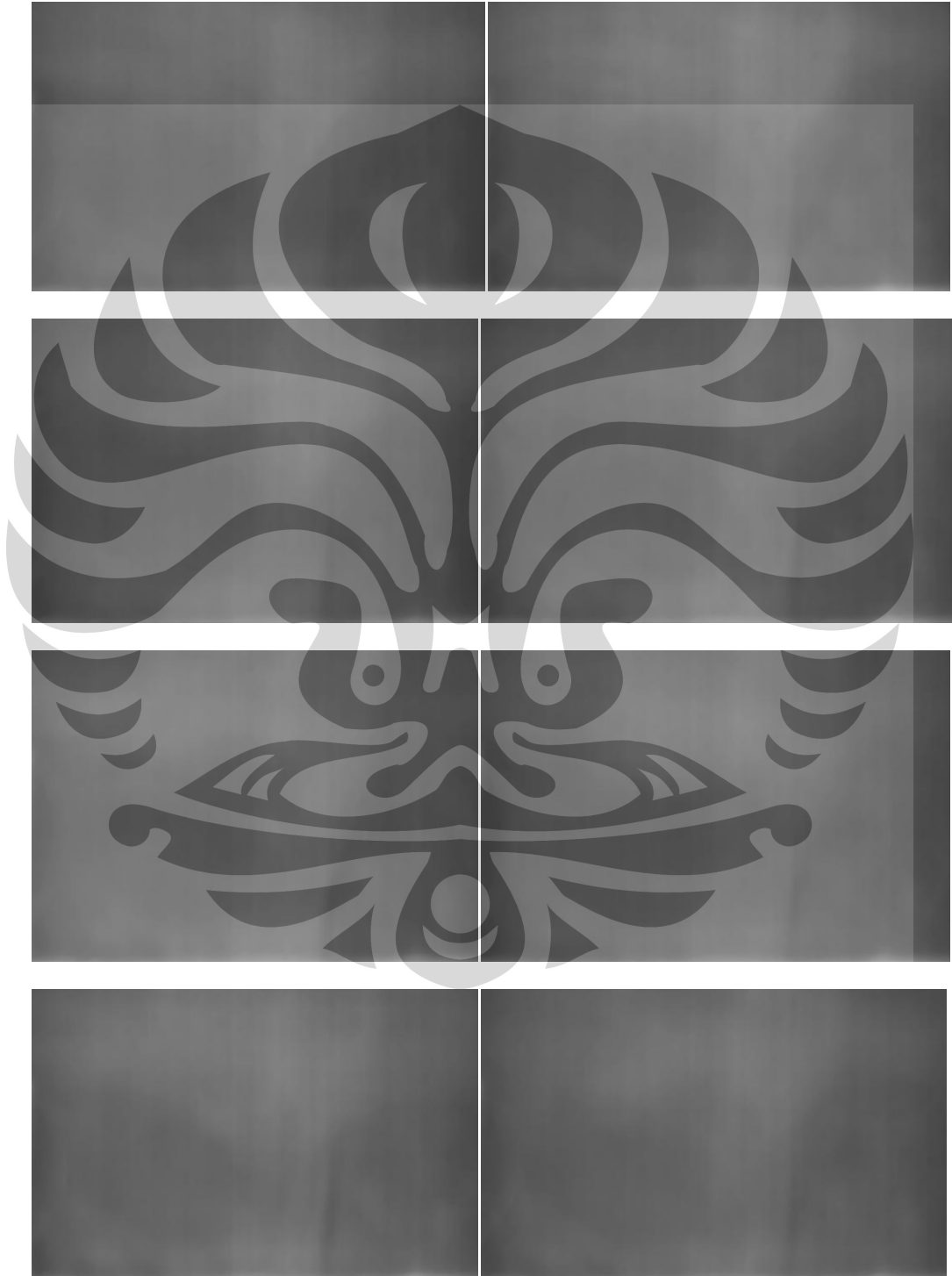
Kondisi Tanpa Injeksi Ketinggian *Step 2H*

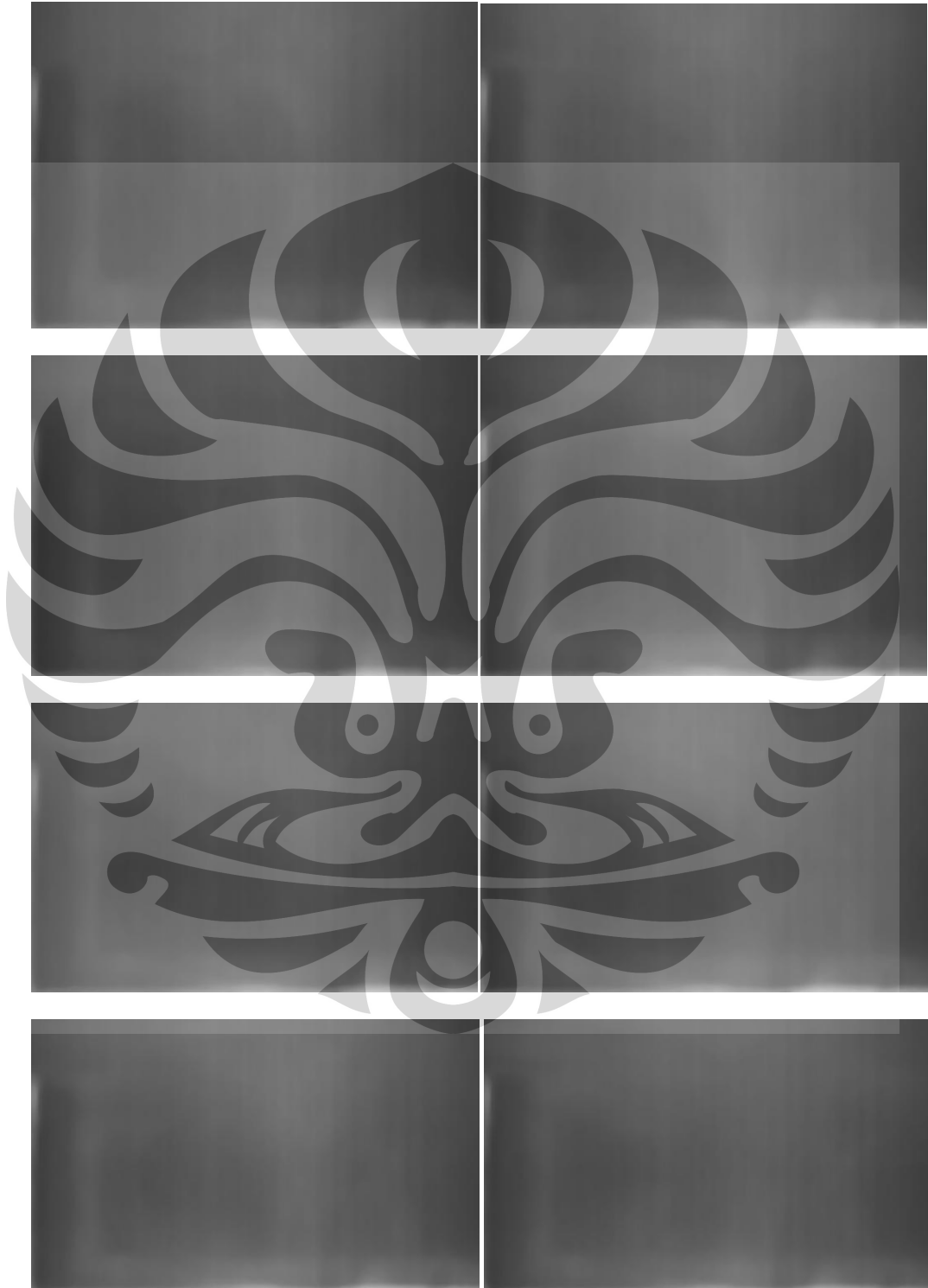


Lanjutan

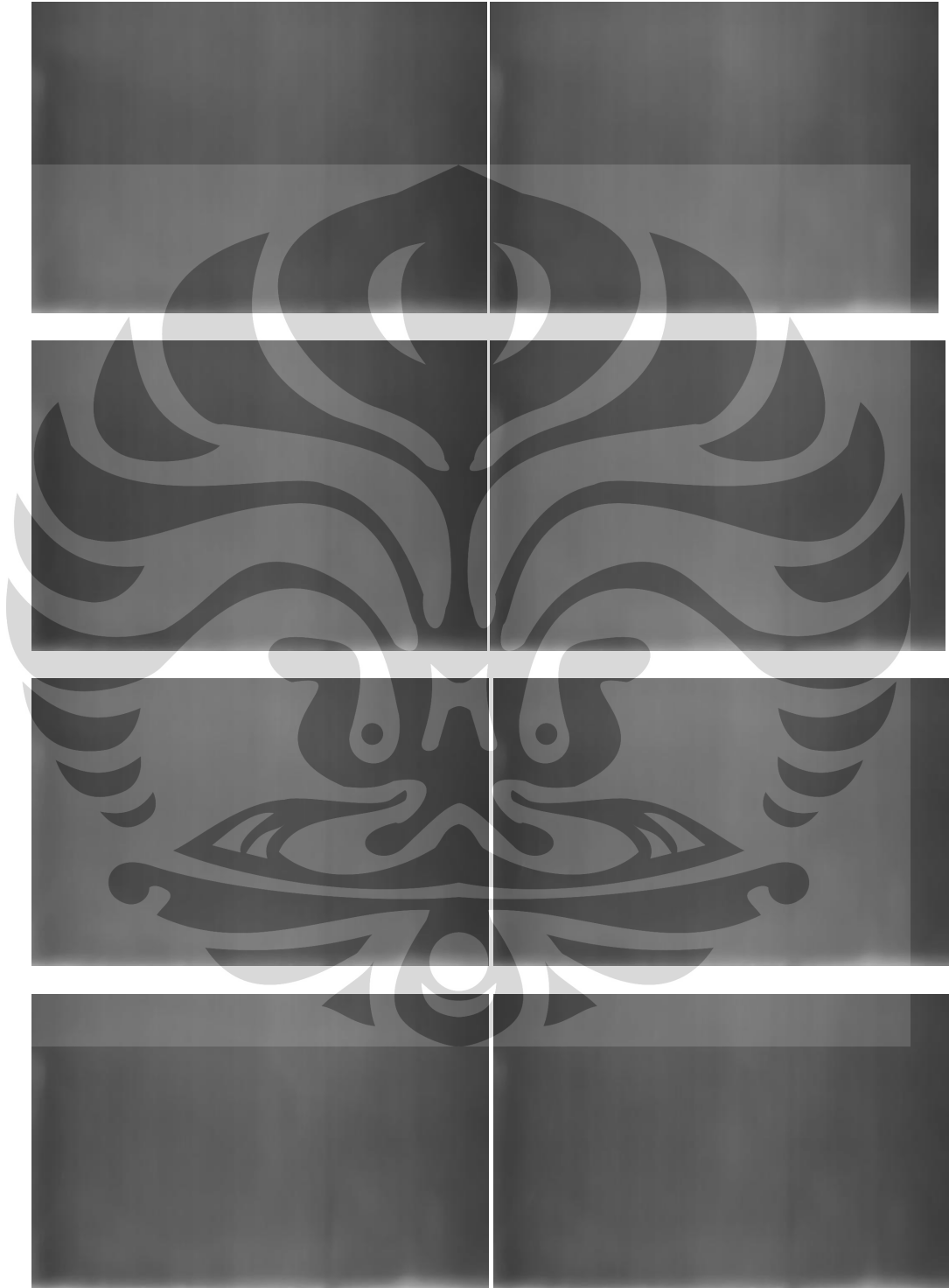
Kondisi Injeksi Ketinggian *Step H***Rasio Injeksi 0.1 Temperatur Injeksi 100 °C**

Lanjutan

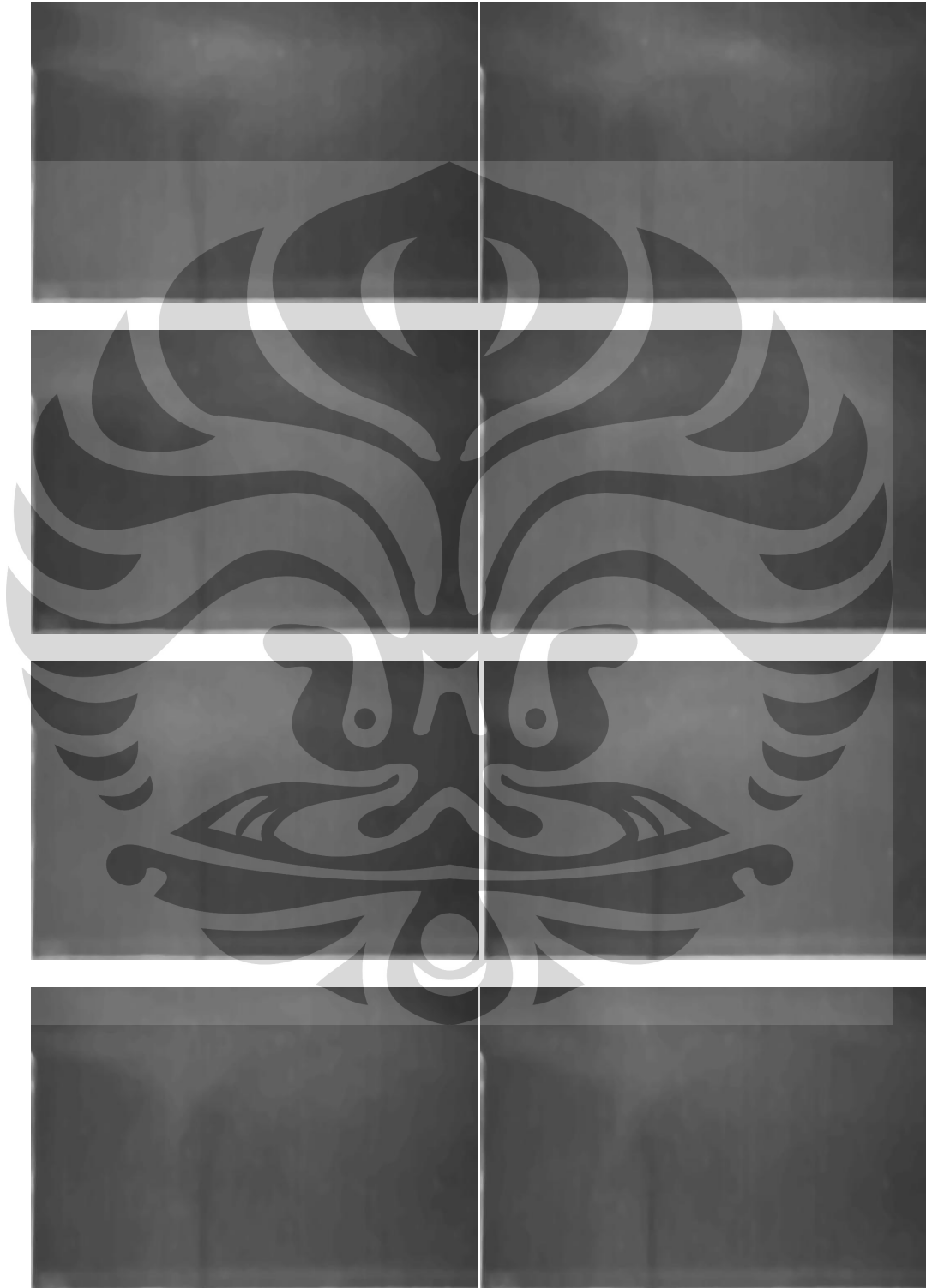
Kondisi Injeksi Ketinggian *Step H***Rasio Injeksi 0.1 Temperatur Injeksi 300 °C**

Lanjutan**Kondisi Injeksi Ketinggian *Step H*****Rasio Injeksi 0.5 Temperatur Injeksi 100 °C**

Lanjutan

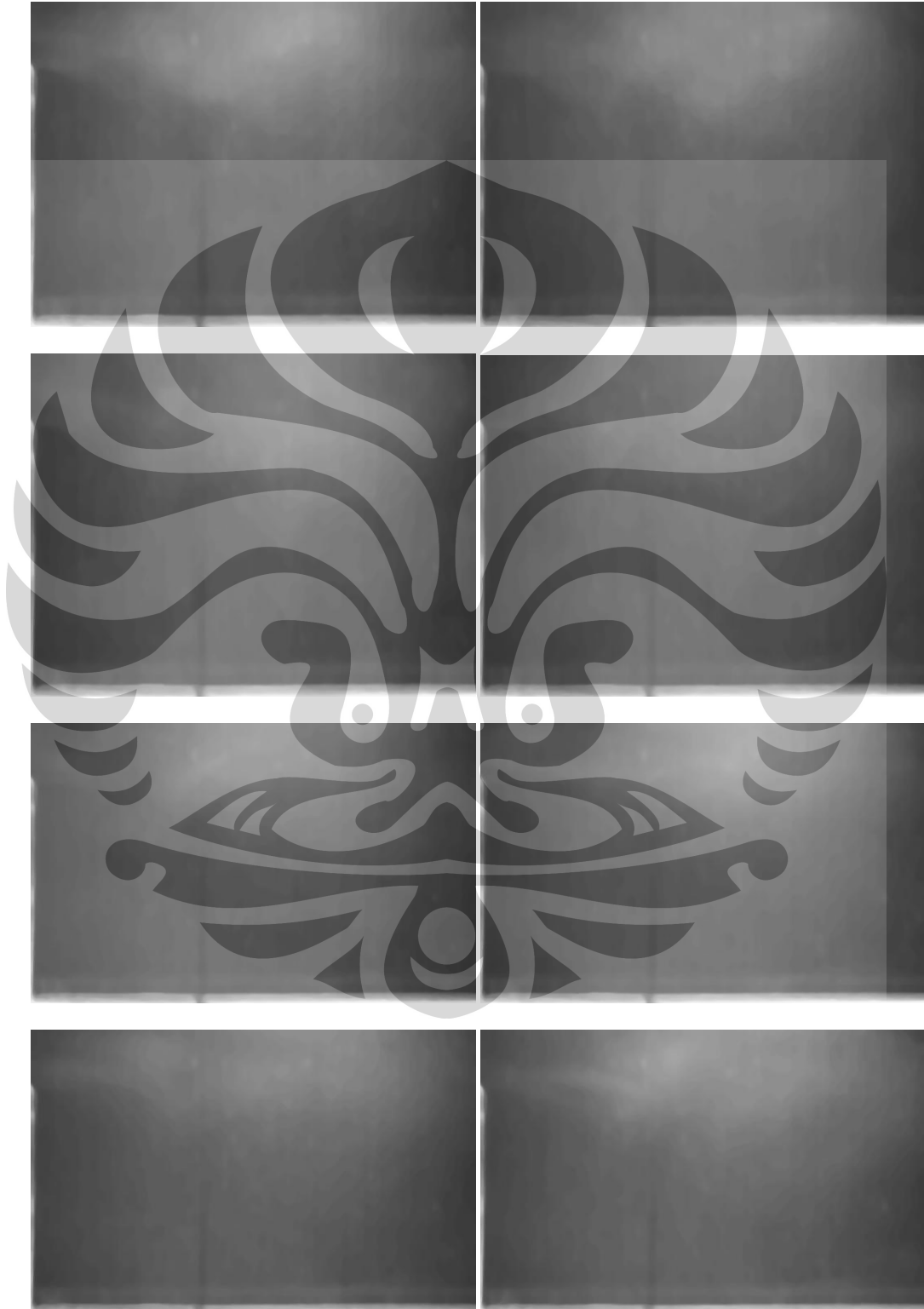
Kondisi Injeksi Ketinggian *Step H***Rasio Injeksi 0.5 Temperatur Injeksi 300 °C**

Lanjutan

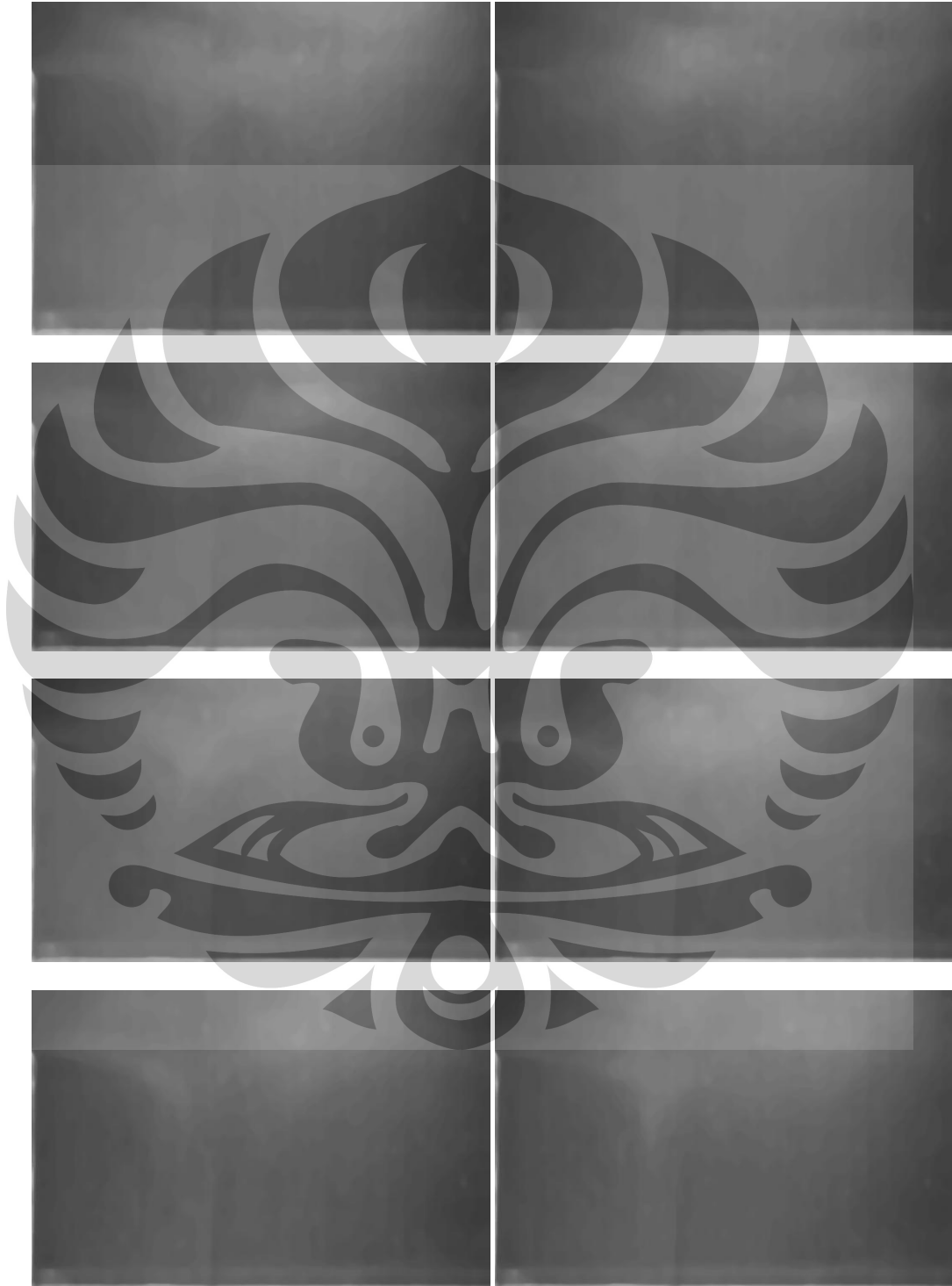
Kondisi Injeksi Ketinggian *Step 2H***Rasio Injeksi 0.1 Temperatur Injeksi 100 °C**

Universitas Indonesia

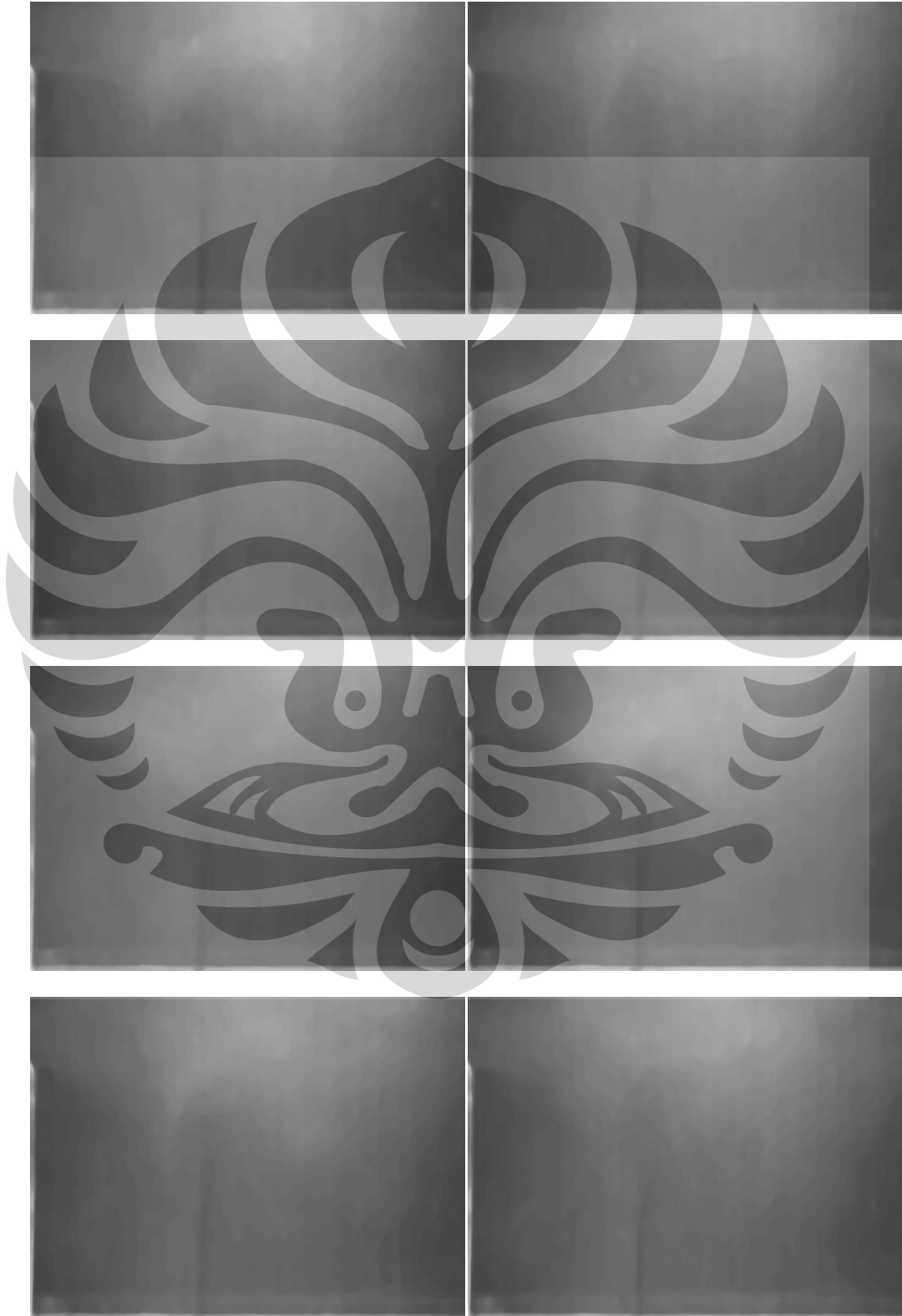
Lanjutan

Kondisi Injeksi Ketinggian *Step 2H***Rasio Injeksi 0.1 Temperatur Injeksi 300 °C**

Universitas Indonesia

Lanjutan**Kondisi Injeksi Ketinggian *Step 2H*****Rasio Injeksi 0.5 Temperatur Injeksi 100 °C**

Lanjutan

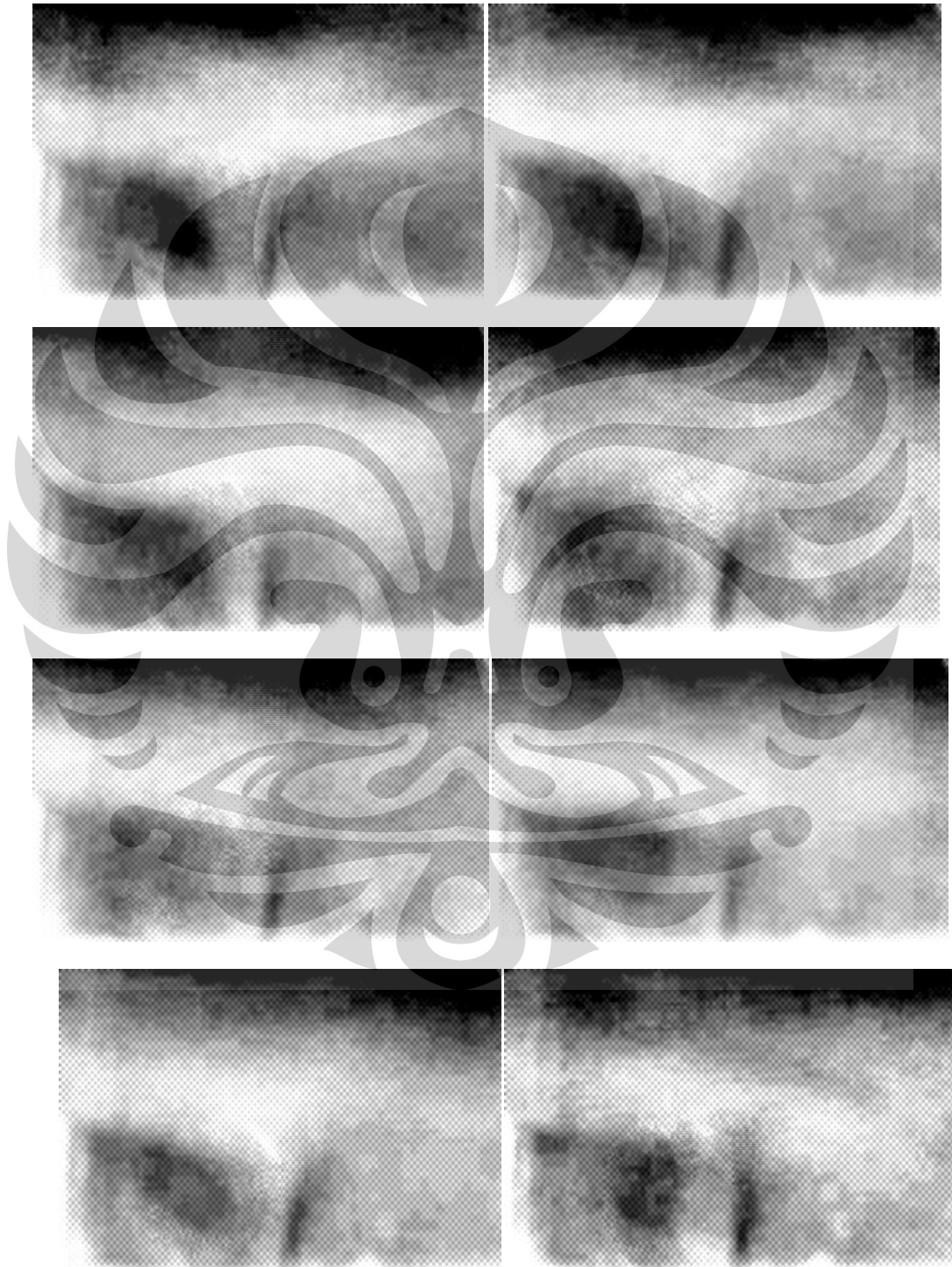
Kondisi Injeksi Ketinggian *Step 2H***Rasio Injeksi 0.5 Temperatur Injeksi 300 °C**

Universitas Indonesia



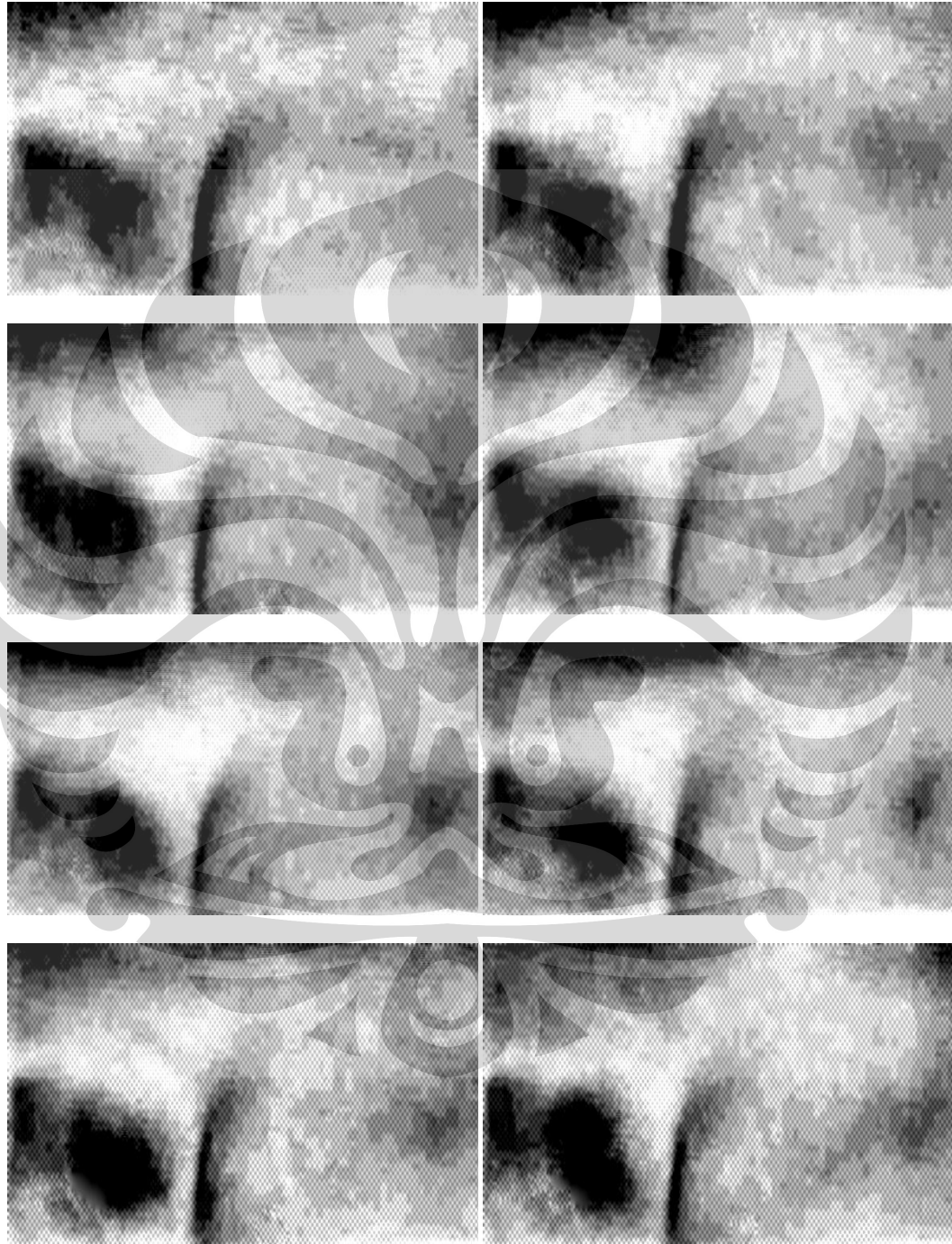
LAMPIRAN 2
GAMBAR HASIL *VIDEO CAMERA*

Lanjutan

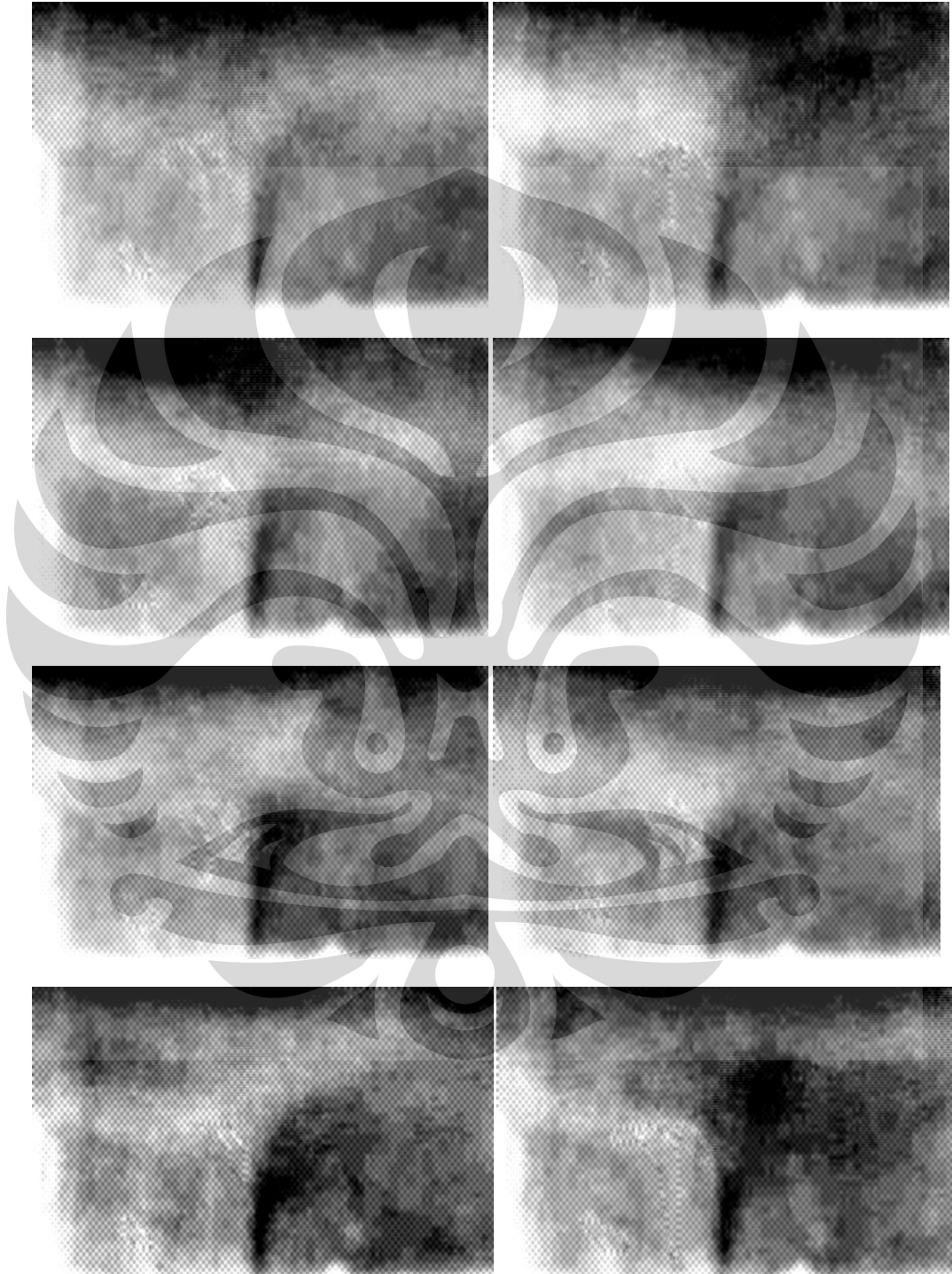
Kondisi Injeksi Ketinggian Step H**Rasio Injeksi 0.1 Temperatur Injeksi 100 °C**

Universitas Indonesia

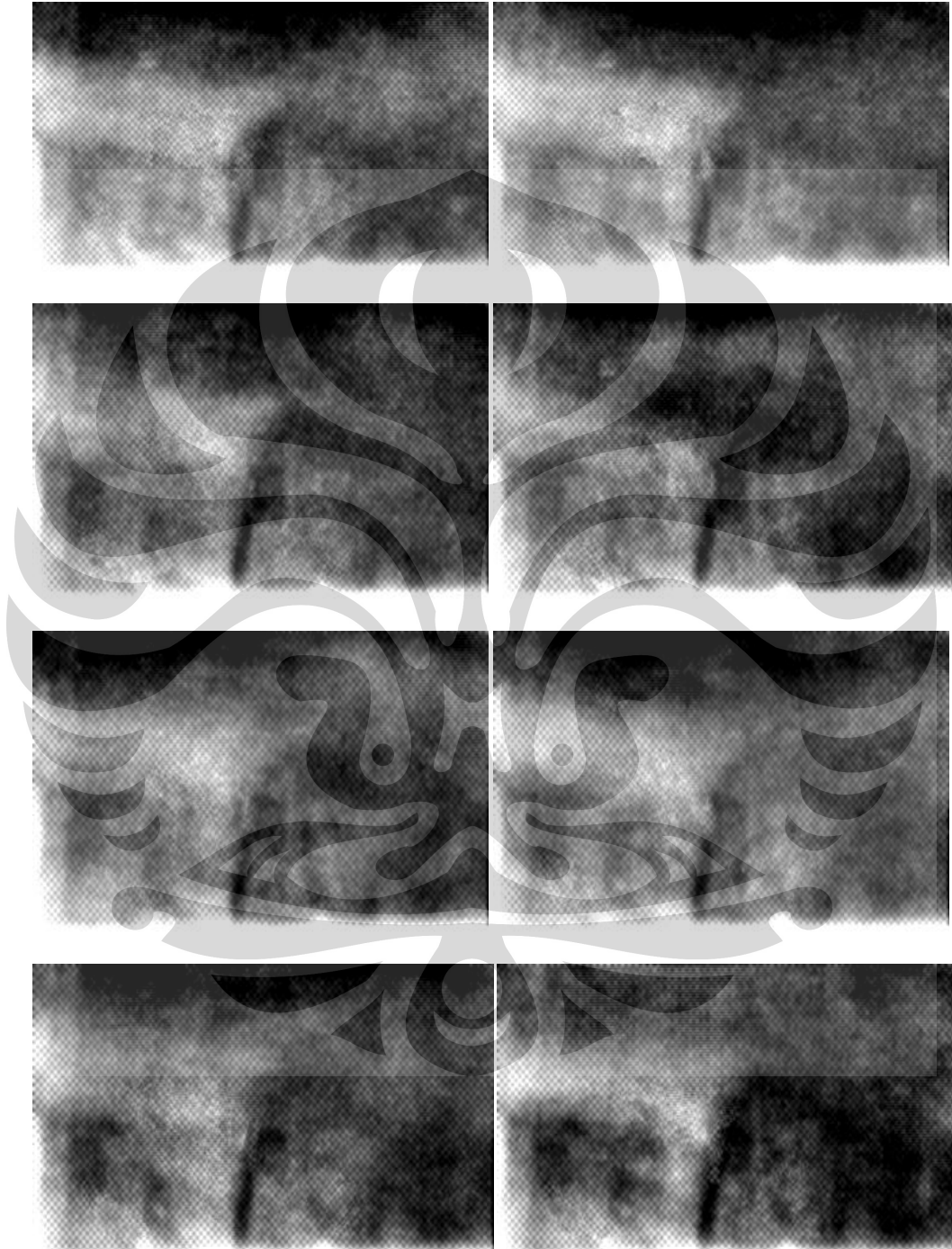
Lanjutan

Kondisi Injeksi Ketinggian *Step H***Rasio Injeksi 0.1 Temperatur Injeksi 300 °C**

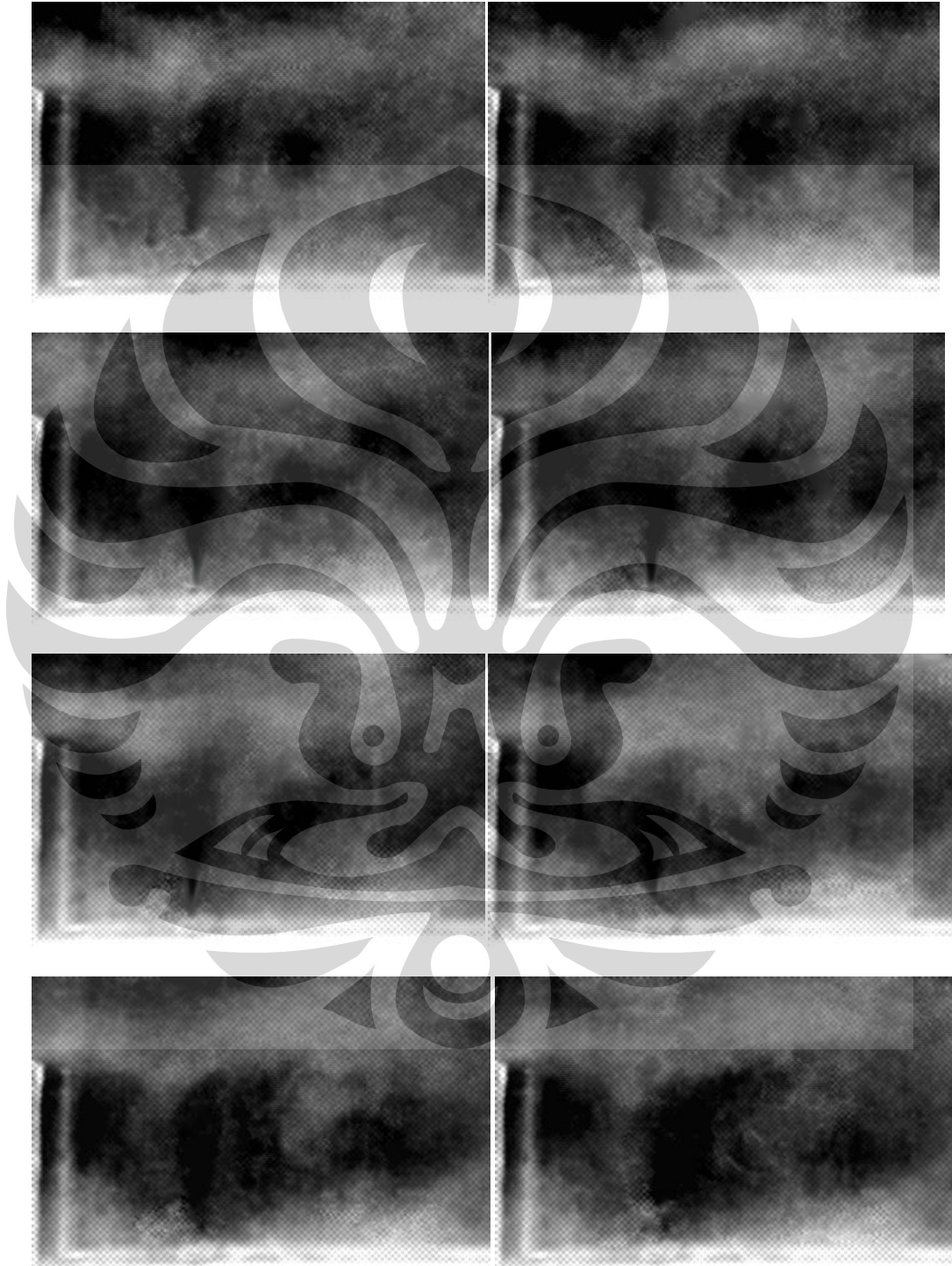
Lanjutan

Kondisi Injeksi Ketinggian *Step H***Rasio Injeksi 0.5 Temperatur Injeksi 100 °C**

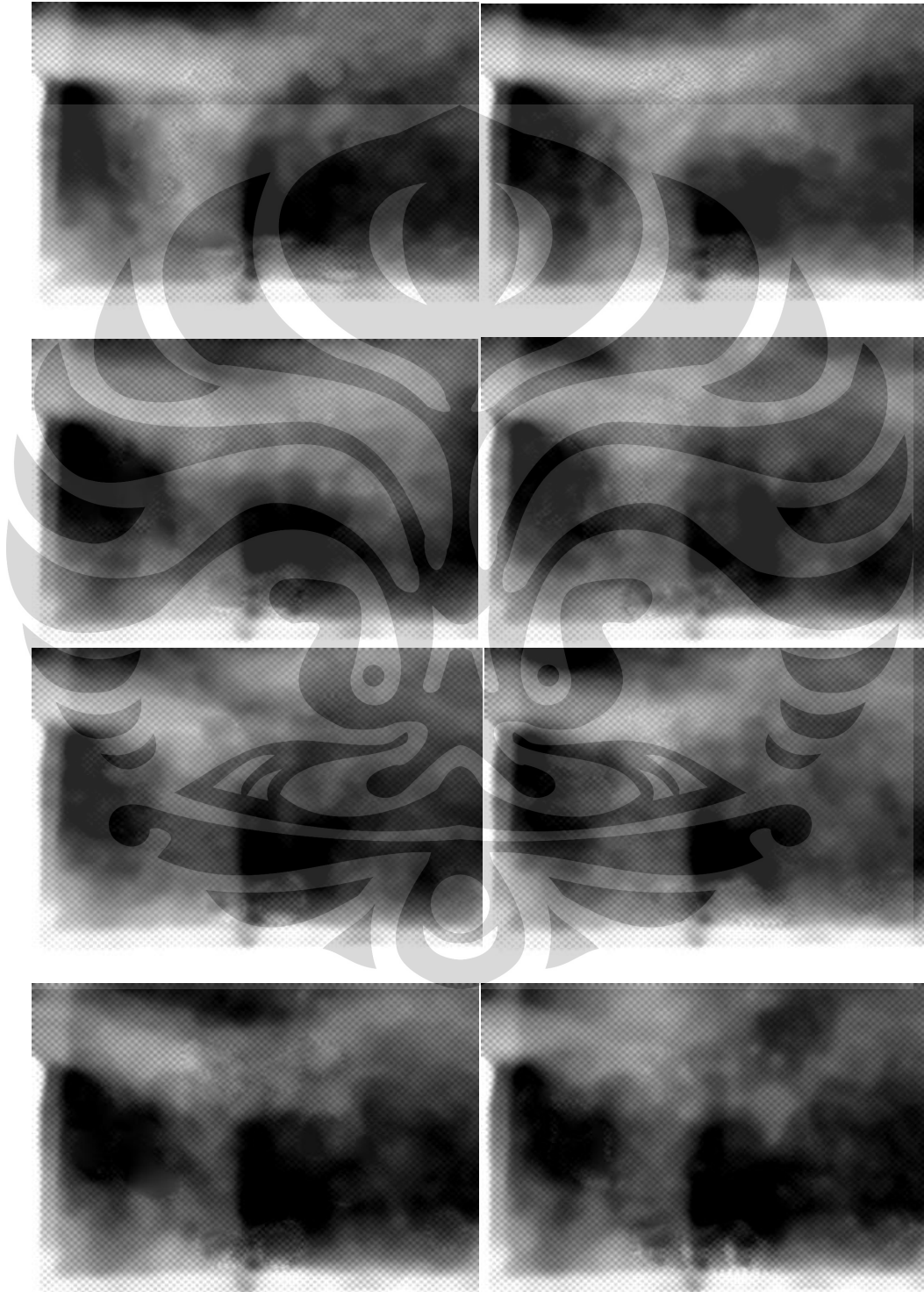
Lanjutan

Kondisi Injeksi Ketinggian *Step H***Rasio Injeksi 0.5 Temperatur Injeksi 300 °C**

Lanjutan

Kondisi Injeksi Ketinggian *Step 2H***Rasio Injeksi 0.1 Temperatur Injeksi 100 °C**

Lanjutan

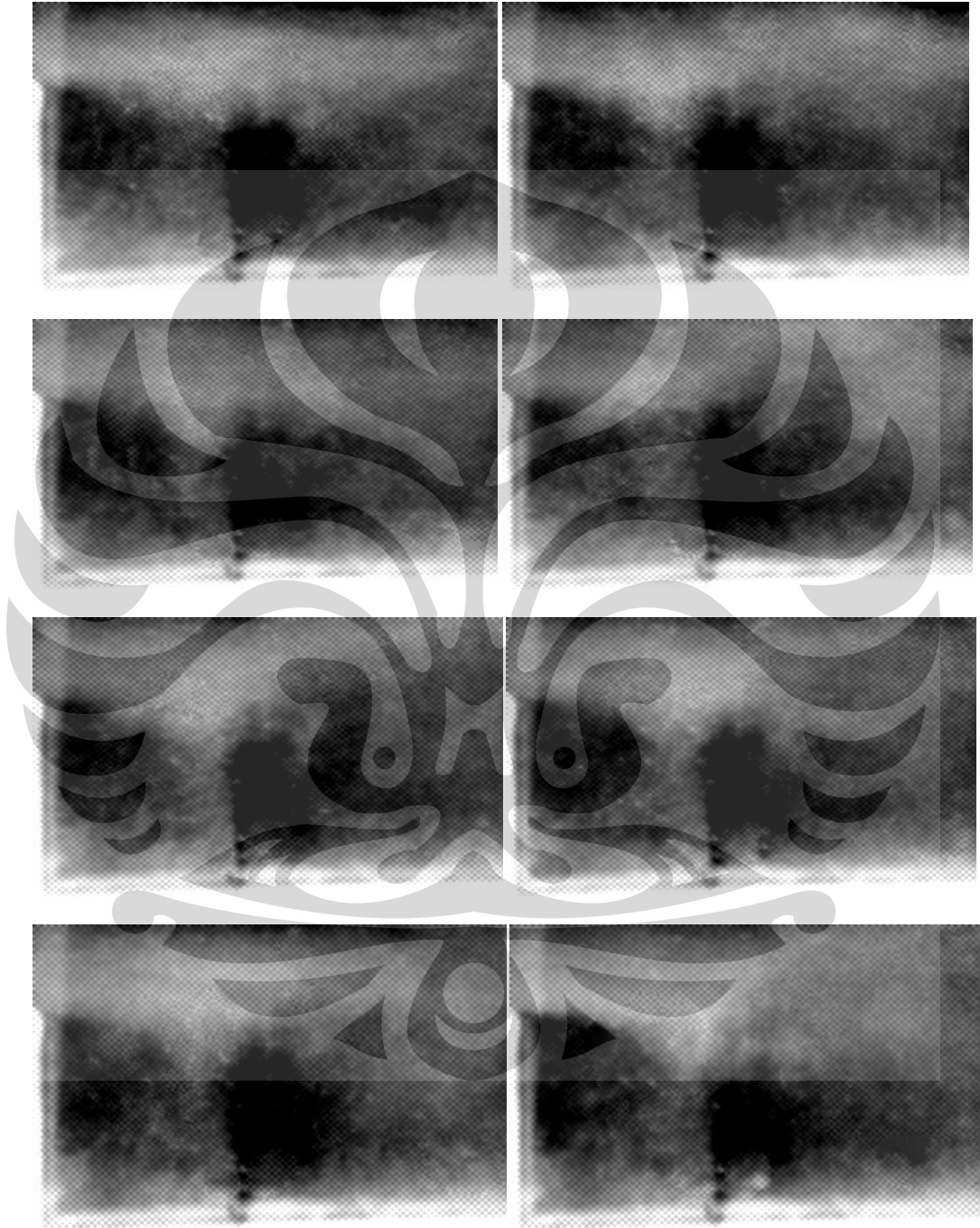
Kondisi Injeksi Ketinggian *Step 2H***Rasio Injeksi 0.1 Temperatur Injeksi 300 °C**

Universitas Indonesia

Lanjutan

Kondisi Injeksi Ketinggian *Step 2H***Rasio Injeksi 0.5 Temperatur Injeksi 100 °C**

Lanjutan

Kondisi Injeksi Ketinggian *Step 2H***Rasio Injeksi 0.5 Temperatur Injeksi 300 °C**



LAMPIRAN 3
TABEL HASIL *RGB AVERAGING*
DAN STANDAR DEVIASI

Lanjutan

Kondisi Tanpa Injeksi Ketinggian Step H dan 2H

| Tanpa Injeksi 2 cm | | | Tanpa Injeksi 4 cm | | |
|--------------------|----------|--------------------|--------------------|----------|--------------------|
| Posisi | Mean RGB | Standard Deviation | Posisi | Mean RGB | Standard Deviation |
| 2 | 93,74 | 5,072444871 | 2 | 68,35 | 3,641727367 |
| 4 | 95,68 | 4,828116307 | 4 | 70,93 | 3,711822162 |
| 6 | 96,04 | 4,990738898 | 6 | 72,55 | 4,030060315 |
| 8 | 98,49 | 5,068211487 | 8 | 73,86 | 4,168125157 |
| 10 | 98,24 | 4,938244893 | 10 | 73,7 | 4,040929214 |
| 12 | 98,55 | 4,926479678 | 12 | 77,12 | 4,314126003 |
| 14 | 101,14 | 4,966595485 | 14 | 77,64 | 4,29339811 |
| 16 | 101,71 | 4,866490242 | 16 | 79,23 | 4,201131389 |
| 18 | 103,19 | 5,143781182 | 18 | 81,43 | 4,959539263 |
| 20 | 106,83 | 5,820644207 | 20 | 81,78 | 4,746483847 |
| 22 | 108,79 | 6,176356024 | 22 | 83 | 4,846433822 |
| 24 | 112,61 | 6,519427068 | 24 | 83,91 | 5,182052042 |
| 26 | 112,97 | 6,899648652 | 26 | 85,2 | 5,469157446 |
| 28 | 112,81 | 7,11052002 | 28 | 87,58 | 5,5051551 |
| 30 | 115,02 | 7,371772535 | 30 | 88,51 | 5,551076963 |
| 32 | 115,55 | 7,228416147 | 32 | 91,92 | 5,384227056 |
| 34 | 115,39 | 7,319401366 | 34 | 92,26 | 5,20276012 |
| 36 | 115,67 | 7,314100123 | 36 | 92,1 | 5,147257272 |
| 38 | 116,91 | 7,385619388 | 38 | 90,29 | 5,248007637 |
| 40 | 117,82 | 7,353113819 | 40 | 97,64 | 5,257582925 |
| 42 | 116,29 | 7,275661655 | 42 | 92,14 | 5,70768112 |
| 44 | 114,79 | 7,136893759 | 44 | 91,57 | 5,706622868 |
| 46 | 112,15 | 6,718548124 | 46 | 91,94 | 5,590090242 |
| 48 | 110,55 | 6,541823488 | 48 | 91,21 | 5,504075897 |
| 50 | 108,85 | 6,446947441 | 50 | 90,71 | 5,651040384 |
| 52 | 108,07 | 6,288124128 | 52 | 91,23 | 5,411300973 |
| 54 | 103,71 | 5,978572851 | 54 | 89,58 | 5,2511762 |
| 56 | 102,92 | 6,112877614 | 56 | 88,98 | 5,223992631 |
| 58 | 101,07 | 6,251068596 | 58 | 87,37 | 5,296458746 |
| 60 | 97,52 | 6,122454119 | 60 | 86,62 | 5,548240288 |
| 62 | 94,15 | 6,475088237 | 62 | 86,49 | 5,652827208 |
| 64 | 92,5 | 6,59889798 | 64 | 83,32 | 5,445408639 |
| 66 | 90,36 | 6,412613832 | 66 | 84,16 | 5,522877712 |
| 68 | 85,28 | 6,375584742 | 68 | 85,28 | 5,470677913 |
| 70 | 82,79 | 6,079099814 | 70 | 79,37 | 4,712254931 |
| 72 | 80,71 | 6,307435087 | 72 | 78,59 | 4,747026167 |
| 74 | 76,75 | 6,301154295 | 74 | 78,85 | 4,609245981 |

| | | | | | |
|----|--------|-------------|-----|-------|-------------|
| 76 | 72,86 | 5,865530193 | 76 | 75,29 | 4,041100723 |
| 78 | 70,49 | 5,565940798 | 78 | 74,32 | 4,290145281 |
| 80 | 67,15 | 5,589266409 | 80 | 73,73 | 4,289522118 |
| 82 | 64,36 | 5,23106494 | 82 | 71,25 | 4,073143141 |
| 2 | 98,06 | 5,243215915 | 84 | 69,7 | 3,822290019 |
| 4 | 96,32 | 5,080920938 | 86 | 67,45 | 3,732570054 |
| 6 | 97,81 | 4,961864671 | 88 | 66,82 | 3,716806891 |
| 8 | 98,77 | 4,929513263 | 90 | 64,65 | 3,629035821 |
| 10 | 99,84 | 4,945603087 | 92 | 62,65 | 3,623411226 |
| 12 | 101,6 | 4,988876516 | 94 | 61,03 | 3,584261527 |
| 14 | 102,68 | 5,116580297 | 96 | 58,74 | 3,648924974 |
| 16 | 104,66 | 5,435052712 | 98 | 56,19 | 3,576933805 |
| 18 | 105,72 | 5,879393908 | 100 | 55,29 | 3,454427493 |
| 20 | 109,02 | 6,69083498 | 102 | 53,43 | 3,497155846 |
| 22 | 110,35 | 6,712531624 | 104 | 52,17 | 3,58451013 |
| 24 | 111,73 | 6,674018673 | 2 | 73,62 | 4,328743444 |
| 26 | 112,79 | 6,651945869 | 4 | 70,28 | 2,964008525 |
| 28 | 112,9 | 6,684068198 | 6 | 70,56 | 2,983386341 |
| 30 | 114,52 | 6,750203888 | 8 | 72,43 | 2,750769469 |
| 32 | 115,62 | 6,684491323 | 10 | 73,41 | 2,817554589 |
| 34 | 115,56 | 6,72297433 | 12 | 76,26 | 3,189431806 |
| 36 | 115,73 | 6,520914294 | 14 | 76,95 | 3,384413897 |
| 38 | 117,18 | 6,526372297 | 16 | 79,66 | 3,48902097 |
| 40 | 116,77 | 6,453962842 | 18 | 81,43 | 3,875181248 |
| 42 | 114,92 | 6,271113831 | 20 | 82,96 | 4,130447198 |
| 44 | 114,24 | 6,162971866 | 22 | 85,21 | 4,146619761 |
| 46 | 112,98 | 5,922018493 | 24 | 88 | 4,351237448 |
| 48 | 112,13 | 5,842469037 | 26 | 89,57 | 4,12536227 |
| 50 | 109,74 | 5,764082448 | 28 | 91,49 | 4,109178328 |
| 52 | 108,93 | 5,798388839 | 30 | 92,14 | 3,921431341 |
| 54 | 106,21 | 5,675207467 | 32 | 92,69 | 3,838961287 |
| 56 | 104,84 | 5,495121804 | 34 | 95,33 | 3,594357514 |
| 58 | 102,8 | 5,455050482 | 36 | 95,1 | 3,926149955 |
| 60 | 99,63 | 5,264048064 | 38 | 94,23 | 3,988845834 |
| 62 | 96,3 | 5,630903188 | 40 | 95,03 | 3,906658444 |
| 64 | 94,47 | 5,607453553 | 42 | 95,19 | 3,732039498 |
| 66 | 92,52 | 5,684428491 | 44 | 97,49 | 4,078220346 |
| 68 | 88,57 | 5,599882755 | 46 | 95,43 | 4,041321223 |
| 70 | 85,83 | 5,773598916 | 48 | 99,28 | 3,981317758 |
| 72 | 82,68 | 6,026674712 | 50 | 98,2 | 4,351738016 |
| 74 | 79,28 | 5,818951969 | 52 | 96,63 | 4,235820843 |
| 76 | 75,67 | 5,528722065 | 54 | 94,58 | 4,439784135 |
| 78 | 73,03 | 5,078087208 | 56 | 95,06 | 4,359557612 |

| | | | | | |
|----|--------|-------------|-----|-------|-------------|
| 80 | 69,62 | 4,86957157 | 58 | 94,51 | 4,301968235 |
| 82 | 66,35 | 4,824966635 | 60 | 93,18 | 4,20631303 |
| 2 | 73,99 | 2,907652738 | 62 | 93,89 | 4,093704416 |
| 4 | 72,97 | 2,786892118 | 64 | 92 | 4,273403819 |
| 6 | 74,13 | 2,787616918 | 66 | 90,29 | 4,397906793 |
| 8 | 74,13 | 3,268011473 | 68 | 88,47 | 4,434361776 |
| 10 | 77,02 | 4,126729818 | 70 | 87,27 | 4,41175298 |
| 12 | 78,82 | 4,445812921 | 72 | 86,31 | 4,150963147 |
| 14 | 82,03 | 5,168777672 | 74 | 85,65 | 4,411393889 |
| 16 | 86,33 | 5,464402709 | 76 | 82,23 | 4,3041081 |
| 18 | 89,85 | 5,698440332 | 78 | 81,8 | 4,065698094 |
| 20 | 93,5 | 5,303896033 | 80 | 80,71 | 3,826484052 |
| 22 | 95,63 | 5,240971072 | 82 | 77,95 | 3,675312339 |
| 24 | 99,32 | 4,646884478 | 84 | 77,9 | 3,705842324 |
| 26 | 101,8 | 5,513985891 | 86 | 74,48 | 3,154848539 |
| 28 | 102,85 | 6,102450245 | 88 | 73,8 | 3,089522376 |
| 30 | 104,69 | 6,362286293 | 90 | 72,14 | 3,037586327 |
| 32 | 106,12 | 6,515374203 | 92 | 69,98 | 3,185393645 |
| 34 | 106,26 | 6,180157234 | 94 | 67,6 | 3,388974552 |
| 36 | 106,83 | 6,077039085 | 96 | 65,32 | 3,572419099 |
| 38 | 108,74 | 5,957119499 | 98 | 63,13 | 3,378235523 |
| 40 | 109,4 | 5,719009591 | 100 | 62,17 | 3,476996542 |
| 42 | 107,41 | 5,195365067 | 102 | 60,55 | 3,163467204 |
| 44 | 106,36 | 5,086166622 | 104 | 58,63 | 3,198050149 |
| 46 | 106,51 | 5,307694053 | 2 | 68,82 | 3,50151311 |
| 48 | 106,48 | 5,413190026 | 4 | 68,69 | 3,220233065 |
| 50 | 104,45 | 5,431622709 | 6 | 69,24 | 3,083748523 |
| 52 | 105,02 | 5,283823226 | 8 | 71,39 | 2,856328738 |
| 54 | 101,75 | 4,987610914 | 10 | 71,5 | 3,070233971 |
| 56 | 101,3 | 4,848200749 | 12 | 75,02 | 3,168970848 |
| 58 | 99,41 | 4,433788995 | 14 | 75,42 | 3,319966599 |
| 60 | 97,8 | 4,275842406 | 16 | 77,03 | 3,566205516 |
| 62 | 94,77 | 4,350444073 | 18 | 78,71 | 3,779569885 |
| 64 | 92,42 | 4,53088169 | 20 | 80,1 | 3,851603755 |
| 66 | 90,89 | 4,403614218 | 22 | 80,83 | 4,299896384 |
| 68 | 87,1 | 4,60675832 | 24 | 83,01 | 4,378842019 |
| 70 | 84,55 | 4,533545004 | 26 | 83,46 | 4,232547158 |
| 72 | 81,45 | 4,573474245 | 28 | 84,43 | 4,445623056 |
| 74 | 78,35 | 4,393234008 | 30 | 87,11 | 4,348346676 |
| 76 | 75,78 | 4,24164062 | 32 | 86,95 | 4,13061499 |
| 78 | 73,61 | 4,148493703 | 34 | 90,03 | 3,992567352 |
| 80 | 69,77 | 4,052321943 | 36 | 90,58 | 3,929200155 |

| | | | | | |
|----|--------|-------------|-----|-------|-------------|
| 82 | 67,85 | 3,937324631 | 38 | 90,38 | 3,761951253 |
| 2 | 73,18 | 2,690724809 | 40 | 91,37 | 3,659410763 |
| 4 | 73,08 | 2,784081736 | 42 | 91,84 | 3,499306862 |
| 6 | 74,09 | 2,913205739 | 44 | 92,41 | 3,920774827 |
| 8 | 76,85 | 4,000946858 | 46 | 92,3 | 3,974846656 |
| 10 | 79,54 | 4,314457724 | 48 | 93,41 | 3,89259261 |
| 12 | 81,34 | 3,706995843 | 50 | 93,9 | 3,935620524 |
| 14 | 81,59 | 3,559295697 | 52 | 95,22 | 4,209795273 |
| 16 | 82,66 | 3,898251356 | 54 | 91,65 | 3,986611256 |
| 18 | 84,53 | 3,865033615 | 56 | 91,96 | 3,707765466 |
| 20 | 87,14 | 3,781988147 | 58 | 91,56 | 3,550874944 |
| 22 | 88,28 | 4,170797952 | 60 | 89,33 | 3,92549423 |
| 24 | 91,96 | 4,355236022 | 62 | 90,1 | 3,858281565 |
| 26 | 93,03 | 4,804154347 | 64 | 88,16 | 4,252849947 |
| 28 | 93,3 | 4,889692312 | 66 | 88,39 | 4,041321223 |
| 30 | 95,66 | 4,634564912 | 68 | 86,07 | 4,090486427 |
| 32 | 98,43 | 4,593044808 | 70 | 85,98 | 4,255968436 |
| 34 | 99,24 | 4,54410485 | 72 | 85,22 | 4,069033018 |
| 36 | 100,07 | 4,250383227 | 74 | 83,6 | 4,059263943 |
| 38 | 101,15 | 4,073503939 | 76 | 81,47 | 3,942783858 |
| 40 | 100,72 | 4,075251743 | 78 | 80,93 | 3,713928826 |
| 42 | 100,03 | 4,041339412 | 80 | 79,85 | 3,676470542 |
| 44 | 100,06 | 4,03224378 | 82 | 76,8 | 3,532480126 |
| 46 | 99,23 | 4,294358526 | 84 | 75,91 | 3,548894682 |
| 48 | 99,39 | 4,232856093 | 86 | 73,85 | 3,305411105 |
| 50 | 98,18 | 4,409310627 | 88 | 73,92 | 3,548838884 |
| 52 | 97,45 | 4,459412925 | 90 | 70,95 | 3,311815033 |
| 54 | 95,64 | 4,480079364 | 92 | 70,44 | 3,161181631 |
| 56 | 95,83 | 4,581594712 | 94 | 66,44 | 3,093877698 |
| 58 | 98,1 | 4,379705262 | 96 | 64,68 | 3,139811434 |
| 60 | 93,02 | 4,201923561 | 98 | 62,8 | 2,878874918 |
| 62 | 90,17 | 4,334626847 | 100 | 61,6 | 2,51195163 |
| 64 | 89,84 | 4,464721422 | 102 | 58,97 | 2,336537169 |
| 66 | 87,84 | 4,687658415 | 104 | 57,71 | 2,494111878 |
| 68 | 84,43 | 4,559937533 | 2 | 70,38 | 3,123878016 |
| 70 | 82,02 | 4,426686747 | 4 | 69,72 | 2,998184269 |
| 72 | 79,3 | 4,053929382 | 6 | 70,33 | 2,845075648 |
| 74 | 76,72 | 3,858821718 | 8 | 72,27 | 3,147936618 |
| 76 | 73,28 | 3,623938368 | 10 | 73,18 | 3,021670904 |
| 78 | 71,26 | 3,413046863 | 12 | 76,08 | 3,259168332 |
| 80 | 69,85 | 3,488436888 | 14 | 77,08 | 3,70386472 |
| 82 | 67,38 | 3,884129844 | 16 | 78,4 | 3,954368433 |
| 2 | 74,44 | 3,254584955 | 18 | 79,82 | 4,129056661 |

| | | | | | |
|----|-------|-------------|-----|-------|-------------|
| 4 | 72,16 | 3,103338053 | 20 | 79,9 | 3,924031065 |
| 6 | 75,03 | 3,585760277 | 22 | 81,78 | 4,170025049 |
| 8 | 76,32 | 3,419728857 | 24 | 82,96 | 4,449785844 |
| 10 | 78,42 | 3,0786984 | 26 | 83,23 | 4,556705428 |
| 12 | 80,14 | 3,238093965 | 28 | 85,76 | 4,530119226 |
| 14 | 82,31 | 3,59768444 | 30 | 86,71 | 4,618194753 |
| 16 | 82,72 | 3,684748802 | 32 | 85,7 | 4,714628593 |
| 18 | 84,26 | 3,686228808 | 34 | 88,35 | 4,575137286 |
| 20 | 88,29 | 3,965240385 | 36 | 87,98 | 4,059312725 |
| 22 | 88,84 | 3,948455778 | 38 | 88,47 | 3,666546653 |
| 24 | 89,99 | 4,418727364 | 40 | 89,21 | 3,929653702 |
| 26 | 90,86 | 4,052733209 | 42 | 91,85 | 3,791627044 |
| 28 | 90,89 | 4,116718807 | 44 | 90,16 | 3,652098271 |
| 30 | 91,65 | 3,998421406 | 46 | 91,47 | 3,578870888 |
| 32 | 91,99 | 4,391210229 | 48 | 92,01 | 3,229566381 |
| 34 | 93,22 | 4,685201288 | 50 | 90,6 | 3,47143934 |
| 36 | 94,86 | 4,380904385 | 52 | 91,11 | 3,726437526 |
| 38 | 96,49 | 4,179060355 | 54 | 89,34 | 3,726995445 |
| 40 | 95,42 | 4,183131107 | 56 | 89,14 | 3,676012691 |
| 42 | 96,03 | 3,975823401 | 58 | 88,06 | 3,700575283 |
| 44 | 95,99 | 3,849426036 | 60 | 86,55 | 4,18029323 |
| 46 | 95,8 | 3,53910335 | 62 | 88,17 | 3,579230516 |
| 48 | 95,48 | 3,807170269 | 64 | 85,8 | 3,83764573 |
| 50 | 96,15 | 4,125248692 | 66 | 85,25 | 3,878603403 |
| 52 | 95,98 | 4,204326776 | 68 | 83,81 | 3,81570491 |
| 54 | 93,76 | 4,413294882 | 70 | 83,66 | 3,800182382 |
| 56 | 93,28 | 4,280753261 | 72 | 82,59 | 3,50394403 |
| 58 | 91,98 | 4,336781845 | 74 | 80,31 | 3,061417519 |
| 60 | 94,65 | 3,677326104 | 76 | 80,05 | 3,064811464 |
| 62 | 88,75 | 3,901243003 | 78 | 78,55 | 3,208991082 |
| 64 | 87,27 | 4,29671004 | 80 | 78,72 | 3,035858304 |
| 66 | 86,16 | 4,41466793 | 82 | 75,3 | 2,917105578 |
| 68 | 82,74 | 4,234585832 | 84 | 74,02 | 2,943931499 |
| 70 | 81,17 | 4,283053286 | 86 | 73,42 | 2,907722732 |
| 72 | 77,82 | 3,851747603 | 88 | 71,83 | 2,772317185 |
| 74 | 75,93 | 3,657716349 | 90 | 70,18 | 2,718874257 |
| 76 | 73,26 | 3,600280573 | 92 | 67,14 | 2,961736178 |
| 78 | 71,63 | 3,380439873 | 94 | 65,92 | 3,059055701 |
| 80 | 69,34 | 3,579458793 | 96 | 63,46 | 2,676076632 |
| 82 | 67,81 | 3,433921691 | 98 | 68,12 | 3,038010031 |
| | | | 100 | 61,5 | 2,817449166 |
| | | | 102 | 58,8 | 2,427360543 |
| | | | 104 | 57,71 | 2,494111878 |

| | | |
|----|-------|-------------|
| 2 | 71,94 | 2,813827245 |
| 4 | 72,04 | 2,835873449 |
| 6 | 72,87 | 2,850916129 |
| 8 | 74,5 | 2,881487515 |
| 10 | 74,53 | 2,871643542 |
| 12 | 77,36 | 3,08926599 |
| 14 | 80,67 | 3,979103835 |
| 16 | 80,48 | 3,762793359 |
| 18 | 81,73 | 4,058776092 |
| 20 | 82,68 | 4,125602266 |
| 22 | 84,37 | 4,138995908 |
| 24 | 84,51 | 4,503573938 |
| 26 | 86,39 | 4,344109475 |
| 28 | 86,94 | 4,177758175 |
| 30 | 89,97 | 4,199245571 |
| 32 | 89,78 | 4,558291325 |
| 34 | 92,49 | 4,443751871 |
| 36 | 92,13 | 4,464535721 |
| 38 | 93,28 | 4,283886456 |
| 40 | 94,26 | 3,896431472 |
| 42 | 94,25 | 4,007320035 |
| 44 | 95,02 | 4,27710923 |
| 46 | 93,19 | 3,844193255 |
| 48 | 94,84 | 3,691896398 |
| 50 | 92,86 | 3,509477973 |
| 52 | 95,76 | 3,248731664 |
| 54 | 93,23 | 3,28859415 |
| 56 | 92,17 | 3,318594478 |
| 58 | 91,03 | 3,312592237 |
| 60 | 89,03 | 3,840276393 |
| 62 | 88,98 | 3,553885059 |
| 64 | 86,77 | 3,603051512 |
| 66 | 87,85 | 3,61103918 |
| 68 | 85,73 | 3,955469956 |
| 70 | 84,46 | 3,794341801 |
| 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 |



Lanjutan

Kondisi Injeksi Ketinggian Step H

Rasio Injeksi 0.1 Temperatur Injeksi 100 °C dan 300 °C

| 2H 2 cm 0.1 100 | | | 2H 2 cm 0.1 300 | | |
|-----------------|----------|--------------------|-----------------|----------|--------------------|
| Posisi | Mean RGB | Standard Deviation | Posisi | Mean RGB | Standard Deviation |
| 2 | 91,39 | 3,631776147 | 2 | 91,79 | 3,248294036 |
| 4 | 94,41 | 3,612813895 | 4 | 96,92 | 3,295788558 |
| 6 | 97,46 | 3,854473984 | 6 | 100,08 | 3,543895021 |
| 8 | 101,44 | 4,038501572 | 8 | 104,17 | 3,866601358 |
| 10 | 105,11 | 4,47189879 | 10 | 105 | 3,959389811 |
| 12 | 105,41 | 4,532921104 | 12 | 107,11 | 4,206524514 |
| 14 | 106,87 | 4,736821165 | 14 | 107,42 | 4,259700753 |
| 16 | 108,04 | 4,640445816 | 16 | 111,2 | 4,417595671 |
| 18 | 109,82 | 4,812399809 | 18 | 111,36 | 4,491338466 |
| 20 | 113,46 | 4,833427376 | 20 | 112,79 | 4,546715987 |
| 22 | 116,23 | 4,972357935 | 22 | 114,45 | 4,671804531 |
| 24 | 117,84 | 5,046691085 | 24 | 113,51 | 4,695785775 |
| 26 | 117,3 | 5,028203286 | 26 | 113,91 | 4,712105622 |
| 28 | 120,2 | 5,138486198 | 28 | 114,28 | 4,923823758 |
| 30 | 118,65 | 5,205620506 | 30 | 114,93 | 4,991416875 |
| 32 | 121,7 | 5,207803003 | 32 | 119,19 | 5,308074657 |
| 34 | 119,26 | 5,347745678 | 34 | 120,47 | 5,582177628 |
| 36 | 119,12 | 5,352767622 | 36 | 119,12 | 5,558286198 |
| 38 | 115,52 | 5,261792912 | 38 | 114,59 | 5,399392035 |
| 40 | 111,83 | 5,453300363 | 40 | 114,63 | 5,357247522 |
| 42 | 108,49 | 5,413218016 | 42 | 112,7 | 5,284817209 |
| 44 | 107,16 | 5,515304693 | 44 | 112,07 | 5,347056209 |
| 46 | 103,72 | 5,403104233 | 46 | 108,74 | 5,267817289 |
| 48 | 100,69 | 5,040632877 | 48 | 101,59 | 4,746279777 |
| 50 | 98,35 | 4,799779035 | 50 | 99,96 | 4,556979329 |
| 52 | 93,6 | 4,752458162 | 52 | 98,72 | 4,383347736 |
| 54 | 91,96 | 4,775611442 | 54 | 95,05 | 4,236386396 |
| 56 | 88,01 | 5,1 | 56 | 92,51 | 4,179060355 |
| 58 | 83,83 | 5,316365053 | 58 | 88,46 | 4,391037704 |
| 60 | 79,66 | 5,085570794 | 60 | 84,22 | 4,545127261 |
| 62 | 76,77 | 4,760644638 | 2 | 84,17 | 3,152856649 |
| 64 | 71,83 | 4,070229438 | 4 | 90,52 | 2,664696242 |
| 66 | 69,33 | 4,209309068 | 6 | 94,2 | 2,961026303 |
| 68 | 66,58 | 4,05811321 | 8 | 97,4 | 3,011761456 |
| 2 | 78,93 | 2,927594248 | 10 | 97,02 | 2,977966223 |

| | | | | | |
|----|--------|-------------|----|--------|-------------|
| 4 | 85,54 | 2,969270223 | 12 | 99,27 | 3,120007122 |
| 6 | 92,64 | 2,826712407 | 14 | 103,24 | 3,297136805 |
| 8 | 97,85 | 3,473928874 | 16 | 106,48 | 3,704978905 |
| 10 | 96,15 | 3,409360259 | 18 | 106,37 | 3,686324714 |
| 12 | 95,82 | 3,379618053 | 20 | 108,47 | 3,777806001 |
| 14 | 97,28 | 3,339630416 | 22 | 108,71 | 3,9294151 |
| 16 | 99,24 | 3,423389542 | 24 | 108,18 | 3,998434037 |
| 18 | 102,46 | 3,577200531 | 26 | 107,91 | 4,012845536 |
| 20 | 105,56 | 4,058461668 | 28 | 108,99 | 4,229513906 |
| 22 | 107,86 | 4,080057437 | 30 | 110,7 | 4,164544914 |
| 24 | 109,81 | 3,870883281 | 32 | 116,48 | 4,708642387 |
| 26 | 110,26 | 4,111132951 | 34 | 117,26 | 4,883739253 |
| 28 | 112,74 | 4,518469393 | 36 | 117,1 | 4,846116846 |
| 30 | 112,12 | 4,851907883 | 38 | 114,84 | 4,831964278 |
| 32 | 114,2 | 5,230060741 | 40 | 114,44 | 4,8227575 |
| 34 | 113,68 | 5,361441085 | 42 | 111,29 | 4,916052864 |
| 36 | 112,37 | 5,663376942 | 44 | 107,66 | 4,746545793 |
| 38 | 110,21 | 5,86600375 | 46 | 101,84 | 4,277542956 |
| 40 | 105,44 | 5,888389535 | 48 | 95,39 | 3,951460541 |
| 42 | 101,56 | 5,313067557 | 50 | 93,69 | 3,849950806 |
| 44 | 100,28 | 5,065390589 | 52 | 92,37 | 3,966157339 |
| 46 | 95,72 | 4,456478657 | 54 | 88,4 | 3,879498041 |
| 48 | 93,68 | 4,306161899 | 56 | 85,74 | 3,904465198 |
| 50 | 92,12 | 4,010793518 | 58 | 81,79 | 4,07330556 |
| 52 | 88,1 | 4,10592083 | 60 | 77,82 | 3,726454702 |
| 54 | 87,06 | 4,189501067 | 2 | 80,38 | 3,021070785 |
| 56 | 83,18 | 4,404726571 | 4 | 89,44 | 3,25147985 |
| 58 | 79,61 | 4,301503143 | 6 | 92,37 | 2,688001774 |
| 60 | 76,33 | 4,010226825 | 8 | 92,47 | 2,808554753 |
| 62 | 74,3 | 3,775251681 | 10 | 96,41 | 2,835899017 |
| 64 | 69,44 | 3,488277628 | 12 | 94,44 | 2,652690649 |
| 66 | 67,49 | 3,574587636 | 14 | 95,87 | 2,820040117 |
| 68 | 64,07 | 3,514055472 | 16 | 97,02 | 2,863846393 |
| 2 | 76,03 | 2,194828633 | 18 | 96,85 | 2,93489972 |
| 4 | 82,07 | 3,210635734 | 20 | 98,87 | 2,94616683 |
| 6 | 92,64 | 3,083091719 | 22 | 99,8 | 2,998316026 |
| 8 | 96,19 | 3,142073561 | 24 | 100,27 | 3,277887346 |
| 10 | 92,66 | 2,978780172 | 26 | 100,4 | 3,513322408 |
| 12 | 91,32 | 3,004642872 | 28 | 102,34 | 3,668649602 |
| 14 | 92,75 | 2,91764053 | 30 | 105,66 | 4,045748486 |
| 16 | 93,05 | 2,797455554 | 32 | 110,54 | 4,333146849 |
| 18 | 94,59 | 2,860723226 | 34 | 108,75 | 4,262533509 |
| 20 | 97,59 | 3,008724687 | 36 | 109,34 | 4,243164438 |

| | | | | | |
|----|--------|-------------|----|--------|-------------|
| 22 | 99,95 | 3,229832532 | 38 | 108,36 | 4,328715488 |
| 24 | 102,14 | 3,178272194 | 40 | 105,64 | 3,878248068 |
| 26 | 102,83 | 3,393561938 | 42 | 101,68 | 3,484105323 |
| 28 | 104,98 | 3,951677818 | 44 | 96,57 | 3,075662038 |
| 30 | 105,91 | 4,216597796 | 46 | 92,78 | 2,816186977 |
| 32 | 108,55 | 4,761747833 | 48 | 89,66 | 3,175728661 |
| 34 | 105,95 | 4,744747229 | 50 | 90,18 | 3,098973437 |
| 36 | 105,36 | 4,885600363 | 52 | 90,95 | 3,358616237 |
| 38 | 102,69 | 4,916874675 | 54 | 85,18 | 3,671842078 |
| 40 | 95,98 | 4,499113268 | 56 | 82,48 | 3,901514857 |
| 42 | 94,38 | 3,448846975 | 58 | 77,59 | 3,679303294 |
| 44 | 93,84 | 3,359653662 | 60 | 72,72 | 3,213230226 |
| 46 | 92,79 | 3,248294036 | 2 | 82,69 | 3,193095455 |
| 48 | 91,78 | 3,442397567 | 4 | 90,08 | 2,983726908 |
| 50 | 88,03 | 3,528971006 | 6 | 91,88 | 2,690349382 |
| 52 | 83,82 | 3,843872206 | 8 | 93,06 | 2,718511179 |
| 54 | 83,46 | 3,867554757 | 10 | 98,6 | 2,474108349 |
| 56 | 79,49 | 3,833649526 | 12 | 95,29 | 2,989189276 |
| 58 | 76,41 | 3,679303294 | 14 | 97,22 | 2,986772184 |
| 60 | 73,73 | 3,581250275 | 16 | 97,51 | 2,82662307 |
| 62 | 71,97 | 3,505997747 | 18 | 97,37 | 2,71045488 |
| 64 | 66,86 | 3,498975319 | 20 | 98,6 | 2,474108349 |
| 66 | 64,11 | 3,422725596 | 22 | 98,83 | 2,474332886 |
| 68 | 61,96 | 3,396135653 | 24 | 98,34 | 2,625515822 |
| 2 | 75,88 | 2,194023102 | 26 | 99,41 | 2,995265625 |
| 4 | 82,87 | 3,027333393 | 28 | 101,69 | 2,911818481 |
| 6 | 92,23 | 2,806396014 | 30 | 105,21 | 3,370384985 |
| 8 | 94,92 | 2,953101434 | 32 | 107,77 | 3,951358288 |
| 10 | 90,96 | 3,041530715 | 34 | 106,21 | 3,728934096 |
| 12 | 90,21 | 3,2420688 | 36 | 105,93 | 3,516928757 |
| 14 | 91,18 | 3,179416121 | 38 | 103,79 | 3,257609584 |
| 16 | 91,81 | 3,037459731 | 40 | 100,92 | 3,096690968 |
| 18 | 93,78 | 2,973213749 | 42 | 95,04 | 2,628207516 |
| 20 | 96,91 | 2,974962864 | 44 | 94,56 | 2,567551992 |
| 22 | 99,01 | 2,972924962 | 46 | 93,9 | 2,743219372 |
| 24 | 98,92 | 2,638793725 | 48 | 90,49 | 2,88673385 |
| 26 | 99,16 | 2,569125151 | 50 | 89,805 | 2,978792888 |
| 28 | 103,13 | 2,769440012 | 52 | 89,12 | 3,306803516 |
| 30 | 103,89 | 3,578541546 | 54 | 85,74 | 3,735226793 |
| 32 | 107,25 | 4,038639135 | 56 | 81,21 | 3,726224292 |
| 34 | 107,33 | 4,190067621 | 58 | 76,83 | 3,446722935 |
| 36 | 105,3 | 4,110838102 | 60 | 74,54 | 3,086038944 |
| 38 | 101,08 | 3,221393136 | 2 | 83,87 | 3,326219682 |

| | | | | | |
|----|--------|-------------|----|--------|-------------|
| 40 | 92,86 | 3,091271518 | 4 | 90,26 | 2,687870247 |
| 42 | 93,71 | 3,194992926 | 6 | 94,68 | 2,597123506 |
| 44 | 92,31 | 3,371583568 | 8 | 96,46 | 2,775870052 |
| 46 | 90,95 | 3,270236145 | 10 | 104,27 | 3,103777431 |
| 48 | 90,43 | 3,417882267 | 12 | 101,91 | 3,002002699 |
| 50 | 86,92 | 3,600448906 | 14 | 101,31 | 2,970205584 |
| 52 | 81,76 | 3,851065706 | 16 | 100,19 | 2,732871358 |
| 54 | 81,5 | 3,812525873 | 18 | 100,86 | 2,636266108 |
| 56 | 77,46 | 3,710264223 | 20 | 104,27 | 3,103777431 |
| 58 | 72,71 | 3,334227153 | 22 | 101,43 | 2,775269575 |
| 60 | 69,87 | 3,301836037 | 24 | 103,14 | 3,055116589 |
| 62 | 68,8 | 3,296769156 | 26 | 106,44 | 3,31302907 |
| 64 | 66,32 | 3,339025443 | 28 | 110,21 | 3,627323359 |
| 66 | 63,61 | 3,145928907 | 30 | 112,04 | 3,773699522 |
| 68 | 60,66 | 3,104965069 | 32 | 110,86 | 3,687324726 |
| 2 | 77,45 | 2,84400841 | 34 | 109,56 | 3,761366612 |
| 4 | 86,55 | 3,322330325 | 36 | 110,19 | 3,813042477 |
| 6 | 96,39 | 3,004693299 | 38 | 107,64 | 3,427517876 |
| 8 | 99,17 | 3,162453337 | 40 | 95,84 | 2,281767877 |
| 10 | 94,81 | 2,813010896 | 42 | 97,21 | 2,527804973 |
| 12 | 94,11 | 2,842303092 | 44 | 95,86 | 2,708087401 |
| 14 | 95,68 | 2,852891498 | 46 | 94,02 | 2,744986247 |
| 16 | 97,55 | 2,896793769 | 48 | 92,58 | 2,853953487 |
| 18 | 99,58 | 3,117821047 | 50 | 91,3 | 2,927576997 |
| 20 | 102,55 | 3,5 | 52 | 90,03 | 3,089424777 |
| 22 | 102,92 | 3,410263771 | 54 | 88,99 | 3,214534542 |
| 24 | 106,6 | 3,662532104 | 56 | 87,98 | 3,393338691 |
| 26 | 107,04 | 3,47841831 | 58 | 78,27 | 3,326826983 |
| 28 | 108,47 | 3,574474603 | 60 | 72,37 | 2,717898029 |
| 30 | 109,16 | 3,909894209 | | | |
| 32 | 112,97 | 4,291064241 | | | |
| 34 | 111,7 | 4,584779386 | | | |
| 36 | 110,16 | 4,315160027 | | | |
| 38 | 100,46 | 3,086038944 | | | |
| 40 | 94,57 | 3,525534561 | | | |
| 42 | 96,65 | 3,551568156 | | | |
| 44 | 94,37 | 3,839336538 | | | |
| 46 | 93,6 | 3,850750943 | | | |
| 48 | 95,06 | 3,855522079 | | | |
| 50 | 92,52 | 3,942721206 | | | |
| 52 | 84,91 | 4,383382302 | | | |
| 54 | 83,83 | 4,20210385 | | | |
| 56 | 80,32 | 4,111771719 | | | |

| | | |
|----|-------|-------------|
| 58 | 76,25 | 3,696503945 |
| 60 | 74,37 | 3,580686126 |
| 62 | 71,61 | 3,299510218 |
| 64 | 67,6 | 3,455342811 |
| 66 | 65,41 | 3,300122434 |
| 68 | 62,82 | 3,150693366 |



Lanjutan

Kondisi Injeksi Ketinggian Step H

Rasio Injeksi 0.5 Temperatur Injeksi 100 °C dan 300 °C

| 2H 2 cm 0.5 100 | | | 2H 2 cm 0.5 300 | | |
|-----------------|----------|--------------------|-----------------|-----------|--------------------|
| Posisi | Mean RGB | Standard Deviation | Posisi | Mean RGB | Standard Deviation |
| 2 | 77,12 | 3,409078788 | 2 | 75,040404 | 7,81671351 |
| 4 | 81,14 | 3,94410441 | 4 | 79,030303 | 8,295818589 |
| 6 | 86,35 | 3,610800297 | 6 | 85,181818 | 8,818621253 |
| 8 | 90,54 | 3,301117044 | 8 | 88,767677 | 8,940521757 |
| 10 | 93,17 | 3,120654554 | 10 | 91,757576 | 9,076437471 |
| 12 | 95,93 | 3,042643056 | 12 | 92,060606 | 9,00056115 |
| 14 | 96,84 | 3,05412455 | 14 | 93,070707 | 8,976169348 |
| 16 | 97,31 | 3,277394259 | 16 | 96,313131 | 9,206118958 |
| 18 | 98,75 | 3,462278691 | 18 | 96,585859 | 9,163272099 |
| 20 | 101,7 | 3,702306134 | 20 | 98,636364 | 9,254401082 |
| 22 | 103,45 | 3,877870393 | 22 | 99,646465 | 9,295507767 |
| 24 | 107,55 | 4,100689767 | 24 | 98,30303 | 9,090254522 |
| 26 | 105,95 | 3,806891677 | 26 | 98,080808 | 8,967793103 |
| 28 | 108,11 | 3,89481655 | 28 | 98,434343 | 8,919499692 |
| 30 | 107,64 | 4,021457598 | 30 | 99,979798 | 9,015872648 |
| 32 | 109,4 | 4,109609335 | 32 | 104,73737 | 9,481907279 |
| 34 | 109,13 | 4,270299117 | 34 | 105,67677 | 9,485017425 |
| 36 | 108,42 | 4,682182 | 36 | 102,94949 | 9,089343299 |
| 38 | 106,07 | 4,501974875 | 38 | 101,39394 | 8,818317712 |
| 40 | 104 | 4,201971639 | 40 | 99,868687 | 8,599101433 |
| 42 | 99,5 | 3,672172175 | 42 | 96,787879 | 8,192698153 |
| 44 | 96,5 | 3,406766885 | 44 | 94,111111 | 7,774466106 |
| 46 | 94 | 3,284490644 | 46 | 87,949495 | 7,185141796 |
| 48 | 90,21 | 3,226453161 | 48 | 85,666667 | 6,998376435 |
| 50 | 86,36 | 3,356043847 | 50 | 82,979798 | 6,633249581 |
| 52 | 84,2 | 3,475745687 | 52 | 79,373737 | 6,287264665 |
| 54 | 81,69 | 3,471951101 | 54 | 77,727273 | 5,857879094 |
| 56 | 77,78 | 3,141703842 | 56 | 73,333333 | 5,13903658 |
| 58 | 73,68 | 2,673778396 | 58 | 69,353535 | 4,676126775 |
| 2 | 69,34 | 2,248321484 | 60 | 67,191919 | 4,384039003 |
| 4 | 74,16 | 2,364382167 | 2 | 72,555556 | 4,882498119 |
| 6 | 82,07 | 3,095304362 | 4 | 75,848485 | 5,179787835 |
| 8 | 89,76 | 2,927128424 | 6 | 80,79798 | 5,73643327 |
| 10 | 88,18 | 2,903776712 | 8 | 84,707071 | 6,021845752 |
| 12 | 86,61 | 2,905567627 | 10 | 85,424242 | 5,894150499 |

| | | | | | |
|----|--------|-------------|----|-----------|-------------|
| 14 | 87,93 | 2,807835357 | 12 | 85,868687 | 5,868345146 |
| 16 | 88,5 | 2,73215052 | 14 | 88,949495 | 5,907117775 |
| 18 | 90,37 | 2,754812135 | 16 | 92,010101 | 6,064393514 |
| 20 | 93,33 | 2,763598152 | 18 | 92,313131 | 5,967216836 |
| 22 | 94,68 | 2,845801444 | 20 | 93,353535 | 5,948227815 |
| 24 | 98,39 | 2,926351885 | 22 | 94,878788 | 5,939458874 |
| 26 | 97,94 | 2,936430871 | 24 | 93,545455 | 5,800478907 |
| 28 | 98,98 | 2,977966223 | 26 | 94,090909 | 5,751029772 |
| 30 | 100,02 | 3,004979033 | 28 | 95,40404 | 5,776817131 |
| 32 | 101,89 | 3,345115541 | 30 | 98,333333 | 6,036923425 |
| 34 | 103,36 | 3,888652229 | 32 | 99,919192 | 6,129544284 |
| 36 | 102,91 | 3,964730875 | 34 | 98,505051 | 5,92460202 |
| 38 | 100,85 | 3,641442161 | 36 | 98,939394 | 5,912245467 |
| 40 | 97,99 | 3,261328353 | 38 | 97,868687 | 5,611640139 |
| 42 | 94,58 | 2,796751362 | 40 | 94,565657 | 5,178198275 |
| 44 | 91,76 | 2,539068468 | 42 | 92,212121 | 4,769431281 |
| 46 | 88,54 | 2,451221093 | 44 | 89,191919 | 4,445812921 |
| 48 | 84,03 | 2,660807958 | 46 | 83,838384 | 4,018781664 |
| 50 | 81,31 | 2,592510581 | 48 | 84,030303 | 4,138645169 |
| 52 | 80,36 | 2,735918954 | 50 | 80,636364 | 3,912631706 |
| 54 | 78,38 | 2,394353627 | 52 | 76,545455 | 3,263573056 |
| 56 | 74,94 | 2,312984866 | 54 | 74,161616 | 2,935312693 |
| 58 | 71,39 | 2,295780055 | 56 | 69,454545 | 2,648498717 |
| 2 | 65,65 | 1,838834721 | 58 | 66,353535 | 2,462158042 |
| 4 | 70,01 | 1,961729808 | 60 | 63,262626 | 2,214985692 |
| 6 | 81,35 | 3,166666667 | 2 | 69,252525 | 2,424850303 |
| 8 | 89,24 | 3,120864941 | 4 | 72,89899 | 2,648784741 |
| 10 | 84,83 | 3,191070243 | 6 | 81,131313 | 3,833333333 |
| 12 | 82,34 | 3,140546179 | 8 | 83,050505 | 3,920987301 |
| 14 | 83,76 | 2,98859786 | 10 | 84,505051 | 3,678204986 |
| 16 | 83,12 | 2,731337039 | 12 | 85,242424 | 3,682815677 |
| 18 | 83,9 | 2,587850401 | 14 | 87,848485 | 3,69143152 |
| 20 | 87,05 | 2,396862427 | 16 | 89,828283 | 3,578541546 |
| 22 | 89,78 | 2,472393026 | 18 | 89,10101 | 3,531960854 |
| 24 | 93,08 | 2,464618314 | 20 | 91,343434 | 3,535262481 |
| 26 | 92,22 | 2,619198736 | 22 | 92,878788 | 3,34911416 |
| 28 | 93,02 | 2,974572374 | 24 | 90,626263 | 3,188742826 |
| 30 | 93,97 | 2,962578047 | 26 | 91,525253 | 3,291310875 |
| 32 | 95,85 | 3,160280642 | 28 | 93,616162 | 3,143632333 |
| 34 | 96,88 | 3,207566811 | 30 | 97,727273 | 3,580248849 |
| 36 | 96,83 | 3,213151636 | 32 | 99,191919 | 3,667823509 |
| 38 | 95,95 | 2,875795893 | 34 | 97,606061 | 3,381470602 |

| | | | | | |
|----|-------|-------------|----|-----------|-------------|
| 40 | 92,62 | 2,377419023 | 36 | 96,111111 | 3,153497337 |
| 42 | 90,21 | 2,175599302 | 38 | 93,909091 | 2,738133258 |
| 44 | 87,83 | 2,331406131 | 40 | 90,373737 | 2,518035951 |
| 46 | 87,2 | 2,470022288 | 42 | 86,676768 | 2,521743825 |
| 48 | 85,38 | 2,654441675 | 44 | 83,818182 | 2,69305129 |
| 50 | 79,49 | 2,52460618 | 46 | 80,686869 | 2,641146828 |
| 52 | 77,34 | 2,283980222 | 48 | 81,393939 | 2,814751904 |
| 54 | 76,18 | 2,110005027 | 50 | 81,242424 | 2,817979791 |
| 56 | 73,17 | 2,113233914 | 52 | 75,636364 | 2,714048748 |
| 58 | 70,14 | 2,32257259 | 54 | 73,212121 | 2,551984769 |
| 2 | 64,94 | 1,656453556 | 56 | 68,888889 | 2,894369316 |
| 4 | 70,38 | 1,884439203 | 58 | 65,191919 | 3,201183493 |
| 6 | 80,01 | 2,87972712 | 60 | 61,747475 | 3,400698086 |
| 8 | 87,4 | 3,025147129 | 2 | 71,181818 | 3,021070785 |
| 10 | 81,83 | 3,342578089 | 4 | 76,767677 | 3,255702069 |
| 12 | 80,96 | 3,001413808 | 6 | 82,909091 | 3,537661728 |
| 14 | 81,98 | 2,898902614 | 8 | 86,080808 | 3,274387906 |
| 16 | 81,62 | 2,521743825 | 10 | 85,89899 | 3,282937217 |
| 18 | 83,21 | 2,753491814 | 12 | 86,272727 | 3,329255081 |
| 20 | 86,82 | 2,289104628 | 14 | 89,525253 | 3,02180627 |
| 22 | 87,91 | 2,247759828 | 16 | 91,666667 | 2,802794421 |
| 24 | 90,91 | 2,122962481 | 18 | 91,343434 | 2,878622005 |
| 26 | 89,54 | 2,222111108 | 20 | 93,212121 | 2,760032206 |
| 28 | 90,93 | 2,640993844 | 22 | 93,909091 | 2,601398225 |
| 30 | 92,39 | 2,561939764 | 24 | 93,474747 | 2,738870961 |
| 32 | 94,59 | 2,818033558 | 26 | 94,686869 | 2,748204189 |
| 34 | 96,83 | 3,110928927 | 28 | 95,868687 | 2,724282873 |
| 36 | 96,3 | 3,192478534 | 30 | 98,717172 | 2,88703126 |
| 38 | 95,06 | 2,780959794 | 32 | 98,383838 | 2,955631502 |
| 40 | 92,53 | 2,320114069 | 34 | 96,040404 | 3,023059525 |
| 42 | 88,7 | 2,500505 | 36 | 95,252525 | 2,859610767 |
| 44 | 86,79 | 2,57138488 | 38 | 92,515152 | 2,842249785 |
| 46 | 84,99 | 2,622725084 | 40 | 88,909091 | 3,114903893 |
| 48 | 84,31 | 2,676855535 | 42 | 89,070707 | 3,400222809 |
| 50 | 79,9 | 2,595645149 | 44 | 90,888889 | 3,217690997 |
| 52 | 76,52 | 2,363356627 | 46 | 86,444444 | 3,975416883 |
| 54 | 75,07 | 2,17541358 | 48 | 84,535354 | 4,218896883 |
| 56 | 71,87 | 2,268159045 | 50 | 82,545455 | 4,469097032 |
| 58 | 67,69 | 2,19132818 | 52 | 78,050505 | 4,763614195 |
| 2 | 66,99 | 1,766666667 | 54 | 74,575758 | 4,874174367 |
| 4 | 72,68 | 1,857988485 | 56 | 70,212121 | 5,302362729 |
| 6 | 86,16 | 2,869976947 | 58 | 67,616162 | 5,620408339 |

| | | | | | |
|----|--------|-------------|----|-----------|-------------|
| 8 | 92,21 | 2,786312142 | 60 | 64,444444 | 5,988203893 |
| 10 | 86,72 | 3,269324831 | 2 | 72,333333 | 5,394310508 |
| 12 | 85,6 | 3,414171299 | 4 | 75,111111 | 5,193585788 |
| 14 | 86,87 | 2,997153532 | 6 | 82,929293 | 5,208879365 |
| 16 | 88,41 | 2,857190115 | 8 | 88,414141 | 4,649003369 |
| 18 | 90,35 | 2,479715689 | 10 | 91,545455 | 4,32114837 |
| 20 | 92,79 | 2,341091 | 12 | 93,69697 | 4,213925927 |
| 22 | 93,1 | 2,426703296 | 14 | 93,636364 | 4,205467821 |
| 24 | 97,44 | 2,471330562 | 16 | 94,535354 | 4,191513793 |
| 26 | 97,22 | 2,60760349 | 18 | 93,141414 | 4,407294229 |
| 28 | 96,81 | 2,517394035 | 20 | 95,323232 | 4,308917228 |
| 30 | 97,51 | 2,564304304 | 22 | 96,161616 | 4,262817866 |
| 32 | 100,39 | 2,688903498 | 24 | 96,818182 | 4,387896576 |
| 34 | 100,31 | 2,827337685 | 26 | 100,37374 | 4,157262114 |
| 36 | 100,52 | 3,059939922 | 28 | 102,76768 | 4,135776404 |
| 38 | 96,9 | 2,500505 | 30 | 102,78788 | 4,289745819 |
| 40 | 92,02 | 2,169485346 | 32 | 101,20202 | 4,531316396 |
| 42 | 91,36 | 2,359250009 | 34 | 100,9798 | 4,643274706 |
| 44 | 88,64 | 2,520702163 | 36 | 99,424242 | 4,829821085 |
| 46 | 87,95 | 2,528124629 | 38 | 95 | 5,007711225 |
| 48 | 88,63 | 2,699251673 | 40 | 92,959596 | 5,274782776 |
| 50 | 85,6 | 2,817693017 | 42 | 91,20202 | 5,553231837 |
| 52 | 80,6 | 2,745059842 | 44 | 88,909091 | 5,829773806 |
| 54 | 78,06 | 2,469286078 | 46 | 87,212121 | 6,21964142 |
| 56 | 74,53 | 2,162373369 | 48 | 86,333333 | 6,441806322 |
| 58 | 71,11 | 2,192249894 | 50 | 85,242424 | 6,725077447 |
| | | | 52 | 82,010101 | 7,197607627 |
| | | | 54 | 79,535354 | 7,391361324 |
| | | | 56 | 72,636364 | 7,904601652 |
| | | | 58 | 67,292929 | 8,513678833 |
| | | | 60 | 65,444444 | 8,757444164 |

Lanjutan

Kondisi Injeksi Ketinggian Step 2H**Rasio Injeksi 0.1 Temperatur Injeksi 100 °C dan 300 °C**

| 2H 4 cm 0.1 100 | | | 2H 4 cm 0.1 300 | | |
|-----------------|----------|--------------------|-----------------|----------|--------------------|
| Posisi | Mean RGB | Standard Deviation | Posisi | Mean RGB | Standard Deviation |
| 2 | 69,48 | 6,130697721 | 2 | 62,952 | 4,918928601 |
| 4 | 71,28 | 6,935605688 | 4 | 66,168 | 5,468541807 |
| 6 | 74,48 | 7,489359455 | 6 | 69,04 | 5,587684871 |
| 8 | 75,48 | 7,432497575 | 8 | 71,416 | 5,419484116 |
| 10 | 75,79 | 7,663760978 | 10 | 72,608 | 5,503203842 |
| 12 | 78,26 | 8,047359815 | 12 | 75,824 | 5,31926174 |
| 14 | 78,69 | 8,119928098 | 14 | 76,464 | 5,47940128 |
| 16 | 80,69 | 8,26785793 | 16 | 78,656 | 5,548464161 |
| 18 | 82,55 | 8,406797394 | 18 | 80,552 | 5,659880072 |
| 20 | 82,47 | 8,295617682 | 20 | 82,12 | 5,655738125 |
| 22 | 83,43 | 8,279529338 | 22 | 84,272 | 5,91218567 |
| 24 | 83,95 | 8,234412885 | 24 | 85,368 | 6,003862393 |
| 26 | 85,19 | 8,538321222 | 26 | 88,896 | 6,619957582 |
| 28 | 87,05 | 8,514248308 | 28 | 92,184 | 7,222097124 |
| 30 | 89,55 | 8,51543459 | 30 | 94,672 | 7,114106061 |
| 32 | 91,96 | 8,368917963 | 32 | 96,728 | 7,121024498 |
| 34 | 90,86 | 8,487685673 | 34 | 98,936 | 7,26004007 |
| 36 | 91,67 | 8,629354412 | 36 | 100,84 | 7,266048069 |
| 38 | 92,9 | 8,396127053 | 38 | 102,288 | 7,363601446 |
| 40 | 95,95 | 7,873206065 | 40 | 105,816 | 7,315204865 |
| 42 | 92,96 | 8,700307669 | 42 | 106,784 | 7,285629969 |
| 44 | 93,35 | 8,399585127 | 44 | 107,976 | 7,263378461 |
| 46 | 94,02 | 8,322999654 | 46 | 109,52 | 7,317475968 |
| 48 | 93,16 | 8,202881977 | 48 | 110,528 | 7,486985341 |
| 50 | 92,7 | 8,287144724 | 50 | 112,24 | 7,273169178 |
| 52 | 93,34 | 8,142940178 | 52 | 113,304 | 7,242767204 |
| 54 | 93,05 | 8,369467116 | 54 | 114,232 | 7,177820777 |
| 56 | 92,81 | 8,240936252 | 56 | 114,312 | 7,130663618 |
| 58 | 92,09 | 7,867713079 | 58 | 114,824 | 6,769591844 |
| 60 | 94,86 | 7,960787738 | 60 | 119,08 | 7,193396242 |
| 62 | 92,84 | 7,267917602 | 62 | 116,136 | 6,604337418 |
| 64 | 90,33 | 7,236349043 | 64 | 114,08 | 6,414944673 |
| 66 | 93,25 | 6,296343335 | 66 | 113,768 | 6,030721015 |

| | | | | | |
|-----|-------|-------------|-----|---------|-------------|
| 68 | 88,18 | 6,503115027 | 68 | 111,6 | 6,157035887 |
| 70 | 88,1 | 6,503301415 | 70 | 111,352 | 6,303269955 |
| 72 | 88,28 | 6,058769419 | 72 | 110,768 | 6,150338744 |
| 74 | 88,46 | 5,874822155 | 74 | 110,184 | 6,530201785 |
| 76 | 85,5 | 6,026037779 | 76 | 108,208 | 6,82630089 |
| 78 | 85,73 | 5,413889731 | 78 | 106,208 | 6,929835948 |
| 80 | 84,75 | 5,468689574 | 80 | 103,32 | 6,981034915 |
| 82 | 84,11 | 5,231789002 | 82 | 101,032 | 7,286759821 |
| 84 | 81,73 | 5,243283342 | 84 | 97,976 | 7,093110899 |
| 86 | 80,16 | 5,137935757 | 86 | 95,136 | 6,743017339 |
| 88 | 79,64 | 5,227201581 | 88 | 92,448 | 6,512334839 |
| 90 | 77,37 | 5,204223227 | 90 | 87,856 | 6,270630597 |
| 92 | 76,5 | 5,196152423 | 92 | 84,736 | 6,079739495 |
| 94 | 74,41 | 5,222513424 | 94 | 80,76 | 5,659308949 |
| 96 | 73,42 | 5,023540544 | 96 | 78,128 | 5,598015521 |
| 98 | 71,73 | 4,962190377 | 98 | 74,44 | 5,560275773 |
| 100 | 69,6 | 5,017142331 | 100 | 70,848 | 5,782802788 |
| 102 | 69,4 | 4,834639322 | 102 | 67,848 | 6,026364634 |
| 104 | 67,87 | 4,7644623 | 104 | 65,64 | 5,953311616 |
| 106 | 63,68 | 4,724490246 | 106 | 59,088 | 4,92575175 |
| 2 | 68,76 | 2,391567678 | 2 | 59,768 | 2,675345725 |
| 4 | 68,36 | 2,743293015 | 4 | 57,88 | 2,516109712 |
| 6 | 70,48 | 2,418280548 | 6 | 59,392 | 2,216193843 |
| 8 | 71,94 | 2,66977092 | 8 | 61,2 | 2,492412729 |
| 10 | 72,72 | 2,832281445 | 10 | 62,008 | 2,653356936 |
| 12 | 74,63 | 2,81286726 | 12 | 65,352 | 3,422135313 |
| 14 | 75,8 | 2,874478433 | 14 | 66,464 | 3,560955495 |
| 16 | 77,03 | 3,043306947 | 16 | 68,104 | 3,558046791 |
| 18 | 79 | 3,516196292 | 18 | 70,264 | 3,11741605 |
| 20 | 80,36 | 3,85735556 | 20 | 72,672 | 2,830997254 |
| 22 | 82,84 | 4,361725171 | 22 | 75,28 | 3,109126351 |
| 24 | 84,92 | 4,414576406 | 24 | 77,416 | 3,329861829 |
| 26 | 86,91 | 4,532921104 | 26 | 80,824 | 3,937529862 |
| 28 | 88,8 | 4,546060566 | 28 | 83,16 | 4,443528946 |
| 30 | 91,05 | 5,009838805 | 30 | 85,28 | 4,670993665 |
| 32 | 90,81 | 5,374265277 | 32 | 86,64 | 5,056249259 |
| 34 | 92,9 | 5,702205846 | 34 | 89,208 | 5,298170067 |
| 36 | 91,6 | 6,093546843 | 36 | 89,224 | 5,273250584 |
| 38 | 90,67 | 6,14480975 | 38 | 89,28 | 5,535924913 |
| 40 | 90,82 | 5,90048791 | 40 | 91,104 | 5,859086011 |
| 42 | 90,55 | 5,600099205 | 42 | 91,544 | 5,691132567 |
| 44 | 91,99 | 5,196142703 | 44 | 93,384 | 5,750458919 |

| | | | | | |
|-----|-------|-------------|-----|---------|-------------|
| 46 | 90,46 | 5,141276813 | 46 | 93,752 | 5,840809063 |
| 48 | 94,65 | 5,115583243 | 48 | 98,376 | 6,024285867 |
| 50 | 91,31 | 5,064622793 | 50 | 97,816 | 5,967682324 |
| 52 | 90,94 | 5,173397375 | 52 | 98,352 | 6,155920202 |
| 54 | 90,34 | 5,13105026 | 54 | 100,12 | 5,948219324 |
| 56 | 91,52 | 5,105908639 | 56 | 102,656 | 5,940581205 |
| 58 | 92,01 | 5,010080747 | 58 | 103,208 | 5,934822762 |
| 60 | 91,01 | 5,032209387 | 60 | 101,248 | 6,065834109 |
| 62 | 92,38 | 4,964072945 | 62 | 102,256 | 6,273851458 |
| 64 | 90,44 | 5,191912903 | 64 | 101,216 | 6,201140332 |
| 66 | 89,69 | 5,056638801 | 66 | 99,592 | 6,099337603 |
| 68 | 88,01 | 5,19225336 | 68 | 98,608 | 6,079639809 |
| 70 | 88,33 | 5,085243059 | 70 | 98,688 | 5,946767223 |
| 72 | 88,4 | 4,867953338 | 72 | 98,176 | 6,121794152 |
| 74 | 87,29 | 4,660808011 | 74 | 97,456 | 5,973645825 |
| 76 | 85,36 | 4,571585495 | 76 | 93,984 | 5,945000446 |
| 78 | 85,47 | 4,368054371 | 78 | 93,736 | 5,715573268 |
| 80 | 84,11 | 4,576830097 | 80 | 90,872 | 5,455226388 |
| 82 | 83,53 | 4,488942644 | 82 | 89,536 | 5,549920374 |
| 84 | 81,93 | 4,71673359 | 84 | 87,128 | 5,264892298 |
| 86 | 79,49 | 4,61769762 | 86 | 84,584 | 5,146058608 |
| 88 | 79,43 | 4,535505273 | 88 | 82,832 | 4,804080757 |
| 90 | 77,24 | 4,223838075 | 90 | 80,168 | 4,916052864 |
| 92 | 76,19 | 4,179543738 | 92 | 77,16 | 4,663148024 |
| 94 | 74,59 | 4,127011294 | 94 | 74,512 | 4,703362219 |
| 96 | 73,45 | 4,18601568 | 96 | 71,88 | 5,152963255 |
| 98 | 71,18 | 3,919338225 | 98 | 67,992 | 5,223287018 |
| 100 | 70 | 4,010088288 | 100 | 65,416 | 5,12836241 |
| 102 | 68,04 | 3,928451002 | 102 | 63,424 | 4,859812525 |
| 104 | 65,6 | 4,094835377 | 104 | 59,128 | 4,092602343 |
| 106 | 63,25 | 4,023604595 | 106 | 55,944 | 3,864510893 |
| 2 | 66,3 | 2,414183677 | 2 | 55,832 | 1,939983338 |
| 4 | 66,15 | 2,5 | 4 | 56,088 | 2,122010672 |
| 6 | 69,97 | 2,199426004 | 6 | 58,256 | 2,266934031 |
| 8 | 71,99 | 2,346262878 | 8 | 59,864 | 2,546754718 |
| 10 | 71,79 | 2,6904057 | 10 | 60,552 | 2,866367144 |
| 12 | 74 | 3,035147643 | 12 | 63,928 | 3,203832932 |
| 14 | 74,1 | 3,105875826 | 14 | 64,016 | 3,146201815 |
| 16 | 75,17 | 3,140015441 | 16 | 65,792 | 3,800903667 |
| 18 | 76,81 | 3,215162939 | 18 | 67,984 | 3,692690022 |
| 20 | 77,17 | 3,15925768 | 20 | 69,936 | 3,64644562 |
| 22 | 77,43 | 3,294485751 | 22 | 71,704 | 3,2244489 |
| 24 | 79,12 | 3,649491455 | 24 | 73,184 | 3,147806676 |

| | | | | | |
|-----|-------|-------------|-----|--------|-------------|
| 26 | 79,47 | 3,767095712 | 26 | 75,056 | 3,285659075 |
| 28 | 79,72 | 3,806108859 | 28 | 75,88 | 3,462278691 |
| 30 | 81,86 | 4,141487558 | 30 | 77,56 | 3,677326104 |
| 32 | 80,97 | 4,068740157 | 32 | 77,592 | 3,737592268 |
| 34 | 82,88 | 3,911340673 | 34 | 79,04 | 3,792603114 |
| 36 | 81,65 | 3,856975839 | 36 | 79,112 | 3,689720911 |
| 38 | 80,8 | 3,604150245 | 38 | 78,248 | 3,572326294 |
| 40 | 80,26 | 3,189692997 | 40 | 79,208 | 3,030134844 |
| 42 | 81,08 | 2,852183286 | 42 | 79,296 | 2,864904321 |
| 44 | 81,35 | 2,955477708 | 44 | 81,488 | 3,22872211 |
| 46 | 82,11 | 3,259469499 | 46 | 82,112 | 3,356043847 |
| 48 | 84,07 | 3,207488082 | 48 | 83,192 | 3,497459395 |
| 50 | 88,05 | 3,179400236 | 50 | 85,864 | 3,795411903 |
| 52 | 86,99 | 2,972924962 | 52 | 86,464 | 4,034397556 |
| 54 | 84,72 | 3,19747375 | 54 | 86,256 | 4,041151951 |
| 56 | 85,05 | 3,310146629 | 56 | 86,432 | 4,126582953 |
| 58 | 86,39 | 3,30562728 | 58 | 87,896 | 4,389277569 |
| 60 | 85,33 | 3,604304385 | 60 | 87,616 | 4,473219978 |
| 62 | 86,51 | 3,870361349 | 62 | 87,984 | 4,722565644 |
| 64 | 84,7 | 3,647331943 | 64 | 86,304 | 4,499786751 |
| 66 | 84,71 | 3,599368632 | 66 | 86,12 | 4,393234008 |
| 68 | 83,72 | 3,68200648 | 68 | 85,672 | 4,266607481 |
| 70 | 82,97 | 3,453749244 | 70 | 85,28 | 4,030189108 |
| 72 | 84,13 | 3,69453596 | 72 | 85,592 | 4,058897198 |
| 74 | 82,71 | 3,811982702 | 74 | 84,088 | 4,348214541 |
| 76 | 80,98 | 3,816445011 | 76 | 81,992 | 4,125542511 |
| 78 | 81,1 | 3,563280749 | 78 | 81,768 | 4,137278176 |
| 80 | 79,9 | 3,397860289 | 80 | 79,216 | 4,055125202 |
| 82 | 79,24 | 3,384814573 | 82 | 77,992 | 4,248576708 |
| 84 | 77,11 | 3,126604639 | 84 | 76,112 | 4,148798049 |
| 86 | 75,75 | 3,169854854 | 86 | 75,024 | 4,239258559 |
| 88 | 75,62 | 3,087217046 | 88 | 73,504 | 4,233774732 |
| 90 | 73,55 | 2,742759062 | 90 | 70,184 | 4,382829214 |
| 92 | 72,01 | 2,668541008 | 92 | 68,032 | 4,598901933 |
| 94 | 70,25 | 2,591263488 | 94 | 64,624 | 4,482468656 |
| 96 | 69,52 | 2,73577127 | 96 | 63,04 | 4,1706042 |
| 98 | 67,41 | 3,015431691 | 98 | 60,456 | 3,739645638 |
| 100 | 65,22 | 3,186397859 | 100 | 58,344 | 3,39415719 |
| 102 | 63,6 | 3,175028831 | 102 | 55,904 | 3,127848197 |
| 104 | 62,69 | 3,161303273 | 104 | 53,952 | 3,15690681 |
| 106 | 61,34 | 3,029217988 | 106 | 51,352 | 3,148496515 |
| 2 | 68,12 | 2,753436787 | 2 | 57,6 | 2,155565969 |
| 4 | 67,89 | 2,631952073 | 4 | 56,312 | 1,93268014 |

| | | | | | |
|----|-------|-------------|----|--------|-------------|
| 6 | 70,65 | 2,701944679 | 6 | 58,112 | 2,236158322 |
| 8 | 71,66 | 2,606208593 | 8 | 59,624 | 2,249377018 |
| 10 | 72,03 | 2,687250106 | 10 | 60,648 | 2,635020557 |
| 12 | 74,07 | 2,76432906 | 12 | 64,232 | 3,235831587 |
| 14 | 74,84 | 2,762373449 | 14 | 64,96 | 3,590109871 |
| 16 | 76,55 | 2,928008252 | 16 | 66,32 | 3,557606732 |
| 18 | 77,1 | 3,013437917 | 18 | 67,752 | 3,445667753 |
| 20 | 78,04 | 3,103988962 | 20 | 69,256 | 3,303671053 |
| 22 | 78,46 | 3,379737603 | 22 | 70,656 | 3,158698108 |
| 24 | 78,48 | 3,128494006 | 24 | 71,144 | 3,108330287 |
| 26 | 79,67 | 3,621080256 | 26 | 72,848 | 2,87032888 |
| 28 | 80,63 | 3,804980787 | 28 | 74,08 | 2,964435661 |
| 30 | 81,87 | 3,549519814 | 30 | 75,048 | 2,908347443 |
| 32 | 80,76 | 3,291003961 | 32 | 75,12 | 2,746899078 |
| 34 | 82,58 | 3,376029585 | 34 | 76,808 | 3,059989437 |
| 36 | 82,3 | 3,036811193 | 36 | 76,648 | 2,873406453 |
| 38 | 81,22 | 3,027083138 | 38 | 76,36 | 3,072770605 |
| 40 | 79,11 | 3,08759329 | 40 | 75,688 | 2,926351885 |
| 42 | 78,47 | 2,26280866 | 42 | 75,184 | 2,643765298 |
| 44 | 80,63 | 3,00052184 | 44 | 76,568 | 2,836611295 |
| 46 | 81,68 | 2,542090129 | 46 | 77,704 | 3,205598008 |
| 48 | 84,06 | 2,662193217 | 48 | 78,616 | 3,152215831 |
| 50 | 83,68 | 2,802884517 | 50 | 78,392 | 2,890230846 |
| 52 | 83,87 | 2,646343007 | 52 | 78,72 | 3,051742341 |
| 54 | 83,53 | 2,668389595 | 54 | 79,048 | 3,030801474 |
| 56 | 82,96 | 2,752115807 | 56 | 78,72 | 3,212978731 |
| 58 | 82,95 | 2,716857216 | 58 | 79 | 3,260956667 |
| 60 | 82,84 | 2,994000735 | 60 | 78,6 | 3,343544964 |
| 62 | 84,42 | 2,850411985 | 62 | 79,608 | 3,66940669 |
| 64 | 81,15 | 2,671869924 | 64 | 77,952 | 3,444568261 |
| 66 | 81,95 | 2,858179826 | 66 | 77,184 | 3,307414383 |
| 68 | 80,58 | 2,652157498 | 68 | 77,184 | 3,406707584 |
| 70 | 80,68 | 2,604890505 | 70 | 77,168 | 3,462409974 |
| 72 | 80,55 | 2,579542673 | 72 | 76,464 | 3,774395396 |
| 74 | 79,2 | 2,502523978 | 74 | 74,536 | 3,478810316 |
| 76 | 78,09 | 2,458113755 | 76 | 74,424 | 3,627768883 |
| 78 | 78,73 | 2,827909247 | 78 | 74,128 | 3,487988046 |
| 80 | 77,95 | 2,599048 | 80 | 72,408 | 4,041439388 |
| 82 | 76,95 | 2,315407332 | 82 | 70,6 | 4,432148395 |
| 84 | 75,04 | 2,522304542 | 84 | 68,304 | 4,412516632 |
| 86 | 73,34 | 2,26622099 | 86 | 67,112 | 4,444710851 |
| 88 | 73,05 | 2,379945675 | 88 | 65,44 | 4,042701367 |
| 90 | 70,83 | 2,074642479 | 90 | 62,16 | 3,594327742 |

| | | | | | |
|-----|-------|-------------|-----|--------|-------------|
| 92 | 69,9 | 2,254064791 | 92 | 60,064 | 3,27426451 |
| 94 | 69,62 | 2,377419023 | 94 | 58,344 | 3,134219733 |
| 96 | 67,36 | 2,451633139 | 96 | 57,616 | 3,107436502 |
| 98 | 65,67 | 2,640228793 | 98 | 57,816 | 3,120007122 |
| 100 | 63,43 | 2,727543758 | 100 | 52,968 | 2,958620345 |
| 102 | 62,07 | 2,629494709 | 102 | 51,4 | 2,945206686 |
| 104 | 61,41 | 2,741727687 | 104 | 50,4 | 2,885001269 |
| 106 | 59,51 | 2,694907281 | 106 | 47,312 | 2,437170076 |
| 2 | 67,61 | 2,473679629 | 2 | 54,672 | 2,305986938 |
| 4 | 68,66 | 2,515487382 | 4 | 55,376 | 2,007963942 |
| 6 | 71,45 | 2,664298191 | 6 | 57,32 | 2,026964691 |
| 8 | 74,1 | 2,645751311 | 8 | 58,984 | 2,173555482 |
| 10 | 74,06 | 2,901828055 | 10 | 60,488 | 2,300175663 |
| 12 | 75,19 | 2,873406453 | 12 | 61,904 | 2,662041443 |
| 14 | 76,24 | 2,792920343 | 14 | 63,928 | 2,988513363 |
| 16 | 76,39 | 2,722502562 | 16 | 64,064 | 3,06060006 |
| 18 | 78,5 | 3,131785562 | 18 | 65,72 | 3,343544964 |
| 20 | 78,05 | 3,033066921 | 20 | 66,752 | 3,37943872 |
| 22 | 79,43 | 3,414925647 | 22 | 68,36 | 3,089163203 |
| 24 | 81,12 | 3,590897583 | 24 | 69,928 | 3,172148365 |
| 26 | 81,35 | 3,391537299 | 26 | 71,552 | 2,746237095 |
| 28 | 82,27 | 3,606545677 | 28 | 72,672 | 2,537476676 |
| 30 | 84,54 | 3,497242781 | 30 | 74,256 | 2,491926357 |
| 32 | 84,88 | 3,843609415 | 32 | 75,112 | 2,522204423 |
| 34 | 87,73 | 3,113525398 | 34 | 76,28 | 2,724282873 |
| 36 | 87,46 | 3,003096046 | 36 | 77,568 | 2,79942274 |
| 38 | 87,64 | 2,855156597 | 38 | 77,216 | 2,840827878 |
| 40 | 82,08 | 3,422091038 | 40 | 74,712 | 2,957254391 |
| 42 | 79,83 | 2,582204054 | 42 | 73,664 | 2,615725559 |
| 44 | 83,27 | 2,635633824 | 44 | 75,864 | 2,763598152 |
| 46 | 84,74 | 2,695375763 | 46 | 75,752 | 3,145286677 |
| 48 | 86,66 | 2,387763418 | 48 | 76,424 | 2,982965103 |
| 50 | 86,23 | 2,493851024 | 50 | 77,04 | 2,96613887 |
| 52 | 85,95 | 2,315407332 | 52 | 77,456 | 3,160296623 |
| 54 | 85,43 | 2,590795674 | 54 | 77,032 | 3,046093706 |
| 56 | 85,74 | 2,61549385 | 56 | 76,624 | 3,26777965 |
| 58 | 86,18 | 2,649108865 | 58 | 76,88 | 3,154282002 |
| 60 | 85,05 | 2,910708199 | 60 | 75,528 | 3,181686866 |
| 62 | 84,38 | 2,60837811 | 62 | 75,656 | 3,585196838 |
| 64 | 83,99 | 2,679872604 | 64 | 74,328 | 3,387722932 |
| 66 | 82,51 | 2,787037093 | 66 | 74,496 | 3,242022065 |
| 68 | 80,19 | 2,439966054 | 68 | 72,992 | 3,306314742 |
| 70 | 80,37 | 2,51723353 | 70 | 72,056 | 3,682486534 |

| | | | | | |
|-----|-------|-------------|-----|--------|-------------|
| 72 | 81,38 | 2,73318551 | 72 | 71,816 | 3,425557538 |
| 74 | 80,3 | 2,698671577 | 74 | 70,72 | 3,673547263 |
| 76 | 77,68 | 2,004439517 | 76 | 68,12 | 4,033633848 |
| 78 | 78,53 | 2,14831388 | 78 | 69,168 | 4,001060465 |
| 80 | 77,8 | 1,792239162 | 80 | 67,272 | 4,055411648 |
| 82 | 76,71 | 2,24865841 | 82 | 66,728 | 4,102462921 |
| 84 | 75,31 | 2,259413529 | 84 | 64,232 | 3,822567227 |
| 86 | 73,18 | 2,266934031 | 86 | 62,416 | 3,381410858 |
| 88 | 72,16 | 2,053427782 | 88 | 61,352 | 3,164496864 |
| 90 | 70,07 | 2,094991623 | 90 | 58,648 | 2,897909382 |
| 92 | 69,72 | 2,160620936 | 92 | 57,632 | 2,703981352 |
| 94 | 66,83 | 2,420681096 | 94 | 56,144 | 2,742777476 |
| 96 | 65,48 | 2,289545851 | 96 | 53,872 | 2,705101802 |
| 98 | 64,26 | 2,298967709 | 98 | 52,232 | 2,811574202 |
| 100 | 62,19 | 2,359999144 | 100 | 50,824 | 2,438972296 |
| 102 | 60,81 | 2,168157995 | 102 | 49,584 | 2,45352766 |
| 104 | 60,06 | 2,339040639 | 104 | 49,208 | 2,376207827 |
| 106 | 58,31 | 2,334177337 | 106 | 45,848 | 2,008542363 |

Lanjutan

Kondisi Injeksi Ketinggian Step 2H

Rasio Injeksi 0.5 Temperatur Injeksi 100 °C dan 300 °C

| 2H 4 cm 0.5 100 | | | 2H 4 cm 0.5 300 | | |
|-----------------|----------|--------------------|-----------------|----------|--------------------|
| Posisi | Mean RGB | Standard Deviation | Posisi | Mean RGB | Standard Deviation |
| 2 | 78,17 | 3,660677317 | 2 | 89,25 | 4,441801011 |
| 4 | 80,98 | 4,276875807 | 4 | 93,22 | 4,228163022 |
| 6 | 84,88 | 4,971287836 | 6 | 96,18 | 4,037118371 |
| 8 | 86,12 | 5,020105624 | 8 | 99,25 | 4,357272627 |
| 10 | 88,31 | 5,106196122 | 10 | 101,66 | 4,393743599 |
| 12 | 91,54 | 4,869318877 | 12 | 105,08 | 4,7900509 |
| 14 | 92,05 | 4,888160709 | 14 | 105,63 | 5,078465079 |
| 16 | 94,35 | 4,982551169 | 16 | 109,75 | 5,352059853 |
| 18 | 96,54 | 4,710452113 | 18 | 113,17 | 5,998854415 |
| 20 | 98,82 | 4,79486857 | 20 | 115,25 | 5,747777099 |
| 22 | 99,76 | 4,619081148 | 22 | 118,29 | 5,688582041 |
| 24 | 101,57 | 4,952610475 | 24 | 121,08 | 5,626302827 |
| 26 | 104,81 | 5,332863489 | 26 | 125,28 | 5,924224397 |
| 28 | 107,38 | 5,69505347 | 28 | 130,77 | 6,044384091 |
| 30 | 109,84 | 5,782683892 | 30 | 133,53 | 6,201547584 |
| 32 | 112,2 | 5,899028693 | 32 | 136,68 | 6,401648198 |
| 34 | 114,15 | 6,02386434 | 34 | 139,54 | 6,123794502 |
| 36 | 115,35 | 6,096869796 | 36 | 142,64 | 6,135812569 |
| 38 | 117,77 | 6,178456502 | 38 | 144,52 | 6,284714588 |
| 40 | 120,87 | 6,082603637 | 40 | 147,67 | 6,322942054 |
| 42 | 121,96 | 6,326236076 | 42 | 148,82 | 6,60280842 |
| 44 | 123,04 | 6,154458753 | 44 | 150,25 | 6,785274383 |
| 46 | 124,12 | 6,184606347 | 46 | 151,11 | 6,911769061 |
| 48 | 125,9 | 6,189778599 | 48 | 152,75 | 7,177936077 |
| 50 | 127,63 | 6,078046943 | 50 | 154,64 | 7,498482092 |
| 52 | 128,21 | 6,156569704 | 52 | 155,3 | 7,740335954 |
| 54 | 129,77 | 6,096006664 | 54 | 155,92 | 7,714598782 |
| 56 | 129,52 | 6,070904783 | 56 | 156,38 | 7,434262305 |
| 58 | 130,87 | 6,123303468 | 58 | 157,36 | 7,457957765 |
| 60 | 136,42 | 6,35492679 | 60 | 161,62 | 7,141052484 |
| 62 | 131,65 | 6,229985135 | 62 | 159,34 | 6,86836215 |
| 64 | 129,71 | 6,426310422 | 64 | 156,28 | 6,742661787 |
| 66 | 129,13 | 6,629703155 | 66 | 156,28 | 6,619068699 |
| 68 | 126,48 | 6,347977734 | 68 | 153,83 | 6,58931174 |
| 70 | 126,59 | 6,414518541 | 70 | 152,76 | 6,436479209 |

| | | | | | |
|-----|--------|-------------|-----|--------|-------------|
| 72 | 125,92 | 6,501784053 | 72 | 153,04 | 6,476215406 |
| 74 | 125,29 | 6,498810359 | 74 | 151,92 | 6,541681715 |
| 76 | 123,91 | 6,517208914 | 76 | 149,89 | 6,652261068 |
| 78 | 121,53 | 6,801919453 | 78 | 148,46 | 6,699585821 |
| 80 | 119,25 | 6,8377741 | 80 | 144,93 | 6,891977631 |
| 82 | 116,24 | 6,992064107 | 82 | 142 | 7,15460405 |
| 84 | 112,56 | 6,650097537 | 84 | 139,86 | 7,026826358 |
| 86 | 109,96 | 6,352070312 | 86 | 135,95 | 7,361055458 |
| 88 | 108,15 | 6,067472144 | 88 | 132,61 | 7,45027906 |
| 90 | 102,89 | 5,672513155 | 90 | 125,98 | 7,32672109 |
| 92 | 100,31 | 5,249018072 | 92 | 122,57 | 6,879875653 |
| 94 | 96,24 | 4,827523466 | 94 | 116,8 | 6,257898789 |
| 96 | 92,51 | 4,776445644 | 96 | 112,81 | 6,113562327 |
| 98 | 88,44 | 5,14950453 | 98 | 108,69 | 5,349290186 |
| 100 | 84,81 | 5,447933812 | 100 | 103,73 | 5,137562133 |
| 102 | 82,41 | 5,157860248 | 102 | 99,93 | 5,04249553 |
| 2 | 74,86 | 2,57761811 | 104 | 98,42 | 5,106280245 |
| 4 | 75,39 | 2,610323478 | 2 | 79,4 | 2,630690526 |
| 6 | 78,06 | 2,338558827 | 4 | 77,86 | 2,811213432 |
| 8 | 79,98 | 2,71826424 | 6 | 81,51 | 3,265262865 |
| 10 | 81,58 | 3,064876962 | 8 | 84,42 | 3,410112312 |
| 12 | 85,12 | 3,256370969 | 10 | 87,42 | 3,832595551 |
| 14 | 86,58 | 3,158879918 | 12 | 90,39 | 3,04176964 |
| 16 | 88,55 | 3,014248808 | 14 | 91,92 | 3,217722349 |
| 18 | 90,73 | 2,682352919 | 16 | 94,06 | 2,956732663 |
| 20 | 93,43 | 2,40417735 | 18 | 96,07 | 3,143305492 |
| 22 | 95,12 | 2,474526578 | 20 | 98,67 | 3,218323025 |
| 24 | 97,37 | 2,978192503 | 22 | 101,95 | 3,507294803 |
| 26 | 100,62 | 3,142861327 | 24 | 105,63 | 3,886905279 |
| 28 | 103,41 | 3,575793234 | 26 | 109,95 | 4,190968649 |
| 30 | 105,57 | 4,077692647 | 28 | 114,23 | 5,135680556 |
| 32 | 107,59 | 4,077613639 | 30 | 118,14 | 5,450377521 |
| 34 | 110,01 | 4,407043917 | 32 | 121,13 | 5,962331643 |
| 36 | 109,54 | 5,003456709 | 34 | 125,9 | 6,313032666 |
| 38 | 109,66 | 5,800539879 | 36 | 128,11 | 6,645929948 |
| 40 | 110,66 | 5,731405764 | 38 | 128,25 | 6,88514949 |
| 42 | 110,2 | 5,885414291 | 40 | 128,86 | 6,840192266 |
| 44 | 109,65 | 5,684446284 | 42 | 128,64 | 6,875800484 |
| 46 | 109,37 | 5,523652671 | 44 | 128,03 | 6,654133408 |
| 48 | 112,37 | 5,684824103 | 46 | 127,55 | 6,515989453 |
| 50 | 111,84 | 5,138795238 | 48 | 130,58 | 6,051841474 |
| 52 | 112,61 | 4,836724134 | 50 | 130,78 | 5,958259738 |

| | | | | | |
|-----|--------|-------------|-----|--------|-------------|
| 54 | 113,22 | 4,972799726 | 52 | 131,11 | 6,045449994 |
| 56 | 115,84 | 5,271861699 | 54 | 133,63 | 6,322959038 |
| 58 | 115,9 | 4,934406519 | 56 | 136,89 | 6,050297485 |
| 60 | 115,07 | 5,106532606 | 58 | 138,28 | 5,882968749 |
| 62 | 115,5 | 5,183654591 | 60 | 135,46 | 5,96227761 |
| 64 | 114,21 | 4,915261317 | 62 | 136,75 | 5,798817867 |
| 66 | 112,64 | 5,008090533 | 64 | 135,2 | 5,917803966 |
| 68 | 111,18 | 4,956576907 | 66 | 134,55 | 5,889117169 |
| 70 | 111 | 5,192203546 | 68 | 132,74 | 6,217976378 |
| 72 | 110,56 | 5,182017711 | 70 | 132,49 | 6,164727567 |
| 74 | 108,97 | 5,04922079 | 72 | 133,04 | 6,360078724 |
| 76 | 106,7 | 4,707943678 | 74 | 131,57 | 6,462886379 |
| 78 | 106,11 | 4,511535425 | 76 | 127,83 | 6,339411986 |
| 80 | 103,64 | 4,387408765 | 78 | 128,27 | 6,019459424 |
| 82 | 102,23 | 4,50231422 | 80 | 124,7 | 6,022812446 |
| 84 | 98,55 | 4,1307819 | 82 | 122,79 | 6,00057271 |
| 86 | 96,68 | 3,872900163 | 84 | 120,65 | 5,951118177 |
| 88 | 95,36 | 3,706737851 | 86 | 116,57 | 5,871969497 |
| 90 | 92,38 | 3,931599449 | 88 | 114,95 | 5,708030757 |
| 92 | 88,73 | 4,227197775 | 90 | 111 | 5,547127054 |
| 94 | 85,45 | 4,343201821 | 92 | 106,8 | 5,087676304 |
| 96 | 81,81 | 3,932609943 | 94 | 103,23 | 4,577464221 |
| 98 | 78,07 | 3,410553159 | 96 | 100,16 | 4,387580097 |
| 100 | 76,07 | 3,414140798 | 98 | 96,77 | 4,173276544 |
| 102 | 73,36 | 3,38212783 | 100 | 93,59 | 4,119327298 |
| 2 | 74 | 2,371753524 | 102 | 90,69 | 4,113927397 |
| 4 | 73,81 | 2,589962119 | 104 | 85,77 | 4,390442799 |
| 6 | 76,99 | 2,145782245 | 2 | 77,05 | 2,55342402 |
| 8 | 78,4 | 2,106639398 | 4 | 75,96 | 2,52049162 |
| 10 | 79,17 | 2,272510533 | 6 | 80,04 | 3,099994457 |
| 12 | 81,83 | 2,658990778 | 8 | 82,6 | 3,487890194 |
| 14 | 82,62 | 2,921694243 | 10 | 84,58 | 3,964105486 |
| 16 | 84,77 | 3,438993349 | 12 | 86,85 | 4,016878051 |
| 18 | 87,12 | 3,382731059 | 14 | 87,48 | 3,922274263 |
| 20 | 88,19 | 3,40324032 | 16 | 90,42 | 3,464473599 |
| 22 | 89,01 | 3,319699351 | 18 | 92,38 | 3,230612275 |
| 24 | 91,69 | 3,119023495 | 20 | 93,1 | 3,205919675 |
| 26 | 94,18 | 3,104114053 | 22 | 94,24 | 2,994948496 |
| 28 | 95,5 | 3,020832593 | 24 | 96,68 | 2,982444338 |
| 30 | 97,16 | 3,082241843 | 26 | 99,97 | 3,145696072 |
| 32 | 97,73 | 3,290587169 | 28 | 101,63 | 3,588294735 |
| 34 | 100,4 | 3,656714861 | 30 | 105,76 | 3,726703121 |

| | | | | | |
|-----|--------|-------------|-----|--------|-------------|
| 36 | 99,61 | 3,935203266 | 32 | 106,05 | 4,266820363 |
| 38 | 98,98 | 4,03757055 | 34 | 109,98 | 4,738977082 |
| 40 | 98,57 | 3,505855436 | 36 | 112,32 | 5,280003449 |
| 42 | 97,08 | 3,513871627 | 38 | 110,65 | 4,852927164 |
| 44 | 96,87 | 3,224290327 | 40 | 109,52 | 4,763387717 |
| 46 | 98,15 | 3,482837154 | 42 | 107,99 | 4,232605398 |
| 48 | 98,7 | 3,296651691 | 44 | 106,84 | 3,877749551 |
| 50 | 100,43 | 3,01795173 | 46 | 108,47 | 3,701519378 |
| 52 | 101,5 | 3,191483512 | 48 | 111,35 | 3,818700594 |
| 54 | 100,87 | 3,257129373 | 50 | 113,23 | 3,976466424 |
| 56 | 100,85 | 3,511211792 | 52 | 115,71 | 4,401753009 |
| 58 | 103,03 | 3,707172393 | 54 | 115,56 | 4,315594475 |
| 60 | 101,43 | 3,891875183 | 56 | 115,64 | 4,10553959 |
| 62 | 101,06 | 4,041398741 | 58 | 118,63 | 4,493313092 |
| 64 | 100,11 | 3,651483717 | 60 | 117,11 | 4,684757216 |
| 66 | 99,72 | 3,613732637 | 62 | 118,06 | 4,982615827 |
| 68 | 98,76 | 3,727452259 | 64 | 117,03 | 5,014519297 |
| 70 | 98,27 | 3,68552826 | 66 | 117,19 | 5,03996059 |
| 72 | 98,26 | 3,680629849 | 68 | 115,76 | 5,019463834 |
| 74 | 96,24 | 3,586678292 | 70 | 114,58 | 4,791619976 |
| 76 | 94,65 | 3,454571402 | 72 | 116,31 | 5,060119662 |
| 78 | 94,02 | 3,587935588 | 74 | 114,2 | 4,971439046 |
| 80 | 91,41 | 3,652013049 | 76 | 111,55 | 4,740676326 |
| 82 | 90,43 | 3,462768344 | 78 | 111,32 | 4,761042509 |
| 84 | 88,08 | 3,723157078 | 80 | 107,8 | 4,468075956 |
| 86 | 85,59 | 3,752318871 | 82 | 105,84 | 4,375300677 |
| 88 | 84,97 | 3,661439964 | 84 | 104,34 | 4,249924196 |
| 90 | 81,18 | 3,494534269 | 86 | 101,6 | 4,041531599 |
| 92 | 78,64 | 3,236125552 | 88 | 100,09 | 4,114945311 |
| 94 | 76,21 | 3,121019802 | 90 | 96,56 | 3,827071683 |
| 96 | 74,29 | 3,316916187 | 92 | 93,99 | 3,865517441 |
| 98 | 71,96 | 3,378665122 | 94 | 90,19 | 4,090287927 |
| 100 | 68,81 | 3,004363951 | 96 | 87,57 | 4,691148351 |
| 102 | 66,53 | 3,084331593 | 98 | 85,28 | 4,396895382 |
| 2 | 73,45 | 2,44843733 | 100 | 82,05 | 4,201154521 |
| 4 | 73,44 | 2,409843431 | 102 | 78,4 | 3,389676312 |
| 6 | 76,55 | 2,204532975 | 104 | 70,76 | 2,521088035 |
| 8 | 78,35 | 2,327926972 | 2 | 78,98 | 3,058493329 |
| 10 | 79,42 | 2,367402843 | 4 | 76,37 | 2,726232815 |
| 12 | 82,53 | 3,134341707 | 6 | 80,15 | 3,184881598 |
| 14 | 83,78 | 3,190608534 | 8 | 82,43 | 3,572337881 |
| 16 | 84,71 | 3,207928858 | 10 | 85,42 | 3,992421945 |

| | | | | | |
|-----|-------|-------------|----|--------|-------------|
| 18 | 86,06 | 3,463109462 | 12 | 87,96 | 3,792683769 |
| 20 | 86,62 | 3,318372785 | 14 | 89,54 | 3,684595731 |
| 22 | 89,23 | 3,201662745 | 16 | 90,04 | 3,474471208 |
| 24 | 90,25 | 3,012181739 | 18 | 90,6 | 3,473667511 |
| 26 | 90,92 | 3,074811759 | 20 | 90,99 | 3,184645562 |
| 28 | 93,24 | 2,760484543 | 22 | 93,65 | 3,003327193 |
| 30 | 93,79 | 2,700348393 | 24 | 95,56 | 3,223157723 |
| 32 | 95,08 | 2,845574426 | 26 | 96,17 | 3,299321757 |
| 34 | 96,39 | 2,686073605 | 28 | 99,8 | 3,417598984 |
| 36 | 96,2 | 2,861418316 | 30 | 100,57 | 3,417661828 |
| 38 | 96,96 | 2,883438609 | 32 | 101,91 | 3,496469746 |
| 40 | 96,7 | 3,424442162 | 34 | 104,69 | 3,496254746 |
| 42 | 92,46 | 2,825160033 | 36 | 106,01 | 3,672685235 |
| 44 | 92,01 | 2,502061006 | 38 | 106,77 | 3,892371824 |
| 46 | 93,57 | 2,58967186 | 40 | 105,49 | 3,910510992 |
| 48 | 94,99 | 2,880867686 | 42 | 99,06 | 3,243318535 |
| 50 | 94,84 | 2,885932821 | 44 | 100,32 | 2,938114562 |
| 52 | 94,56 | 3,119539904 | 46 | 103,42 | 2,854542109 |
| 54 | 94,45 | 3,179313235 | 48 | 105,53 | 3,274753735 |
| 56 | 94,44 | 3,374053259 | 50 | 106,36 | 3,357334127 |
| 58 | 94,56 | 3,159389812 | 52 | 107,03 | 3,37112384 |
| 60 | 93,97 | 2,902888418 | 54 | 106,44 | 3,205015131 |
| 62 | 94,93 | 2,948367246 | 56 | 107,38 | 3,546300284 |
| 64 | 92,34 | 2,972670476 | 58 | 107,59 | 3,425351463 |
| 66 | 92,14 | 3,076278266 | 60 | 106,36 | 3,589790793 |
| 68 | 90,38 | 3,292805601 | 62 | 107,34 | 3,548237789 |
| 70 | 90,96 | 3,41234745 | 64 | 105,75 | 3,585929692 |
| 72 | 89,67 | 3,222191363 | 66 | 105,52 | 3,526592643 |
| 74 | 88,17 | 3,21758885 | 68 | 104,09 | 3,611354516 |
| 76 | 86,67 | 3,457305876 | 70 | 104,77 | 3,636158617 |
| 78 | 87,46 | 3,218156182 | 72 | 104,17 | 3,607010404 |
| 80 | 86,89 | 3,361457813 | 74 | 101,78 | 3,688033263 |
| 82 | 82,48 | 2,700388161 | 76 | 100,02 | 3,517445477 |
| 84 | 81,04 | 2,688231639 | 78 | 100,66 | 3,890467688 |
| 86 | 78,91 | 2,48902229 | 80 | 101,37 | 3,802580965 |
| 88 | 77,88 | 2,256719634 | 82 | 96,3 | 3,487058795 |
| 90 | 74,98 | 2,307959111 | 84 | 95,12 | 3,279439752 |
| 92 | 72,65 | 2,619071607 | 86 | 92,56 | 3,550113739 |
| 94 | 70,99 | 2,704282591 | 88 | 90,73 | 3,507049846 |
| 96 | 69,47 | 2,648793734 | 90 | 86,36 | 4,071129811 |
| 98 | 69,87 | 2,808041043 | 92 | 83,61 | 3,760752054 |
| 100 | 64,91 | 2,209009979 | 94 | 80,83 | 3,273901012 |
| 102 | 63 | 2,205799136 | 96 | 79,55 | 3,419703621 |

| | | | | | |
|----|-------|-------------|-----|--------|-------------|
| 2 | 73,11 | 2,552666889 | 98 | 80,12 | 3,315847608 |
| 4 | 74,51 | 2,275532867 | 100 | 75,44 | 2,939466604 |
| 6 | 76,88 | 2,107760574 | 102 | 73,82 | 2,738573575 |
| 8 | 78,94 | 2,530993448 | 104 | 70,76 | 2,521088035 |
| 10 | 79,02 | 2,56684685 | 2 | 73,85 | 2,478559262 |
| 12 | 83,04 | 3,139955622 | 4 | 74,7 | 2,389121968 |
| 14 | 84,47 | 3,234299905 | 6 | 77,02 | 2,566930522 |
| 16 | 85,03 | 3,510018797 | 8 | 80,52 | 3,365097794 |
| 18 | 86,03 | 3,592153295 | 10 | 82,69 | 3,619997437 |
| 20 | 88,69 | 3,193569032 | 12 | 86,26 | 3,603197559 |
| 22 | 89,19 | 2,995414594 | 14 | 88,26 | 3,410521672 |
| 24 | 89,82 | 3,231443189 | 16 | 90,51 | 3,25142052 |
| 26 | 91,19 | 2,986114774 | 18 | 91,35 | 2,926615335 |
| 28 | 93,33 | 2,750156197 | 20 | 93,8 | 2,819833414 |
| 30 | 94,62 | 2,718896266 | 22 | 94,85 | 3,001574615 |
| 32 | 95,13 | 2,809493907 | 24 | 95,35 | 3,007007852 |
| 34 | 97,9 | 3,07840695 | 26 | 97,08 | 3,184207163 |
| 36 | 97,23 | 3,144125324 | 28 | 99,18 | 3,314195491 |
| 38 | 98,95 | 3,227752295 | 30 | 100,75 | 3,295609127 |
| 40 | 96,99 | 3,211040608 | 32 | 101,32 | 3,309558686 |
| 42 | 91,65 | 2,308889515 | 34 | 104,75 | 3,686198369 |
| 44 | 93,65 | 2,767827252 | 36 | 106,05 | 3,760180911 |
| 46 | 92,92 | 2,876801692 | 38 | 107,07 | 4,018855901 |
| 48 | 94,39 | 3,021863345 | 40 | 106,32 | 3,405448434 |
| 50 | 94,42 | 2,816098786 | 42 | 96,74 | 2,402300587 |
| 52 | 95,1 | 2,832031741 | 44 | 101,08 | 2,916396649 |
| 54 | 93,36 | 2,834836371 | 46 | 102,37 | 2,568059826 |
| 56 | 93,72 | 2,693300202 | 48 | 103,79 | 2,882917158 |
| 58 | 93,2 | 2,823372931 | 50 | 103,96 | 2,982588361 |
| 60 | 91,19 | 3,206857451 | 52 | 105,17 | 3,114613323 |
| 62 | 90,99 | 2,866667666 | 54 | 104,35 | 3,136876059 |
| 64 | 89,36 | 3,119712021 | 56 | 104,59 | 3,127310143 |
| 66 | 89,27 | 3,051744473 | 58 | 105,02 | 3,142177873 |
| 68 | 87,9 | 3,189362959 | 60 | 102,13 | 2,923788556 |
| 70 | 87,58 | 3,214015698 | 62 | 103,17 | 2,800075171 |
| 72 | 86,2 | 3,30637726 | 64 | 100,57 | 3,26700547 |
| 74 | 85,59 | 3,30101385 | 66 | 101,36 | 3,026798974 |
| 76 | 82,59 | 2,908173693 | 68 | 99,39 | 3,064701765 |
| 78 | 83,06 | 3,077744075 | 70 | 99,15 | 3,119918549 |
| 80 | 83,04 | 3,205651689 | 72 | 98,56 | 2,856121719 |
| 82 | 82,68 | 3,107468003 | 74 | 97,38 | 3,234299905 |
| 84 | 77,13 | 1,839162087 | 76 | 94,75 | 2,997708174 |
| 86 | 77,14 | 1,958767408 | 78 | 94,76 | 2,884890726 |

| | | |
|-----|-------|-------------|
| 88 | 77,35 | 2,031591136 |
| 90 | 73,79 | 2,444442817 |
| 92 | 72,17 | 2,383631899 |
| 94 | 69,39 | 2,246847735 |
| 96 | 69,93 | 2,318358303 |
| 98 | 65,79 | 1,824682809 |
| 100 | 65,93 | 2,067742348 |
| 102 | 66,3 | 2,065767874 |

| | | |
|-----|-------|-------------|
| 80 | 94,42 | 2,809837896 |
| 82 | 95,95 | 3,210706156 |
| 84 | 91,44 | 2,978228561 |
| 86 | 88,99 | 3,432335624 |
| 88 | 88,82 | 3,457523298 |
| 90 | 84,48 | 3,647835116 |
| 92 | 82,32 | 3,535716145 |
| 94 | 78,43 | 2,750624734 |
| 96 | 78,06 | 2,907324262 |
| 98 | 75,47 | 2,56881242 |
| 100 | 74,81 | 2,702892367 |
| 102 | 74,73 | 2,763050881 |
| 104 | 73,47 | 2,779906115 |