



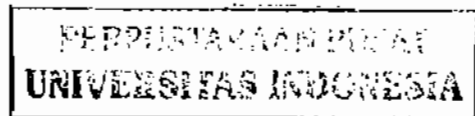
UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK SIFAT TRANSPORT DAN STRUKTUR
ALIRAN RESIRKULASI DI BAWAH PENGARUH
EKSITASI EKSTERNAL**

TESIS

**DAMORA RHAKASYWI
0806423955**

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
DEPOK
JUNI - 2010**





UNIVERSITAS INDONESIA

**KARAKTERISTIK SIFAT TRANSPORT DAN STRUKTUR
ALIRAN RESIRKULASI DI BAWAH PENGARUH
EKSITASI EKSTERNAL**

TESIS

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar MT

DAMORA RHAKASYWI

0806423955

**FAKULTAS TEKNIK
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
KEKHUSUSAN KONVERSI ENERGI**





**DEPOK
JUNI-2010**

HALAMAN PENGESAHAN

Tesis ini diajukan oleh :
Nama : Damora Rhakasywi
NPM : 0806423955
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tesis : Karakteristik Sifat Transport dan Struktur Aliran
Resirkulasi Di Bawah Pengaruh Eksitasi Eksternal.

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


DEWAN PENGUJI

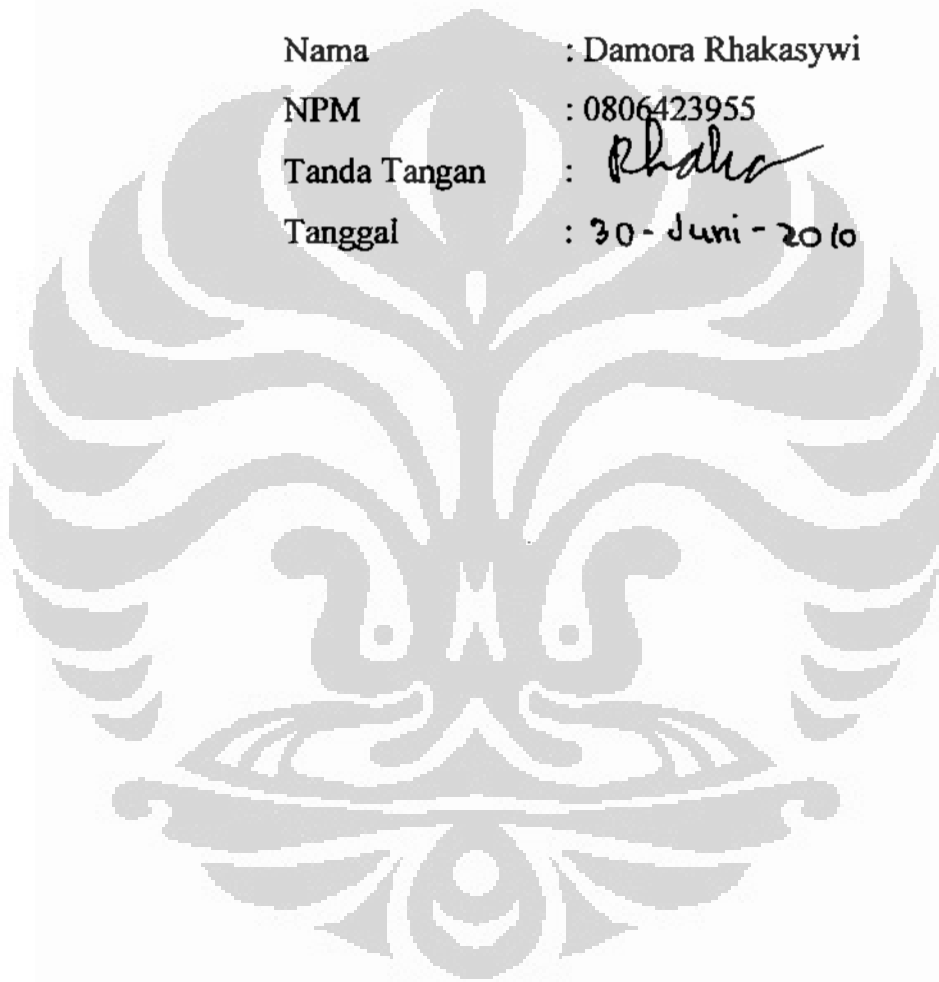
Pembimbing I : Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng ()
Pembimbing II: Ardiyansyah, S.T, M.Eng ()
Penguji I : Dr. Ir. Warjito, M.Eng ()
Penguji II: Dr. Ir. Engkos A.K, MT ()

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 30 - Juni - 2010

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

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

Nama : Damora Rhakasywi
NPM : 0806423955
Tanda Tangan : 
Tanggal : 30 - Juni - 2010



KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan segala rahmat dan karunianya, sehingga dapat menyelesaikan Tesis ini dengan judul Karakteristik Sifat Transport Dan Struktur Aliran Resirkulasi Di Bawah Pengaruh Eksitasi Eksternal.

Penulis menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan Tesis ini, sangatlah sulit bagi penulis untuk menyelesaikan Tesis ini. Oleh karena itu, penulis mengueapkan terima kasih kepada:

1. Dr. Ir. Harinaldi, M.Eng selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan penulis dalam penyusunan Tesis.
2. Dr. Ir. R. Danardono Agus Sumarsono DEA.PE selaku dosen wali pembimbing akademik.
3. Para dosen dan karyawan jurusan di Lingkungan Teknik Mesin Universitas Indonesia.
4. Rekan-rekan satu team mahasiswa SI yang ikut bergabung dalam kegiatan penelitian.
5. Ama Wijaya yang telah membantu dengan doa dan memberi semangat.
6. Bapak dan Mama yang telah memberikan semangat, moril dan materil.
7. Rekan-rekan di Program Pascasarjana Universitas Indonesia, khususnya angkatan 2008 bidang konversi energi jurusan teknik mesin.

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

Depok, 30 Juni 2010

Penulis

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

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

Nama : Damora Rhakasywi
NPM : 0806423955
Program Studi : Konversi Energi
Departemen : Teknik Mesin
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Tesis

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

” Karakteristik Sifat Transport Dan Struktur Aliran Resirkulasi Di Bawah Pengaruh Eksitasi Eksternal ”

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

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 11 - Juli - 2010

Yang menyatakan



(Damora Rhakasywi)

ABSTRAK

Nama : Damora Rhakasywi

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Karakteristik Sifat Transport Dan Struktur Aliran Resirkulasi Di Bawah Pengaruh Eksitasi Eksternal

Penelitian pertama yang dilakukan ini merupakan suatu penerapan kajian ilmu Mekanika Fluida dalam bidang rekayasa proses utamanya proses elektrokimia di bidang manufaktur. Penelitian ini mengkaji pemanfaatan aliran turbulensi yang ditimbulkan oleh aliran separasi bertaut kembali (*separating-reattached flow*) akibat gangguan terhadap aliran, untuk meningkatkan laju perpindahan massa antara dua sel elektrokimia pelat sejajar dalam suatu kanal aliran fluida elektrolit yang merupakan dasar dari proses electroplating pada berbagai peralatan yang digunakan di dunia industri. Plat tembaga dan larutan CuSO_4 dipilih sebagai elektroda dan elektrolit dalam penelitian ini.

Penelitian Kedua dilakukan dengan metode komputasi (CFD) untuk memprediksi medan aliran kecepatan, dan distribusi temperatur yang terjadi akibat injeksi jet panas pada aliran dalam kanal berkontur tangga (*backward facing step*). Dalam penelitian ini parameter yang menjadi perhatian adalah rasio spesifik momentum injeksi $I = 0.1$ dan $I = 0.5$ dengan jarak injeksi dari tangga $l_f = 2H$ (40mm) dan $l_f = 4H$ (80 mm) serta variasi temperatur injeksi $T_{inj} = 100^\circ\text{C}$ dan $T_{inj} = 300^\circ\text{C}$. Metode komputasi yang digunakan untuk menyelesaikan kondisi tersebut menggunakan metode volume hingga (*finite volume method*) yang mengganti persamaan-persamaan diferensial parsial dari kontinuitas, momentum, dan energi menjadi persamaan-persamaan aljabar. Model matematika yang dipergunakan untuk memvalidasi dari hasil eksperimental yang telah dilakukan terdahulu menggunakan persamaan aljabar K-omega dan K-epsilon untuk kondisi slot jet (2D). Hasil komputasi divalidasi dengan hasil eksperimental terdahulu yang dilakukan dengan pengukuran secara konvensional menggunakan termokopel yang ditujukan untuk menjelaskan efek dari geometris injeksi tersebut.

Kata kunci : *Electroplating, backward facing step, finite volume method*

ABSTRACT

Name : Damora Rhakasywi
Study Program : Mechanical Engineering
Title : Characteristics of Transport Properties and Recirculation Flow Structure Under External Excitation

The first study conducted was an application of science study in the field of Fluid Mechanics engineering major process of electrochemical processes in manufacturing. This study investigated the use of flow turbulence caused by separating-reattached flow due to disruption of the flow, to increase the rate of mass transfer between two parallel plate electrochemical cell in an electrolyte fluid flow channel which is the basis of the electroplating process on the various equipment used in industry. Copper plate and CuSO_4 solution was chosen as the electrode and the electrolyte in this study.

Both the research carried out by computational methods (CFD) to predict the flow field velocity, and the temperature distribution caused by injection of hot jet on the flow in channel contoured stairs (backward facing step). In this study the parameter of concern is a specific ratio of momentum injection $I = 0.1$ and $I = 0.5$ the injection distance from the stairs $l_f = 2H$ (40mm) and $l_f = 4H$ (80 mm) and temperatur variations Injection $T_{inj} = 100^\circ\text{C}$ and $T_{inj} = 300^\circ\text{C}$. Computational methods used to resolve these conditions using finite volume method that replace the partial differential equations of continuity, momentum, and energy into algebraic equations. The mathematical model used to validate the experimental results that have been done earlier using algebraic equations K-omega and K-epsilon to the condition of slot jet (2D). Computational results are validated by the results of previous experimental measurements performed with conventional using a thermocouple which is intended to clarify the effect of geometric injection.

Keywords : *Electroplating, backward facing step, finite volume method*

DAFTAR ISI

JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI	
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS	v
ABSTRAK	vi
ABSTRACT	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR SIMBOL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
I.1 Latar Belakang	1
I.2 Tujuan Penelitian	3
I.3 Batasan Masalah	3
I.4 Metodologi Penelitian	4
I.5 Sistematika Penulisan	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
II.1 Backward Facing Step	8
II.2 Lapisan Batas dan Lapisan Geser	9
II.3 Separasi	10
II.4 Pengertian Sistem Dan Volume Kendali	10
II.5 Aliran Laminar Dan Turbulen	11
II.6 Kecepatan Aliran Udara Rata-rata	11
II.7 Konsep Elektrokimia	13
II.8 Tembaga	15
II.9 Larutan Elektrolity (CuSo ₄)	16
II.10 Perpindahan Massa	18
II.11 Model Matematika Untuk Aliran Turbulen	20
II.12 Type Meshing	21
BAB III METODE PENELITIAN	22
III.1 Aplikasi Kontrol Turbulensi Pada Perpindahan Massa Konvektif Dalam Pengembangan Proscs Elektrokimia Di Bidang Manufaktur	22
III.11 Metode Komputasi Untuk Proses Elektrokimia	23
III.12 Peralatan Penelitian Mass Transfer	24
III.2 Kajian Struktur Thermal Aliran	32
III.2.1 Metode Komputasi Untuk Proses Heat Transfer	33
III.2.2 Peralatan Pcnclitian Heat Transfer	34
III.2.3 Peralatan Pengukuran	38
III.2.4 Kondisi Percobaan	39
III.2.5 Prosedur Pengambilan Data	40

BAB IV	HASIL DAN PEMBAHASAN	42
IV.1	Kajian Perpindahan Massa Konvektif Dalam Pengembangan Proses Elektrokimia	42
IV.11	Garis Aliran (<i>Stream Function</i>)	42
IV.12	Tingkat Turbulensi	43
IV.2	Karakteristik Perpindahan Massa Konvektif-Kontrol Hidrodinamika	45
IV.2.1	Distribusi Koefisien Perpindahan Massa	45
IV.2.2	Koefisien Perpindahan Massa Maksimum	47
IV.2.3	Relasi Tak Berdimensi Perpindahan Massa	47
IV.3	Karakteristik Perpindahan Massa Konvektif - Kontrol Akustik Mekanik	48
IV.3.1	Distribusi Koefisien Perpindahan Massa	48
IV.3.2	Koefisien Perpindahan Massa Maksimum	50
IV.3.3	Relasi Tak Berdimensi Perpindahan Massa	51
IV.3.4	Karakteristik Permukaan Elektroda Hasil Proses Elektrokimia	52
IV.4	Kajian Struktur Aliran Thermal Dengan Injeksi Udara Gas Panas	53
IV.4.1	Kecepatan Rata-rata (<i>Velocity Magnitude</i>)	53
IV.4.2	Tingkat Turbulensi Dengan Injeksi Udara Panas	57
IV.4.3	Perbandingan Hasil CFD dan Eksperimen Dengan Slot Injeksi Udara Panas	59
IV.4.4	Kecepatan Medan Aliran Arah Sumbu X (<i>Velocity Profile V_x</i>)	61
IV.4.5	Kecepatan Medan Aliran Arah Sumbu Y (<i>Velocity Profile V_y</i>)	65
IV.4.6	Turbulensi Intensiti Pada Jarak Injeksi 2H dan 4H	69
IV.4.7	Perbandingan Hasil Eksperimen dan CFD Untuk Nilai Temperatur Yang Terukur Di Sekitar Daerah Injeksi	73
IV.4.8	Pengaruh Profile Temperatur Terhadap Rasio Injeksi	75
IV.4.9	Perbandingan Injeksi Jet Tanpa Pemanas Hasil Eksperimen Terdahulu dengan Kajian Komputasi	77
IV.4.10	Perbandingan Hasil Eksperimental VS CFD Tanpa Pemanas Injeksi Arah Medan Aliran Horizontal (Sumbu X)	78
IV.4.11	Perbandingan Hasil Eksperimental VS CFD Tanpa Pemanas Injeksi Arah Medan Aliran Horizontal (Sumbu Y)	79
IV.4.12	Tingkat Turbulensi Tanpa Injeksi Udara Panas	81
IV.5	Hasil Visualisasi Aliran Resirkulasi Dengan Menggunakan Metode Light Sheet	82
IV.5.1	Ketinggian Step 1H Jarak Injeksi 2H	82
IV.5.2	Ketinggian Step 2H Jarak Injeksi 2H	88

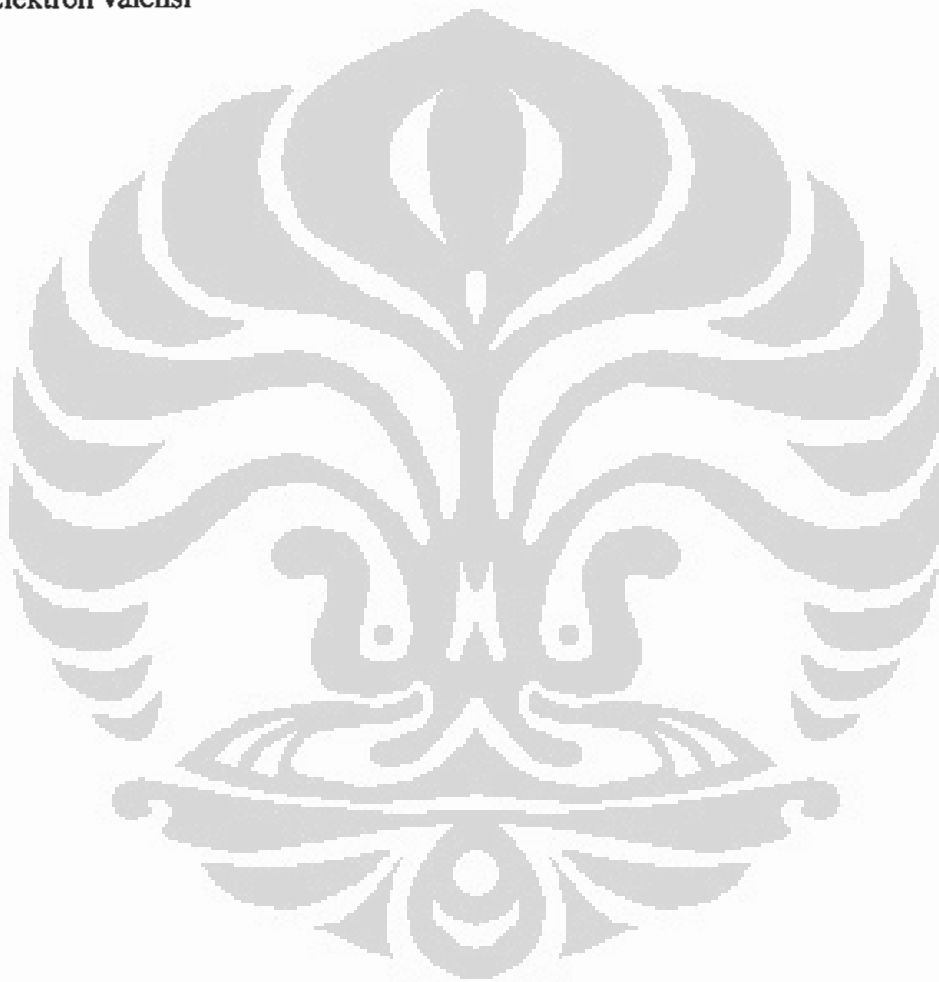
IV.5.3 Analisa Kualitatif	94
IV.5.4 Ketinggian Step H Jarak Injeksi 2H	96
IV.5.5 Ketinggian Step 2H Jarak Injeksi 2H	102
IV.6 Hasil Visualisasi Aliran Resirkulasi Dengan Menggunakan Ligth Sheet	109
IV.6.1 Ketinggian Step 1H Jarak Injeksi 4H	109
IV.6.2 Ketinggian Step 2H Jarak Injeksi 4H	114
IV.6.3 Analisa Kualitatif	118
IV.6.4 Ketinggian Step H Jarak Injeksi 4H	119
IV.6.5 Ketinggian Step 2H Jarak Injeksi 4H	123
BAB V KESIMPULAN	129
DAFTAR PUSTAKA	131



DAFTAR SIMBOL

H	= Ketinggian <i>Step</i> (mm)
I	= Rasio Momentum Spesifik Injeksi
l_r	= Jarak letak injeksi dari <i>step</i> (mm)
t_{inj}	= Temperatur injeksi ($^{\circ}\text{C}$)
t_0	= Temperatur dingin ($^{\circ}\text{C}$)
V_i	= Kecepatan udara injeksi (m/s)
V_0	= Kecepatan aliran udara rata-rata (<i>free stream</i>) (m/s)
ρ_i	= Masa jenis udara injeksi (kg/m^3)
ρ_0	= Masa jenis aliran udara rata-rata (kg/m^3)
x_r	= Jarak <i>reattachment point</i> dari <i>step</i> (mm)
x	= Jarak horizontal (mm)
y	= Jarak vertikal dari pelat dasar (mm)
z	= Jarak melintang (mm)
A	= Luas (m^2)
C	= Konsentrasi larutan (mol/m^3)
D	= Koefisien Difusi massa (m^2/s)
d	= Diameter pipa (m)
d_h	= Diameter hidrolis (m)
e	= Muatan listrik (C/mol)
F	= Konstanta Faraday (A.s/mol)
I	= Arus (Ampere)
K_m	= Koefisien perpindahan massa (m/s)
\dot{M}	= Fluks massa (kg/s)
M_r	= Berat molekul (gr/mol)
m	= Massa (kg)
N	= Jumlah molekul (mol^{-1})
P	= Parameter atau keliling pipa (m)
Q	= Debit aliran (m^3/s)

- Re = Bilangan Reynolds
Sc = Bilangan Schmidt
Sh = Bilangan Sherwood
T = Temperatur K
t = Waktu (s)
u = Kecepatan (m/s)
V = Volume m³
z = Elektron valensi

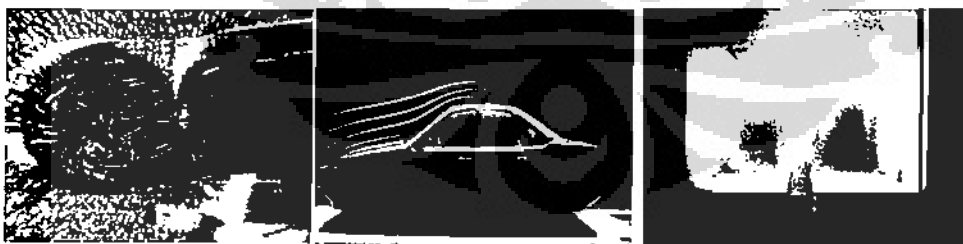


BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa dekade terakhir, semakin meningkat tingkat kesadaran manusia atas konservasi energi melalui upaya-upaya memanfaatkan energi secara efektif dan efisien di berbagai sektor kehidupan masyarakat modern. Termasuk diantaranya adalah pemakaian energi di bidang transportasi pembangkitan daya, proses industri dan lain-lain. Kesadaran tersebut dipicu bukan saja atas alasan ekonomis untuk mengembangkan proses atau produk berbiaya murah namun juga ditujukan untuk menekan dampak yang merusak lingkungan akibat konversi atau proses perpindahan energi yang tidak efisien. Berdasarkan pertimbangan di atas, kajian ilmu dan teknologi termofluida, baik dalam platform riset fundamental maupun riset terapan memegang peranan penting. Salah satunya, kajian mengenai medan aliran resirkulasi yang terbentuk akibat proses separasi aliran memiliki arti penting dan relevansi yang tinggi karena aplikasinya yang luas di berbagai bidang rekayasa teknik. Beberapa contohnya antara lain *vortex shedding* pada aerodinamika *bluff body* yang terdapat pada geometri aerofoil, interaksi antara sudu dan olakan (*wake-blade interaction*) pada mesin-mesin turbo, konveksi Benard pada aliran dengan bilangan Rayleigh tinggi, peningkatan laju perpindahan massa antara dua sel elektro kimia, jet-jet pulsatif pada kontrol aliran aktif, mekanisme *flame holding* pada berbagai jenis *combustor*, dan lain-lain. Gambar 1 mengilustrasikan beberapa aspek aplikasi keteknikan yang disebutkan di atas.

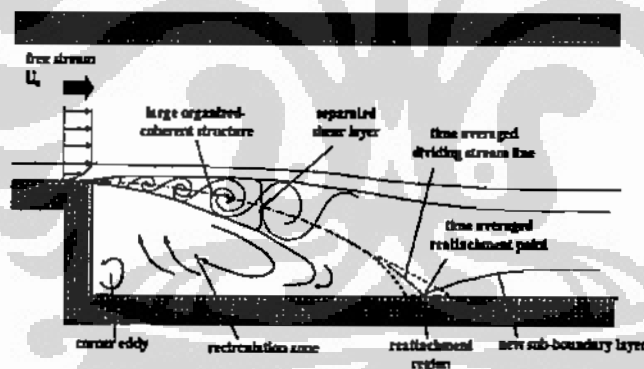


a. aliran pada outlet pompa b. aliran di sekitar body mobil c. aliran pada dump combustor

Gambar 1. Beberapa aspek terapan aliran resirkulasi dari proses separasi

Medan aliran resirkulasi terutama terbentuk akibat proses separasi aliran, baik yang tanpa diikuti proses pertautan kembali aliran dengan suatu batas padat

(*solid boundary*) seperti pada aliran melewati *bluff body* ataupun yang diikuti oleh proses pertautan kembali aliran dengan suatu batas padat seperti aliran kanal dengan perbesaran mendadak. Medan aliran seperti ini biasanya bersifat sangat kompleks dengan berbagai struktur aliran yang memiliki tingkat turbulensi tinggi serta tidak tunak (*unsteady*). Contoh konfigurasi kanal yang paling sederhana berupa perbesaran mendadak dengan *backstep* seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2, menunjukkan struktur turbulensi di zona resirkulasi (*recirculation zone*), lapisan geser (*shear layer*) dan lapisan batas berkembang kembali (*redeveloping boundary layer*). Dalam hal ini, berbagai sifat transport turbulensi aliran yang sangat ditentukan oleh intensitas turbulen dapat mendukung laju perpindahan momentum, panas dan massa beberapa orde lebih cepat dibandingkan dengan yang dihasilkan dari sifat transport molekular. Sayangnya, struktur aliran seperti ini disifatkan juga oleh instabilitas inheren yang kuat sehingga diperlukan suatu metode yang tepat untuk mengendalikan peningkatan sifat transport turbulensi. Salah satu teknik yang menjadi kandidat adalah dengan memberikan suatu eksitasi eksternal terhadap aliran seperti dengan injeksi jet kontinyu maupun pulsatif.



Gambar 2. Fitur umum aliran resirkulasi pada geometri *backstep*

1.2 Tujuan Penelitian

Potensi eksitasi eksternal untuk meningkatkan sifat transport turbulensi telah banyak diindikasikan oleh berbagai penelitian terkini dalam kajian dinamika fluida terkait. Namun demikian, masih banyak masalah yang perlu dikaji lebih mendalam sehubungan dengan ketidakpastian yang mungkin timbul akibat potensi interferensi antara ketidakpastian terkait turbulensi (*turbulence related unsteadiness*) dengan komponen gangguan (*perturbation component*) dari eksitasi. Secara ringkas dapat disebutkan bahwa pemahaman fundamental terhadap modifikasi struktur turbulensi yang terjadi belum mantap dan komprehensif. Terkait dengan hal tersebut, tujuan utama dari penelitian yang dilakukan ini adalah untuk mendapatkan peta karakteristik peningkatan sifat transport turbulensi yang mendukung laju perpindahan momentum, kalor dan massa sebagai fungsi dari parameter geometri karakteristik kanal aliran, parameter dinamika fluida aliran dan parameter eksitasi eksternal pada medan aliran resirkulasi yang menjadi dasar untuk desain yang efisien pada aplikasi aliran kompleks di berbagai bidang keteknikan.

1.3 Batasan Masalah

Penelitian ini dilakukan guna mengetahui karakteristik dari sifat transport serta struktur aliran resirkulasi di bawah pengaruh eksitasi eksternal, dengan kondisi batas penelitian yang dilakukan sebagai berikut :

Mass Transfer :

- ❖ Proses elektroplating yang terjadi dengan menggunakan logam Tembaga (Cu) sebagai elektroda dan larutan CuSO₄ sebagai elektrolitnya.
- ❖ Pengambilan data dengan menggunakan variasi pada debit aliran sebesar 0.8 ltr/min, 1 ltr/min, 2 ltr/min dan 3 ltr/min.
- ❖ Voltage yang diberikan sebesar 0.8 volt.
- ❖ Menggunakan pencetus turbulensi berupa kontur tangga (*step*).

Heat Transfer :

- ❖ Penelitian dilakukan dalam keadaan adiabatik tanpa adanya reaksi kimia
- ❖ Kecepatan aliran udara yang keluar dari nozel adalah *uniform* dan telah mencapai profil *top hat*.

- ❖ Aliran yang terjadi didalam *test section* adalah dua dimensi dengan mengasumsikan bahwa alirannya identik dengan aliran pada percobaan yang dilakukan oleh Harinaldi ^[1].
- ❖ Penelitian dilakukan pada perbandingan momentum 0.1 dan 0.5 pada temperatur injeksi 100⁰C dan 300⁰C serta letak injeksi 40mm dan 80mm.

1.4 Metodologi Penelitian

Penelitian mengenai karakteristik sifat transport dan struktur aliran resirkulasi dibawah pengaruh eksitasi eksternal dengan model geometri *backward facing step* akibat pengaruh injeksi gas panas yang diberikan dilakukan dengan kajian komputasi menggunakan CFD dan eksperimental menggunakan *light sheet* untuk melihat visualisasi aliran yang terjadi di Laboratorium Mekanika Fluida Jurusan Teknik Mesin Universitas Indonesia. Parameter-parameter dinamika fluida meliputi temperatur injeksi, rasio spesifik momentum injeksi, tinggi step dan letak celah injeksi.

1.5 Sistematika Penulisan

Dalam penulisan tesis ini, penulis menjabarkan dalam beberapa bab yang disesuaikan pada tata cara sistematika penulisan yang baku, diantaranya adalah :

BAB I PENDAHULUAN

Pada bab ini penulis menjelaskan mengenai latar belakang penulisan tesis, tujuan penelitian, batasan masalah, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Berisikan tentang penjelasan *backward facing step*, lapisan batas dan lapisan geser, separasi, pengertian sistem dan volume kendali, kecepatan aliran udara rata-rata, Konsep Elektrokimia, Karakteristik Tembaga (Cu), Larutan Elektrolit (CuSO₄), Perpindahan Massa, Model Matematika Untuk Aliran Turbulen, Type Meshing Pada Computational Domain.

BAB III METODE PENELITIAN

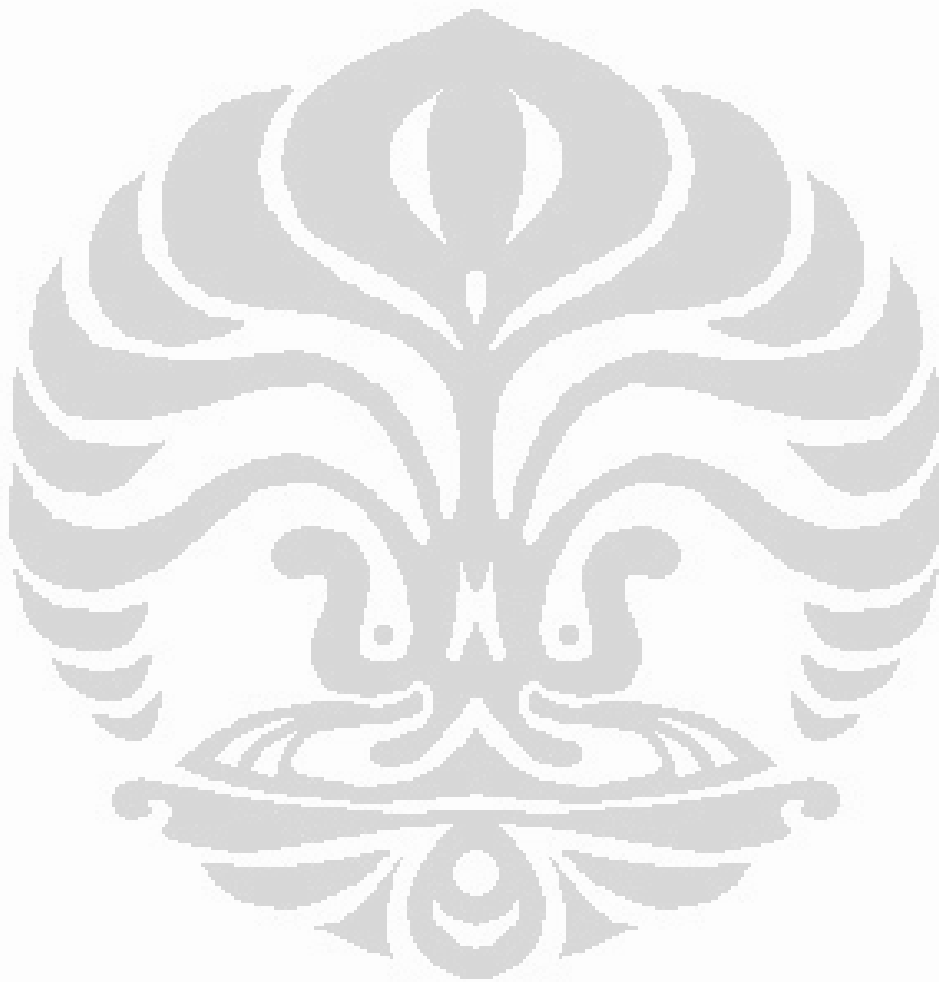
Merinci peralatan yang digunakan untuk jalannya penelitian dengan sedikit penjelasan mengenai cara kerja masing-masing alat serta alat ukurnya. Disamping itu dikemukakan juga mengenai prosedur pengambilan data serta metode penelitian yang dilakukan.

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Berisikan tentang hasil CFD mengenai kajian peningkatan sifat transport properties untuk mass transfer, heat transfer dan hasil dari kegiatan eksperimental yang telah dilakukan.

BAB V KESIMPULAN

Berisikan hasil kesimpulan dari seluruh rangkaian proses penelitian yang dilakukan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

Aliran separasi yang ditimbulkan oleh pembesaran mendadak pada saluran keluarnya memainkan peranan yang sangat penting dalam banyak aspek peralatan di bidang industri seperti sistem pembakaran (*dump combustor*), reaktor kimia, aliran pada outlet pompa, aliran di sekitar sayap pesawat (*aerofoil*), aliran disekitar body mobil dan beberapa sistem pendingin peralatan elektronik/komputer untuk menghasilkan kinerja yang baik. Berdasarkan pertimbangan diatas studi mengenai suatu kajian dasar tentang ilmu mekanika fluida yang mengarah pada aplikasi aliran resirkulasi berturbulensi tinggi untuk rekayasa termofluid memainkan peranan penting baik dalam penelitian dasar maupun pada tingkat aplikasinya.

Diantara banyak pilihan yang ada penelitian mengenai aliran resirkulasi yang terjadi pada *backward facing step* sebagai fenomena aliran yang kompleks dari suatu aliran, memainkan peranan penting untuk mendapatkan informasi mengenai laju perpindahan panas, massa dan momentum. Aliran yang terjadi pada model *backward facing step* disertai oleh berpisahannya aliran (*separation*) yang di ikuti dengan bertautnya kembali aliran (*reattachment*) pada dinding saluran menjadikannya sebagai model yang kompleks untuk mensimulasikan fenomena pada berbagai macam peralatan-peralatan di bidang *engineering*.

Penelitian mengenai aliran pada pembesaran mendadak di saluran keluar telah banyak dilakukan baik secara komputasional maupun pendekatan secara eksperimental, karakteristik aliran setelah ekspansi mendadak tanpa menggunakan injeksi telah dilakukan pada penelitian- penelitian sebelumnya ^[2,3]. Penelitian dengan menggunakan injeksi udara panas memakai *injector* berbentuk slot telah dilakukan untuk mengetahui fenomena pencampuran yang terjadi ^[4,5]. Efek geometri injektor jet udara panas terhadap struktur thermal medan aliran resirkulasi pada kanal berkontur tangga yang dilakukan untuk mengetahui proses pencampuran udara panas injeksi dengan saluran utama (*free stream*) ^[6]. Kontrol aktif dan pasif aliran resirkulasi pada permukaan sayap pesawat menggunakan injeksi berbentuk bulat dengan tujuan untuk melihat profil aliran resirkulasi di

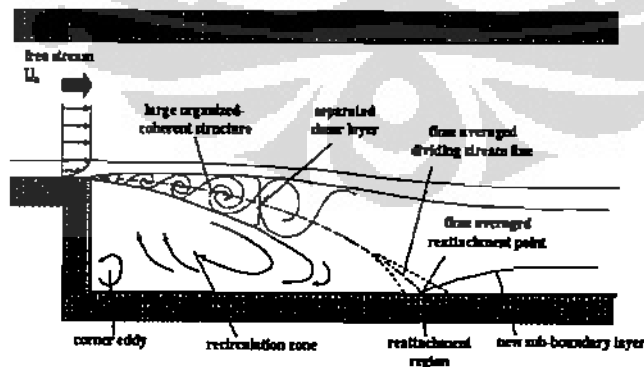
bagian belakang *step* ^[7]. Daerah nyala api untuk pengapian dan stabilisasi nyala api pada semburan jet untuk mendapatkan karakteristik nyala api^[8]. Kajian komputasi dengan menggunakan injeksi bahan bakar hydrogen pada kecepatan aliran udara supersonic dengan menggunakan model turbulen SST k- ω untuk memprediksi pencampuran injeksi dengan saluran utama (*free stream*)^[9]. Stabilisasi nyala api dengan injeksi bahan bakar non premix pada aliran resirkulasi dengan model *backward facing step* ^[10]. Pola aliran yang terjadi pada aliran resirkulasi dengan diberikan injeksi yang dilakukan dengan mengambil gambar aliran menggunakan kamera kecepatan tinggi ^[11]. Kontrol aerodinamis kendaraan pada aliran resirkulasi dengan memberikan injeksi jet untuk mengurangi pusaran aliran yang terjadi ^[12]. Kontrol aliran terpisah (*separation*) dengan menggunakan dua buah injeksi jet dibagian kiri dan kanan ^[13]. Kajian numerik menggunakan model Large Eddy Simulation (LES) untuk nyala api pada tungku pembakaran dengan geometri *backstep* ^[14]. Struktur dinamis dan proses pencampuran bahan bakar hidrogen dan udara pada ruang pembakaran dengan model geometri *backstep*^[15]. Pendekatan numerik terhadap aliran injeksi dengan model *backstep* pada proses pencampuran menggunakan dua buah injeksi ^[16]. Simulasi numerik aliran injeksi Hydrogen (H_2) pada reaksi pembakaran dengan aliran udara supersonic untuk melihat proses pencampuran^[17]. Penyekatan aliran resirkulasi dengan model *backstep* dengan memberikan aliran injeksi di bawah pusaran resirkulasi ^[18]. Aliran Resirkulasi menggunakan gelombang suara pada *bluff body* dengan model geometri *back step* pada ruang pembakaran ^[19]. Kajian numerik menggunakan k-epsilon model untuk proses peleburan baca menjadi cair pada ladle furnace untuk mendapatkan hasil yang optimum ^[20]. Karakterisasi sistem mikro fluida untuk stimulasi jaringan selular dengan memberikan *fluid injection* ^[21]. Tumbukan dari microjet yang di semburkan pada aliran resirkulasi di ruang pembakaran untuk mendapatkan pencampuran yang optimum antara udara, propane dan h_2 ^[22]. Karakterisasi perpindahan panas dan aliran fluida pada aliran berpisah (*separation*) model *backstep* dengan memberikan efek hisap (*suction*) dan tiup (*blowing*)^[23]. Proses pencampuran dan pendinginan lapisan di saluran arus supersonic dengan memberikan efek injeksi^[24]. Simulasi efek pembebanan massa dalam gas pada hembusan yang kuat dengan efek separator ^[25]. Kajian numerik

untuk nyala api pada feature *backstep* penghasil aliran resirkulasi dengan memberikan injeksi [26]. Simulasi dari percobaan arus tracer radio dan deteksi rantai pemodelan [27]. Pemodelan efek microrheologi di dalam injeksi pengecoran dengan partikel yang bergerak [28]. Dinamika aliran api yang bergerak di bawah pengaruh kondisi injeksi aliran [29]. Kajian eksperimental menggunakan sensor untuk melihat aliran resirkulasi dengan menggunakan control pembakaran [30].

2.1 Backward Facing Step

Gambar 2.1 menggambarkan secara umum aliran dua dimensi pada *backward facing step*, yang menunjukkan kompleksitas aliran yang terjadi. Aliran udara melalui *backward facing step* menghasilkan aliran separasi yang memuat zona resirkulasi, lapisan geser dan lapisan batas yang berkembang kembali. Aliran separasi mulai terjadi tepat pada titik di ujung tinggi *step* dan membentuk lapisan geser bebas. Pada titik separasi, garis streamline hampir paralel dengan dinding. Timbulah daerah aliran resirkulasi kecepatan rendah pada bagian bawah separasi.

Diantara aliran dua dimensi, *backward facing step* merupakan sebuah geometri paling sederhana untuk menghasilkan aliran separasi dan *reattaching*. Karena alasan diatas orang sering kali memanfaatkan *backward facing step* untuk mengembangkan model aliran turbulen. Meskipun *backward facing step* merupakan aliran *reattaching* yang paling sederhana, daerah alirannya masih sangat rumit. Ketika lapisan batasnya laminar, akan terbentuk transisi secara cepat setelah separasi, walaupun bilangan Reynoldnya sangat rendah. Lapisan geser separasi akan terlihat lebih besar ketika melewati bagian pertama dari zona aliran separasi.



Gambar 2.1 *Backward Facing Step*

Garis aliran pembagi (*dividing streamline*) digambarkan dengan garis putus-putus pada Gambar 2.1, dan lapisan gesernya eukup tipis dan tidak dipengaruhi oleh keberadaan dinding disekitarnya. Untuk aliran dua dimensi, *reattachment point* (X_r) didefinisikan sebagai tempat dimana gesekan permukaan lokal rata-rata sama dengan nol. Pada daerah *reattachment*, kecepatan searah aliran rata-rata terbobot waktu (*time average streamwise velocity*) sangat kecil dan membalikkan secara tiba-tiba arah aliran yang terjadi, menjadi turbulen. Pengaruh momentum searah aliran relatif di abaikan untuk tekanan dan gaya geser, sehingga gradien tekanan searah aliran kira-kira seimbang dengan gradien tegangan geser normal fluida total permukaan. Geseran total rata-rata pada permukaan di daerah *reattachment* kecil (pada *reattachment point*), tetapi hal ini menjadi besar pada lapisan geser di atas permukaan. Konsekuensinya, kenaikan tekanan yang besar terjadi pada daerah *reattachment*.

2.2 Lapisan Batas dan Lapisan Geser

Fluida yang mempunyai viskositas yang relatif kecil, pengaruh gesekan dalam terasa hanya didalam suatu daerah sempit di sekitar batas fluida. Aliran diluar daerah sempit didekat batas padat tersebut dapat dipandang sebagai aliran ideal atau aliran potensial. Didalam fluida nyata terdapat gradien kecepatan yang eoram dari batas ke aliran utamanya. Gradien kecepatan ini membangkitkan gaya geser di dekat batas yang memperkecil aliran relatif terhadap batas. Lapisan fluida yang kecepataannya terpengaruh oleh tegangan geser batas tersebut disebut lapisan batas. Kecepatan di dalam lapisan batas mendekati kecepatan di dalam aliran utamanya secara asimtotik.

Lapisan batas pada ujung hulu suatu benda yang mengikuti garis aliran (*streamlined body*) serta dalam keadaan tidak bergerak di dalam aliran yang sedianya seragam adalah amat tipis. Dengan Bergeraknya lapisan ini sepanjang benda tersebut, aksi tegangan geser yang terus menerus cenderung memperlambat lebih banyak partikel-partikel fluida, sehingga menyebabkan bertambah tebalnya lapisan batas bersama jarak dari titik hulu tersebut. Fluida dalam lapisan tersebut juga mengalami gradien tekanan, yang ditentukan dari aliran potensial, yang memperbesar momentum lapisan jika tekanan berkurang dalam arah ke hilir

(*downstream*) dan mengurangi momentumnya bila tekanan meningkat dalam arah ke hulu (*upstream*).

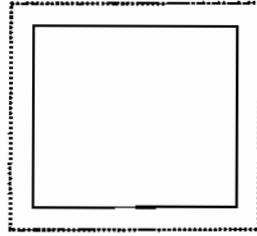
Dalam *backward facing step*, lapisan batas terjadi pada *free stream* (sebelum separasi). Ketika separasi terjadi, lapisan batas akan menghilang. Seiring dengan hilangnya lapisan ini timbulah lapisan geser. Pada gambar 2.1 diatas, lapisan geser digambarkan dengan garis nyata menuju *reattachment zone* dan mengenai dinding. Sebagian dari fluida dalam lapisan geser ini didefleksikan ke aliran resirkulasi karena adanya *adverse pressure gradient* yang sangat kuat. Lapisan geser ada karena efek dari *adverse pressure gradient* dan interaksi yang kuat dengan dinding pada *reattachment zone*. Lapisan batas akan timbul kembali ketika aliran melewati titik *reattachment* dan berkembang searah dengan sumbu x.

2.3 Separasi

Separasi merupakan kejadian berpisahya lapisan batas dari batas permukaan padatnya. Hal ini dapat terjadi karena adanya *adverse pressure gradient*, namun hal ini bukan menjadi syarat utama untuk terjadinya separasi. Fluida yang melewati *backward facing step* juga akan mengalami separasi. Titik separasi muncul pada ujung atas *step*. Dengan demikian efek *adverse pressure gradient* akan semakin nyata sehingga membuat aliran utama (*free stream*) terbagi dua, pertama bergerak paralel searah dengan *free stream*-nya. Aliran yang kedua bergerak berlawanan arah bahkan terjebak dan membentuk aliran resirkulasi. Aliran resirkulasi ini memiliki karakteristik aliran kecepatan rendah meskipun *free stream* bergerak dengan kecepatan tinggi.

2.4 Pengertian Sistem dan Volume Kendali

Suatu sistem menunjuk suatu massa tertentu serta membedakannya dari semua massa dilingkungannya. Batas suatu sistem membentuk permukaan tertutup. Permukaan ini dapat saja berubah searah dengan waktu, sedemikian sehingga permukaan tersebut melingkupi massa yang tetap selama terjadi perubahan-perubahan terhadap kondisinya. Hukum kekekalan massa menyatakan bahwa massa di dalam suatu sistem adalah tetap konstan terhadap waktu ($dm/dt=0$). Dalam kasus diatas, sistem berisi massa yang terbatas jumlahnya dan terdiri dari fluida yang bergerak didalam geometri *backward-facing step*.



Gambar 2.2 Volume Kendali

Suatu volume kendali (diilustrasikan dalam gambar 2.2) menunjuk suatu daerah di dalam ruang dan bermanfaat dalam analisis terhadap situasi-situasi dengan terjadinya aliran ke dalam serta keluar dari ruang tersebut. Batas suatu volume kendali adalah permukaan kendalinya. Ukuran serta bentuk volume kendali adalah sepenuhnya sembarang, tetapi acapkali sebagian demi sebagian dibuat berhimpit dengan batas-batas benda padat. Di bagian-bagian lainnya digambarkan tegak lurus terhadap arah aliran demi penyerderhanaan. Volume kendali yang digunakan dalam penelitian ini berupa volume kendali tetap yang berarti memiliki suatu besar yang selalu tetap.

2.5 Aliran Laminar dan Turbulen

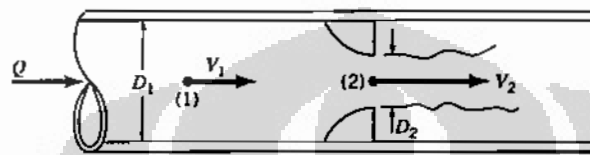
Perbedaan yang jelas antara aliran laminar dan turbulen adalah, pada aliran laminar gerakan fluida terlihat tersusun dan berlapis dan memungkinkan mengidentifikasi garis-garis streamline sepanjang gerakan partikel fluida. Gerakan fluida sepanjang garis-garis streamline dikarakteristikan dengan komponen kecepatan pada arah sumbu-x dan sumbu-y. Sebaliknya, gerakan fluida pada lapisan batas turbulen sangat tidak teratur dan dikarakteristikan dengan fluktuasi kecepatan. Fluktuasi kecepatan ini meningkatkan transfer momentum dan energi. Lapisan batas pada awalnya laminar, tetapi pada suatu jarak dari sisi masuk, gangguan kecil akan mengakibatkan perubahan menjadi aliran turbulen, fluktuasi aliran mulai terjadi pada daerah transisi. Pada daerah yang sepenuhnya turbulen, kondisinya dikarakteristikan dengan gerakan acak. Perubahan dari aliran laminar ke aliran turbulen akan meningkatkan ketebalan lapisan batas.

2.6 Kecepatan Aliran Udara Rata-Rata

Pada penelitian ini, yang dimaksud dengan kecepatan aliran udara rata-rata adalah besarnya kecepatan aliran udara memasuki *test section*. Ada tiga peralatan yang dapat digunakan untuk mengukur aliran rata-rata di dalam saluran, yaitu :

orifice meter, *nozzle meter* dan *venturi meter*. Tiap alat ukur ini beroperasi dengan prinsip bahwa suatu penurunan luas aliran pada suatu saluran menyebabkan kenaikan kecepatan yang disertai dengan penurunan tekanan.

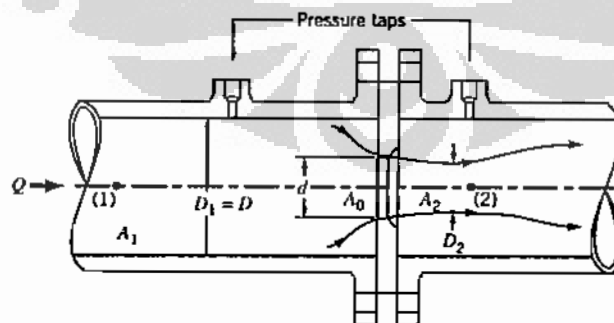
Hubungan perbedaan tekanan dengan kecepatan memberikan suatu bentuk pengukuran aliran rata-rata. Dalam hal ini pengaruh efek viskositas diabaikan dan diasumsikan bahwa saluran (dalam bentuk pipa) terletak mendatar. Sehingga persamaan Bernoulli dapat diaplikasikan antara titik (1) dan titik (2) yang ditunjukkan pada gambar 2.3 dibawah ^[31].



Gambar 2.3 Orifice

Orifice meter dibuat dengan mensisipkan suatu pelat datar dengan sebuah lubang antara dua *flange* pada pipa, sebagaimana yang ditunjukkan pada gambar 2.4. Tekanan pada titik (2) dengan *vena contracta* lebih rendah dari titik (1). Ada dua alasan yang terjadi pada efek *non ideal*. Pertama, luas *vena contracta*, A_2 lebih kecil dari luas lubang A_0 dalam jumlah yang tidak diketahui. Kemudian $A_2 = C_c A_0$, dimana C_c adalah koefisien kontraksi ($C_c < 1$). Kedua, *swirling flow* dan bentuk turbulensi di dekat pelat *orifice* memperlihatkan kerugian aliran (*head losses*) yang mana tidak dapat dihitung secara teoritis. Kemudian, koefisien keluaran orifice (C_0) digunakan untuk mendapatkan pengaruh ke dalam perhitungan.

Sehingga :



Gambar 2.4 Konstruksi *orifice meter*

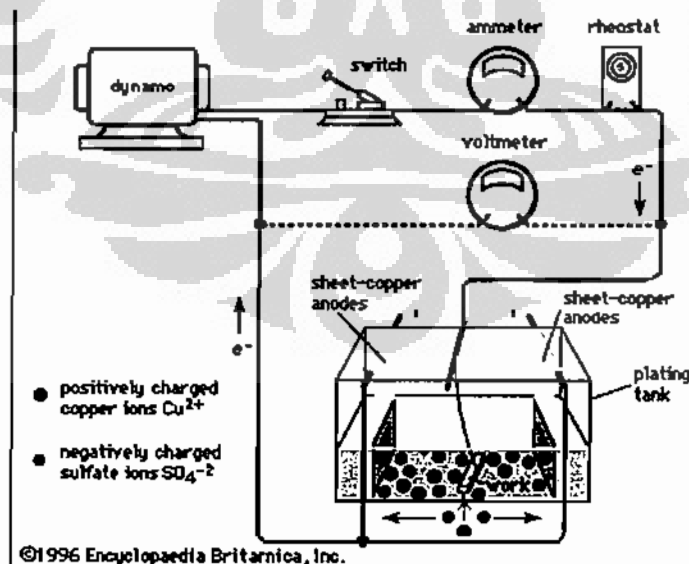
$$Q = C_0 \cdot Q_{ideal} = C_0 \cdot A_0 \sqrt{\frac{2(p_1 - p_2)}{\rho(1 - \beta^4)}} \dots \dots \dots [2.1]$$

Perlu dicatat bahwa, harga C_0 tidak tergantung kepada konstruksi khusus dari *orifice meter*. Dalam hal ini, yaitu penempatan *pressure tap*, apakah pinggir dari *pelat orifice* bujur sangkar atau siku-siku.

Dari perhitungan Q pada persamaan [2.1], maka akan didapatkan kecepatan V_0 . Dalam hal ini berlaku persamaan $Q = A_0 V_0$, dimana A_0 adalah luas dari ujung nozzle peralatan penelitian (*converging nozzle*) dan V_0 adalah kecepatan aliran udara rata-rata keluar dari *nozzle*. Dalam penelitian ini kecepatan rata-rata aliran diukur dengan menggunakan *orifice meter* yang telah dikalibrasi dengan *anemometer* pada *nozzle outlet*.

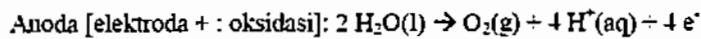
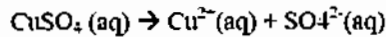
2.7 Konsep Elektrokimia

Pada elektrokimia terdapat elektroda yang bermuatan negatif disebut katoda dan elektroda yang bermuatan positif disebut anoda. Jika sebuah baterai (DC) memberi muatan yang berbeda pada kedua elektroda yang dicelupkan kedalam larutan. Ion positif dalam larutan akan bergerak menuju katoda yang bermuatan negatif untuk mengambil elektron. Sementara itu, ion negatif (anion) bergerak menuju anoda yang bermuatan positif dan melepas elektron. Selanjutnya elektron yang dilepaskan ini akan dialirkan ke katoda melalui baterai. Gambar 2.5 menjelaskan secara skematis proses elektrokimia yang terjadi.



Gambar 2.5 Skema elektrokimia

Berikut adalah reaksi yang terjadi pada peristiwa elektrokimia pada tembaga dengan elektroda inert.



Elektrokimia dilandasi oleh peristiwa elektrolisis, bidang yang mengkaji perubahan energi listrik dari atau ke energi kimia, yang dirintis oleh Michael Faraday (1791-1867). Pada elektrolisis ini terdapat Hukum Faraday yaitu :

Hukum 1 Faraday :

“Jumlah massa dari zat kimia yang diproduksi pada elektrode selama elektrolisis adalah sebanding dengan kuat arus listrik yang mengalir pada elektrolisis tersebut.”

Kemudian dari hukum Faraday diatas diperoleh rumus :

$$m = \frac{I.t.M_r}{F.z} \dots\dots\dots[2.2]$$

Hukum 2 Faraday :

"Massa dari macam-macam zat yang diendapkan pada masing-masing elektroda (terbentuk pada masing-masing elektroda) oleh sejumlah arus listrik yang sama banyaknya akan sebanding dengan berat ekivalen masing-masing zat tersebut."

$$m_1 : m_2 = M_{r1}/z_1 : M_{r2}/z_2 \dots\dots\dots[2.3]$$

Dalam elektrokimia ini terdapat konstanta Faraday, yaitu jumlah muatan listrik dalam satu mol elektron.

$$F = N.e \dots\dots\dots[2.4]$$

N menjelaskan bilangan Avogadro sebesar 6.02×10^{23} /mol, e adalah jumlah muatan listrik untuk satu elektron sebesar 1.602×10^{-19} Coulomb/elektron. maka, nilai F yang diperoleh adalah :

$$F = (6.02 \times 10^{23}) \times (1.602 \times 10^{-19})$$

$$F = 96485 \text{C/mol}$$

Untuk memperoleh nilai koefisien perpindahan massa (m/s), maka persamaan 2.2 dapat diubah dengan mensubstitusikan nilai-nilai dari parameter *density* dan luas bidang sebagai berikut :

$$K_m \frac{m}{\rho A t} = \frac{ItMr}{zF} \cdot \frac{1}{\rho A t} \dots\dots\dots [2.5]$$

Hubungan antara density, berat molekul dan konsentrasi larutan adalah :

$$\rho = C M_r \dots\dots\dots [2.6]$$


Sehingga dari persamaan 2.6 dapat disubstitusi ke persamaan 2.5 dan diperoleh persamaan :

2.8 Tembaga

Tembaga memiliki sifat liat, lunak dan ulet namun jika teroksidasi oleh udara akan membentuk patina (hijau) terdiri atas hidrosokarbonat dan hidrososulfat. Reaksinya dengan sulfide akan membentuk tarnish(bercak) yang menyulitkan untuk disolder sehingga tembaga masih sering diplat timah. Logam tembaga sering digunakan untuk elektrokimia karena mudah didapat dan harganya relatif murah. Tembaga sering dijadikan lapisan dasar dalam pelapisan sebelum dilapisi oleh logam lain. Karena memiliki daya hantar listrik yang cukup baik maka tembaga sering digunakan untuk pelapisan yang menginginkan sifat konduktor pada logam. Tembaga memiliki dua senyawa : kupro atau tembaga (I) dan kupri atau tembaga (II). Sifat-sifat umum dan sifat-sifat fisik tembaga ditunjukkan oleh tabel 2.1.

Tabel 2.1 Properties dari tembaga

Periodic table - Extended periodic Ag table	
General	
Nama, symbol, nomor atom	copper, Cu, 29
Kelompok kimia	Logam Transisi
Grup, period, blok	11, 4, d
Penampilan	Logam merah kecoklatan



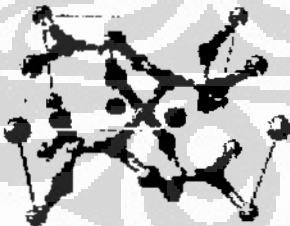
	
Berat Atom	63.546 g·mol ⁻¹
Konfigurasi elektron	[Ar] 3d ¹⁰ 4s ¹
Elektron per sel	2. 8. 18. 1
Physical properties	
Fase	solid
Berat jenis (density)	8.96 g·cm ⁻³
Berat jenis (cair)	8.02 g·cm ⁻³
Titik Lebur	1357.77 K (1084.62 °C, 1984.32 °F)
Titik Didih	2835 K (2562 °C, 4643 °F)
Kapasitas kalor	(25 °C) 24.440 J·mol ⁻¹ ·K ⁻¹
Miscellaneous	
<i>Electrical resistivity</i>	(20 °C) 16.78 nΩ·m
<i>Thermal conductivity</i>	(300 K) 401 W·m ⁻¹ ·K ⁻¹
Ekspansi Thermal	(25 °C) 16.5 μm·m ⁻¹ ·K ⁻¹
<i>Young's modulus</i>	110 - 128 GPa
<i>Shear modulus</i>	48 GPa


2.9 Larutan Elektrolit (CuSO₄)

Larutan elektrolit adalah larutan yang memiliki kemampuan untuk menghantarkan listrik. Daya hantar listrik pada larutan elektrolit ini bergantung pada jenis dan konsentrasinya. Larutan yang memiliki daya hantar listrik yang baik walaupun konsentrasinya kecil disebut dengan elektrolit kuat. Svante August Arrhenius (1859-1927) menjelaskan bahwa larutan elektrolit mengandung ion yang bergerak bebas. Ion inilah yang menghantar arus listrik melalui larutan.

Larutan elektrolit yang digunakan dalam penelitian ini adalah CuSO_4 atau dikenal juga dengan nama *blue vitriol* atau *bluestone*. CuSO_4 atau Copper (II) sulfat memiliki dua jenis campuran yaitu $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (pentahydrate) dan CuSO_4 (anhydrous). Perbedaan yang terdapat pada dua campuran ini adalah pada jenis pentahydrate masih terdapat molekul air, sedangkan pada jenis anhydrous merupakan copper (II) sulfat murni yang tidak mengandung molekul air. Tabel 2.2 menunjukkan beberapa sifat dari larutan CuSO_4 .

Tabel 2.2 Properties dari CuSO_4

CuSO_4




	
Nama IUPAC	Copper(II) sulfate pentahydrate
Nama Lain	Copper(II) sulfate Copper(II)sulphate Cupric sulfate Blue vitriol Bluestone <u>Chalcanthite</u>
Properties	
Molekul	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (pentahydrate) CuSO_4 (anhydrous)
Berat molar	249.7 g/mol (pentahydrate) 159.6 g/mol (anhydrous)
Tampilan	Kristal biru (pentahydrate) bubuk abu-abu (anhydrous)
Titik didih	110 °C (- 4H ₂ O) 150 °C (423 K) (- 5H ₂ O)

2.10 Perpindahan Massa

Perpindahan massa merupakan proses perpindahan molekular yang karena adanya perbedaan konsentrasi pada suatu campuran dari dua komponen yang berbeda. Konsep terjadinya perpindahan massa adalah dimana terdapat perbedaan konsentrasi yang mengakibatkan munculnya suatu konsentrasi yang seragam.

Pada konsentrasi yang lebih tinggi, molekul yang terdapat pada fluida tersebut berjumlah lebih banyak. Sehingga, dengan adanya perbedaan konsentrasi maka molekul yang berasal dari konsentrasi yang lebih tinggi akan berpindah mengisi molekul-molekul yang terdapat pada konsentrasi yang lebih rendah sehingga muncullah konsentrasi yang seragam. Persamaan yang digunakan untuk perpindahan massa adalah :

$$\dot{M} = K_m A(\Delta C) \dots\dots\dots [2.7]$$

Untuk melakukan analisa dari perpindahan massa digunakan berbagai bilangan tak berdimensi yang berkorelasi dengan variabel-variabel pada perpindahan massa. Ada tiga bilangan tak berdimensi yang umum digunakan yaitu bilangan Reynolds, bilangan Schmidt dan bilangan Sherwood.

Bilangan Schmidt merupakan ratio dari momentum dan *mass diffusivities*. Bilangan Schmidt merupakan pengukuran dari efektifitas momentum dan perpindahan massa dengan difusi dalam kecepatan dan lapisan batas konsentrasi. Persamaan untuk bilangan Schmidt adalah :

$$Sc = \frac{\nu}{D} = \frac{\mu}{\rho D} \dots\dots\dots [2.8]$$

Bilangan Sherwood merupakan bilangan yang menyatakan gradien konsentrasi pada permukaan yang dapat digunakan untuk menghitung konveksi perpindahan massa.

$$Sh = \frac{K_m d}{D} \dots\dots\dots [2.9]$$

Korelasi antara ketiga bilangan tak berdimensi tersebut dinyatakan sebagai berikut

$$Sh = \alpha \cdot Re^b \cdot Sc^c$$

Nilai a, b dan c adalah konstanta yang muncul dari pengolahan data eksperimen

2.11 Model Matematika Untuk Aliran Turbulen

Model k-epsilon ^[32] merupakan model semi empiris yang dikembangkan oleh Launder & Spalding yang ditunjukkan pada persamaan [2.10] dan [2.11] merupakan model turbulensi yang cukup lengkap dengan dua persamaan yang memungkinkan kecepatan turbulen (*turbulent velocity*) dan skala panjang (*length scales*) ditentukan secara independen. Kestabilan, ekonomis (dari sisi komputasi), dan akurasi yang memadai untuk berbagai jenis aliran turbulen membuat model k-ε sering digunakan pada simulasi aliran fluida dan perpindahan kalor. Berikut ini merupakan contoh dari konstanta standar dalam software *Computational Fluid Dynamics* (CFD) Fluent 6.2 yang dipergunakan : $C_{1\epsilon}=1.44$, $C_{2\epsilon}=1.92$, $C_{\mu}=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_{\epsilon}=1.3$.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \dots \dots \dots [2.10]$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\epsilon}} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_{\epsilon} \dots \dots \dots [2.11]$$

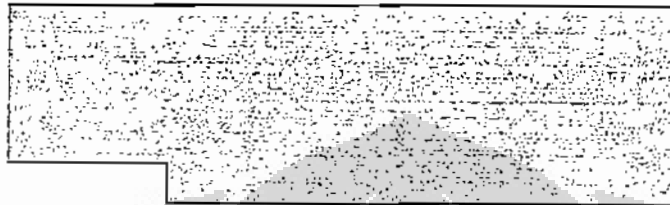
Model k-omega standar merupakan model berdasarkan model Wilcox k-omega yang memasukkan beberapa modifikasi untuk menghitung efek aliran pada bilangan Reynolds rendah, kompresibilitas dan penyebaran aliran geser (*shear flow*). Model ini dapat di aplikasikan pada aliran dalam saluran maupun aliran bebas geseran (*free shear flow*).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \dots \dots \dots [2.12]$$

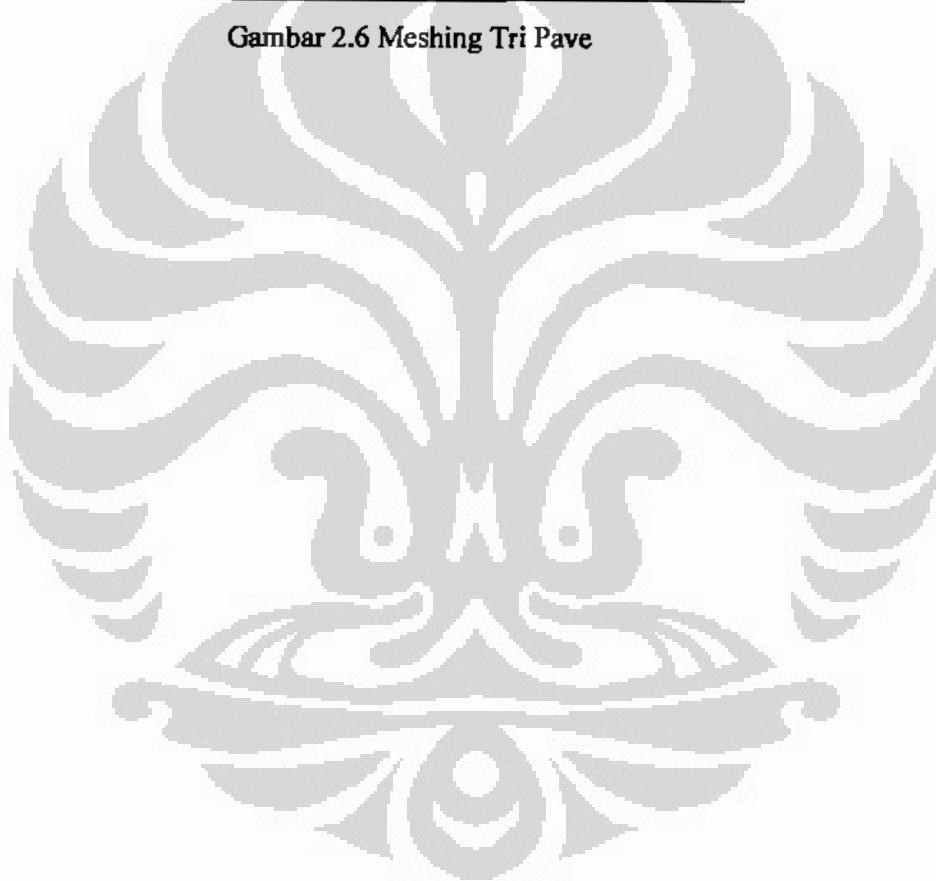
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\omega} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_{\omega} - Y_{\omega} + S_{\omega} \dots \dots \dots [2.13]$$

2.12 Type Meshing

Type meshing yang digunakan dalam mendiskritisasikan model menggunakan type meshing tri pave pemilihan type ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan hasil yang akurat dengan membagi-bagi komputasional domain secara uniform. Model type meshing yang gunakan seperti gambar di bawah ini.



Gambar 2.6 Meshing Tri Pave



BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Aplikasi Kontrol Turbulensi Pada Perpindahan Massa Konvektif Di Medan Aliran Sel Elektrokimia Pelat Sejajar

Salah satu masalah penting dalam industri manufaktur dewasa ini adalah pengembangan teknik proses produksi yang menitik beratkan pada upaya mendapatkan suatu metode manufaktur yang semakin efisien dan efektif namun dapat menghasilkan produk yang memenuhi ketentuan-ketentuan standard mutu yang ditetapkan. Diantara proses-proses manufaktur yang sangat luas aplikasinya dibidang industri adalah proses yang didasari oleh reaksi elektrokimia yang melibatkan suatu perpindahan massa antara dua elektroda (anoda dan katoda) dalam suatu cairan elektrolit. Salah satu contoh proses ini adalah electroplating yang banyak diterapkan pada industri logam. Untuk berbagai keperluan yang spesifik beberapa teknik telah dikembangkan dan dipatenkan.

Penelitian ini mengkaji pemanfaatan turbulensi yang ditimbulkan oleh aliran separasi bertaut kembali (*separating-reattached flow*) akibat gangguan terhadap aliran dengan menggunakan suatu kontrol aktif, untuk meningkatkan laju perpindahan massa konvektif antara 2 sel elektrokimia pelat sejajar dalam suatu kanal aliran fluida elektrolit yang merupakan dasar dari proses electroplating pada berbagai peralatan yang digunakan di dunia industri.

Pengembangan kontrol turbulensi secara aktif dilakukan pada 2 alternatif model kontrol aktif berupa kontrol secara hidrodinamik (*hydrodynamics control*) dengan menginjeksikan jet fluida pengontrol yang dapat mengubah struktur lapisan batas aliran pada kanal elektrolit dan intensitas turbulensinya dan secara akustik mekanik (*mechano acoustic control*) dengan mengintroduksi gelombang akustik yang dapat mempengaruhi intensitas turbulensi aliran. Hasil dari investigasi seera komputasi dan eksperimental dengan metode *limiting diffusion current* menunjukkan beberapa karakteristik perpindahan massa konvektif yang sangat dipengaruhi oleh bilangan Reynolds, rasio kecepatan fluida injeksi V_r , dan bilangan Strouhal St dari frekuensi eksitasi akustik.

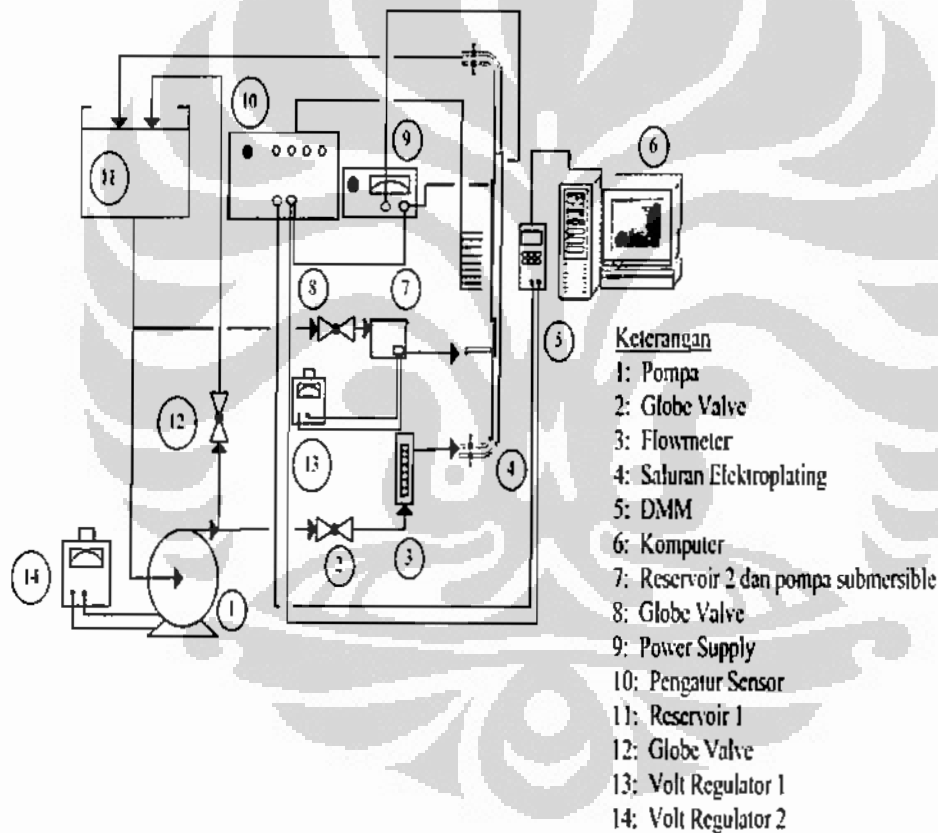
3.11 Metode Komputasi Untuk Proses Elektrokimia

Pendekatan komputasi dalam pengembangan model kontrol aktif turbulensi aliran untuk meningkatkan laju perpindahan massa terutama ditujukan untuk mendapatkan deskripsi detail medan aliran sehingga dapat menjadi bahan pertimbangan desain eksperimental. Berikut ini Tabel 3.1 menunjukkan rincian aspek metodologi pada pendekatan komputasional yang dilakukan pada penelitian ini.

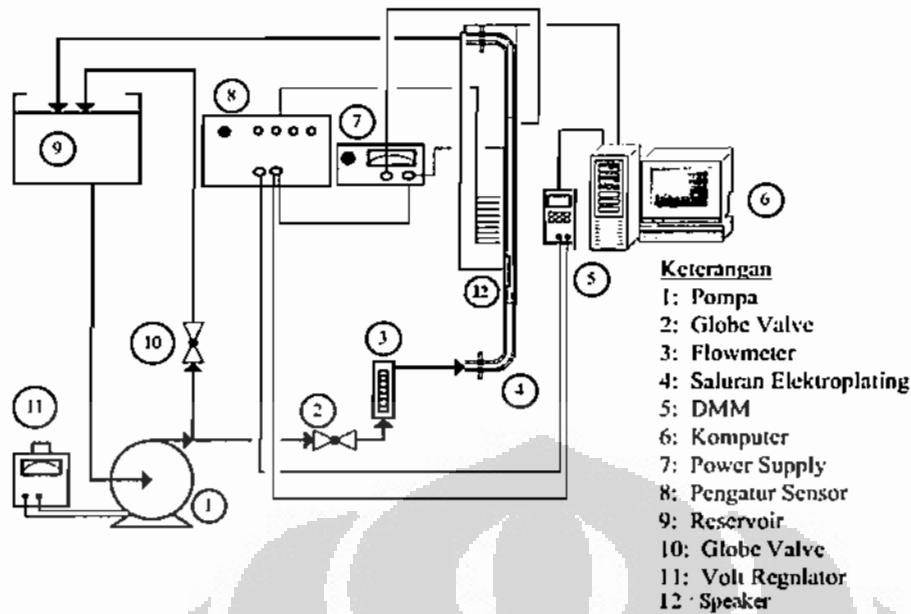
No.	Aspek Metodologi	Uraian
1.	Formulasi Masalah	- Pengembangan skema komputasi (<i>computational scheme</i>) dan uji komputasi untuk pemodelan kontrol aktif turbulensi
2.	Model Komputasi dan Formulasi Matematika	Model Komputasional : - Aliran dua dimensi antar pelat sejajar dengan <i>wall-boundary deformation and flow perturbation</i> - Model turbulensi : k- ϵ standard, model alternatif k- Ω [Yang, 1997] Formulasi Matematika : Solusi numerik persamaan konservasi, persamaan energi kinetik dan laju dissipasi turbulen, persamaan Navier-Stokes terata-rata waktu pada kondisi aliran tak mampu mampat
3.	Prosedur Numerik dan Eksekusi	- Algoritma : SIMPLE, Diskritisasi : volume kontrol berdasar metode beda hingga dengan skema <i>power-law</i> , Grid : non-uniform - Eksekusi : simulasi dua dimensi dengan aplikasi software CFD
4.	Analisis Hasil dan Intrepetasi	- Komparasi, verifikasi dan validasi skema komputasi dengan data eksperimen
5.	Rekomendasi	- Desain dan prediksi model eksperimental kontrol aktif turbulensi

3.12 Peralatan Penelitian Mass Transfer

Alat yang digunakan dalam penelitian untuk control aktif mass transfer dengan memberikan injeksi aliran fluida elektrolit atau suara (*acoustic*) pada daerah resirkulasi yang di tampilkan pada gambar 3.1. untuk metode control hidrodinamik dan gambar 3.2 untuk metode control akustik mekanik. Sistem aliran di rancang dengan tujuan memungkinkan fluida cairan elektrolit mengalir melalui kanal vertikal yang terbuat dari pelat akrilik sepanjang 1000mm. Cairan elektrolit digerakkan dengan sebuah pompa dan pengendalian laju aliran yang melalui kanal dilakukan dengan katup by-pass, katup pengendali dan sebuah flow meter. Panjang saluran masuk (*inlet section*) adalah 300 mm dan panjang saluran keluar (*outlet section*) 250mm.



Gambar 3.1 Skema dari alat metode hidrodinamik jet pengontrol



Gambar 3.2 Skema dari alat metode akustik mekanik jet pengontrol

Proses pengambilan data untuk penelitian ini menggunakan data akuisisi berupa digital multimeter dengan data logger sehingga dapat langsung terhubung ke komputer. Pengambilan data pada alat ini meliputi :

1. Menentukan voltage sebesar 0,8 V pada *power supply*.
2. Perhitungan debit air melalui flowmeter yang diatur melalui *valve* dan mengatur putaran pompa dengan *voltage regulator*.
3. Pengambilan nilai arus pada mikroelektrode pada setiap titik menggunakan digital multimeter.

Pada alat ini terdapat beberapa komponen yang bekerja sebagai satu kesatuan sehingga alat ini dapat bekerja dengan baik. Komponen-komponen tersebut antara lain :

1. Sel Elektrokimia

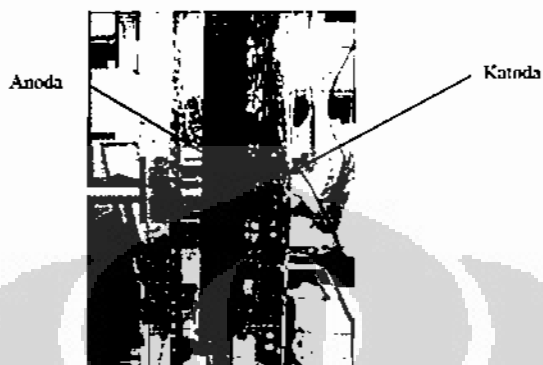
Merupakan komponen inti yang berfungsi sebagai tempat mengalirnya larutan elektrolit diantara dua buah plat tembaga yang dipasang sejajar.

Pada sel elektrokimia ini terdapat beberapa bagian penting yaitu :

a. Katoda dan anoda (makroelektroda)

Katoda dan Anoda ini berfungsi sebagai makroelektroda untuk menghantarkan listrik dari *power supply* agar larutan elektrolit mampu

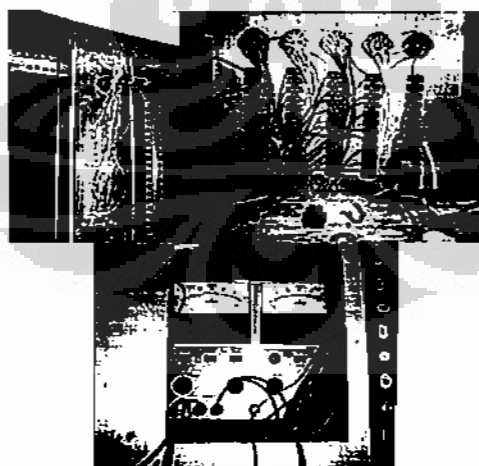
menghantarkan ion-ion elektron. Dimana fungsi dari katoda adalah untuk menghantarkan arus positif dan anoda berfungsi sebagai arus negatif yang menangkap elektron dari katoda melalui larutan elektrolit. Makroelektroda ini terbuat dari tembaga. Kedua bagian ini dipasang disisi sel elektrokimia yang kemudian dibaut dan ditempel dengan silicon untuk menghindari kebocoran.



Gambar 3.3 Plat sejajar anoda dan katoda

b. Mikroelektroda

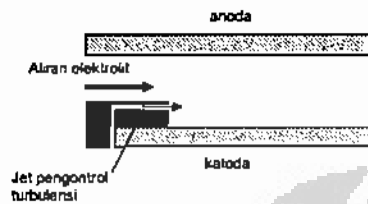
Pelat katoda dilengkapi dengan 48 buah elektroda mini berdiameter 1,5 mm yang berpermukaan sama rata dengan pelat katoda dan disusun dalam dua baris secara aksial di tengah-tengah pelat katoda. Mini elektroda terisolasi dari pelat katoda dengan bahan isolator dari epoksi. Mikroelektroda ini nantinya akan terhubung dengan terminal-terminal yang terdapat pada bagian kontrol untuk kemudian disambungkan ke digital multimeter yang ditampilkan pada gambar 3.4



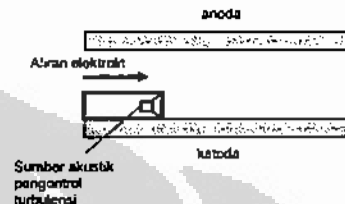
Gambar 3.4 Susunan kabel mikroelektroda

c. Pencetus turbulensi berupa *step*

Penelitian ini menggunakan kontur tangga (*step*) sebagai pencetus turbulen pada kanal elektrolit yang bersifat sebagai kontrol aktif turbulensi. Gambar 3.5 dibawah ini menunjukkan diagram skematik model kontrol aktif dengan metode hidrodinamik jet kontrol dan gambar 3.6 menunjukkan diagram skematik model kontrol aktif dengan metode akustik-mekanik.



Gambar 3.5 Kontrol Hidrodinamik



Gambar 3.6 Kontrol Akustik Mekanik

d. Kanal aliran plat sejajar

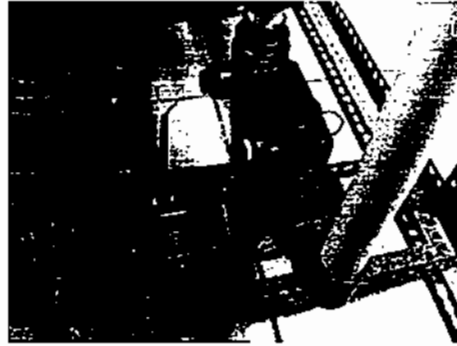
Saluran yang terbuat dari *acrylic* ini berfungsi untuk mengalirkan elektrolit agar mampu lewat diantara plat anoda dan plat katoda yang terbuat dari tembaga ini. Pada saluran ini terdapat dua lubang di setiap sisi untuk menempatkan katoda dan anoda. Saluran ini dilapisi dengan *sealant* berupa silikon untuk mencegah agar larutan elektrolit tidak bocor. Kemudian, agar katoda dan anoda dapat menempel dengan kuat maka dibuat delapan lubang untuk mur dan baut pada bagian anoda dan delapan lubang juga untuk mur dan baut pada bagian katoda.



Gambar 3.7 Desain dari kanal aliran plat sejajar

2. Pompa

Berfungsi untuk menyalurkan elektrolit dari reservoir ke sel elektrokimia yang melalui pipa dengan diameter yang bervariasi. Pompa yang digunakan memiliki head maksimum hingga 30 meter. Untuk mengatur aliran elektrolit yang keluar dari pompa ini digunakan *valve* dan *voltage regulator* agar debit yang masuk ke sel elektrokimia sesuai dengan yang dikehendaki.



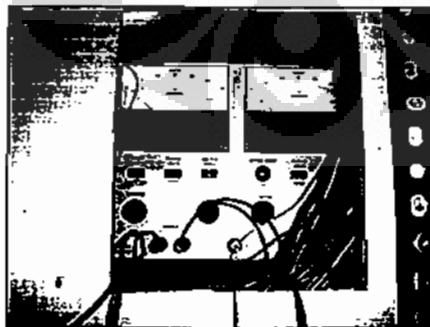
Gambar 3.8 Pompa

Tabel 3.2 Spesifikasi Pompa Sanyo PW H 136

Sumber tegangan	satu phase 220V 50 Hz
Output	125 W
Input	260 W
Suction head	max 9 m
Total Head	max 30 m
Kapasitas aliran	max 32 ltr/min
Pipa Hisap	1 inch
Pipa Dorong	1 inch

3. Power Supply DC

Untuk mengalirkan listrik ke katoda dan anoda dibutuhkan *power supply* yang mampu mengalirkan listrik DC agar mudah diatur sesuai kebutuhan. *Power supply* memiliki kemampuan keluaran dengan memberikan tegangan hingga 30 V dan 2 A, dimana tegangan pada *power supply* dapat diatur sesuai kebutuhan. Pada penelitian ini, tegangan diatur sebesar 0,8 V. Untuk mengetahui nilai tegangan dari power supply serta untuk menjaga agar tegangan tetap stabil di nilai 0,8 V maka digunakan digital multimeter untuk mengecek nilai tegangan setiap beberapa waktu sekali.



Gambar 3.9 Power Supply yang digunakan

4. Reservoir

Untuk menampung larutan elektrolit CuSO_4 dibutuhkan reservoir ini. Reservoir terbuat dari kotak plastik yang mampu untuk menampung larutan hingga 17 liter. Reservoir ini menerima aliran elektrolit dari sel elektrokimia untuk kemudian disalurkan kembali ke sel elektrokimia melalui pompa yang tersedia.



Gambar 3.10 Reservoir untuk menampung larutan CuSO_4

5. Flowmeter

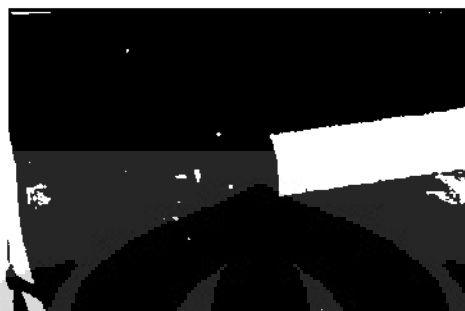
Flowmeter digunakan sebagai alat ukur untuk mengetahui debit aliran yang akan masuk ke sel elektrokimia. Flowmeter yang digunakan merupakan flowmeter yang biasa digunakan untuk fluida yang memiliki *Specific Gravity* 1 atau biasa digunakan untuk mengalirkan air. Sehingga agar debit aliran pada larutan elektrolit dapat diketahui maka flowmeter perlu dikalibrasi terlebih dahulu. Posisi flow meter berada di antara sisi *output* pompa, dimana sebelum masuk ke flowmeter terdapat *valve* yang digunakan untuk mengatur debit aliran, dan berada di bagian sebelum masuk ke sel elektrokimia.



Gambar 3.11 Posisi flowmeter setelah pompa

6. Pemipaan

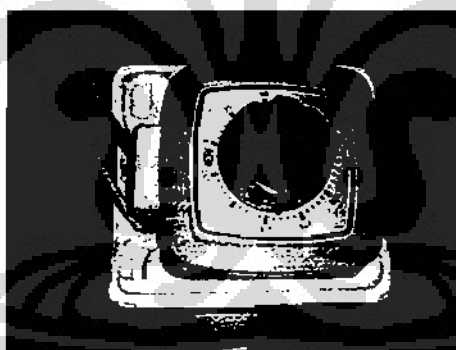
Alat ini menggunakan pipa paralon PVC untuk mengalirkan larutan elektrolit dengan diameter bervariasi antara $\frac{1}{2}$ ' inchi, $\frac{3}{4}$ ' inchi dan 1 inchi. Selain itu juga terdapat 2 *valve* yang digunakan untuk mengatur aliran serta terdapat juga *water moor* agar pipa lurus tersebut mudah untuk dibongkar pasang.



Gambar 3.12 Water moor

7. Voltage regulator

Digunakan untuk mengatur tegangan pada pompa sehingga putaran *impeller* pompa dapat diatur. Oleh karena itu, debit aliran yang dikeluarkan pompa dapat diatur sebelum memasuki flowmeter. Voltage yang diatur berkisar dari 0 – 270 volt.



Gambar 3.13 Voltage regulator

8. Digital Multimeter

Data yang diperoleh dari mikroelektroda berupa arus listrik dengan satuan mA (mili Ampere). Data yang diperoleh ini kemudian dibaca oleh digital multimeter untuk kemudian data tersebut dipindahkan ke komputer melalui port USB. Agar data tersebut dapat dibaca di komputer maka telah tersedia *software* yang telah diinstall. *Software* ini dapat membaca data tersebut untuk kemudian

disimpan dalam format .txt yang dapat langsung dipindahkan ke dalam format Excel.



Gambar 3.14 Digital multimeter yang digunakan dan *software* yang digunakan untuk membaca data di komputer

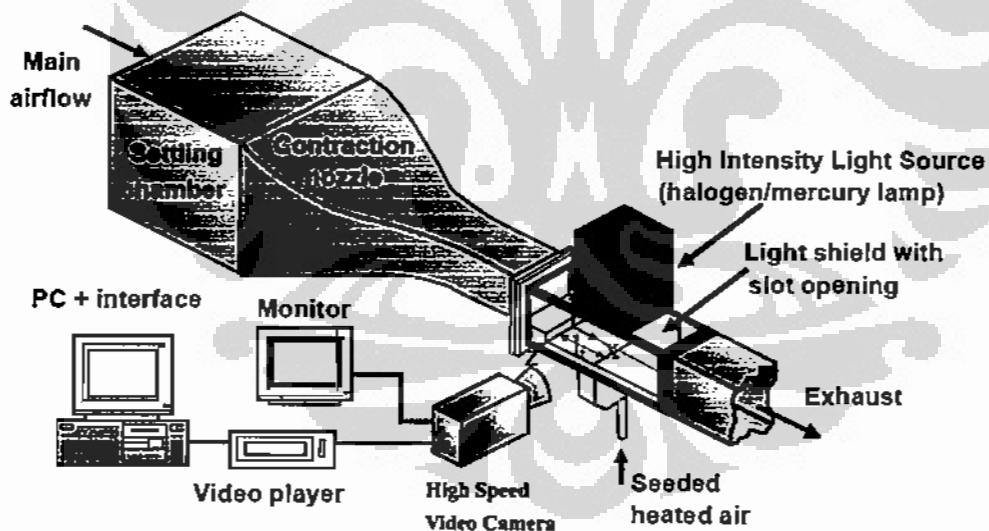
Bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah menggunakan plat tembaga sebagai katoda dan anoda serta menggunakan larutan CuSO₄ sebagai elektrolit untuk menghantarkan elektron-elektron pada tembaga. Tabel 3.3 di bawah ini adalah nilai-nilai *properties* yang penting untuk penelitian pada kedua bahan tersebut.

Tabel 3.3 *Properties* pada tembaga dan larutan CuSO₄

<i>Properties</i>	Tembaga	CuSO ₄
ρ density (kg/m ³)	8933	1072
μ viskositas (kg/m.s)	-	0,001149
ν viskos. kinematik (m ² /s)	-	1,072 x 10 ⁻⁶
Mr berat molekul (kg/mol)	64	250
C konsentrasi (mol/m ³)	-	500
D diffusivitas ion (m ² /s)	-	4,43 x 10 ⁻¹⁰
Schmidt	-	2418

3.2 Kajian Struktur Thermal Aliran Pada Daerah Resirkulasi Dengan Injeksi Gas Panas

Penelitian ini merupakan lanjutan atas penelitian yang telah dilakukan terlebih dahulu. Dalam penelitian terdahulu tersebut distribusi temperatur rata-rata diukur pada kondisi injeksi udara panas dengan temperatur awal 100°C dan 300°C , temperatur tersebut diukur dengan menggunakan termometer digital. Dalam penelitian ini, peningkatan dilakukan dengan melakukan pengembangan alat ukurnya yaitu menggunakan metode diagnostik aliran menggunakan *Light sheet based high speed visualization* yang direkam dengan pencitraan gambar menggunakan *high speed camera* dan kemudian diolah dengan perangkat lunak pengolah citra (*image processing software*) sehingga dapat dianalisis lebih lanjut untuk mendapatkan informasi mengenai berbagai fitur struktur aliran yang termodifikasi akibat eksitasi jet pada medan aliran resirkulasi serta melakukan pendekatan komputasi menggunakan software CFD (*Computational Fluid Dynamics*) untuk memvalidasi kegiatan yang dilakukan dengan eksperimen. Berikut ini gambar dibawah menjelaskan peralatan yang dipergunakan untuk mendapatkan pencitraan aliran resirkulasi dengan model *backward facing step*.



Gambar 3.15 Skema Set up visualisasi berkecepatan tinggi berbasis lembar cahaya

3.2.1 Metode Komputasi Kajian Struktur Thermal

Metode komputasi yang digunakan untuk memvalidasi dari data-data eksperimental yang telah dihasilkan dari penelitian eksperimental terdahulu maupun yang bersumber dari berbagai literatur terkait sebagai pembandingnya. Uraian lebih rinci mengenai aspek komputasi yang akan dilakukan ditunjukkan pada tabel 3.4

No.	Aspek Metodologi	Uraian
1.	Formulasi Masalah	- Pengembangan skema komputasi (<i>computational scheme</i>) dan uji eksperimental untuk model uji aliran resirkulasi dengan eksitasi eksternal (<i>injeksi slot jet</i>)
2.	Model Komputasi dan Formulasi Matematika	Model Komputasional : - Aliran dua dimensi antar pelat sejajar dengan <i>wall-boundary deformation and flow perturbation</i> - Model turbulensi : k- ϵ standard, model alternatif [Yang, 1997] Formulasi Matematika : Solusi numerik persamaan konservasi, persamaan energi kinetik (k) dan laju dissipasi (ϵ) turbulen, persamaan Navier-Stokes terata-rata waktu pada kondisi aliran tak mampu mampat
3.	Prosedur Numerik dan Eksekusi	- Algoritma : SIMPLE, Diskritisasi : volume kontrol berdasar metode beda hingga dengan skema <i>power-law</i> , Grid : non-uniform - Eksekusi : simulasi dua dimensi dengan aplikasi software CFD
4.	Analisis Hasil dan Intrepetasi	- Komparasi, verifikasi dan validasi skema komputasi dengan data eksperimen

3.2.2 Peralatan Kajian Struktur Thermal

Peralatan penelitian yang dipergunakan dalam mengambil data aliran resirkulasi dengan model geometri *backward facing step* antara lain adalah :

a. Blower Sentrifugal

Sebuah *blower* sentrifugal digunakan untuk menyuplai udara *ambient* dengan kecepatan yang dapat diatur. Udara tersebut di salurkan melalui pipa paralon dengan diameter dalam sebesar 4 inchi. Blower ini di jalankan menggunakan energi listrik dengan tegangan 250 volt.



Gambar 3.16 Blower Sentrifugal

b. Wind Tunnel Skala Kecil

Wind tunnel merupakan alat yang digunakan untuk menghasilkan aliran udara dengan profil kecepatan yang seragam pada keluaran *nozzle*, dengan luasan yang sesuai pada seksi uji *inlet test section*.

Spesifikasi wind tunnel yang digunakan pada penelitian ini yaitu :

- Penyearah aliran (*straightener*)

Bagian ini berfungsi untuk menyearahkan aliran udara. Pada wind tunnel ini terdiri dari dua penyearah, yang pertama terletak pada saat udara memasuki *wind tunnel*, dimana terjadi perubahan penampang dari pipa menjadi kotak. Kedua terletak setelah aliran udara melewati *diffuser* dan yang kedua ini dimensinya lebih besar. Untuk menyearahkan aliran ini di gunakan sedotan plastik yang diletakkan di dalam penyearah tanpa adanya ruang kosong.

- *Diffuser*

Diffuser digunakan untuk mengurangi kecepatan aliran udara. Aliran udara sengaja diturunkan untuk mengurangi turbulensi aliran udara yang keluar dari *blower*. *Diffuser* diletakkan tepat setelah penyearah kecil.

- Lapisan penyekat (*screens*)

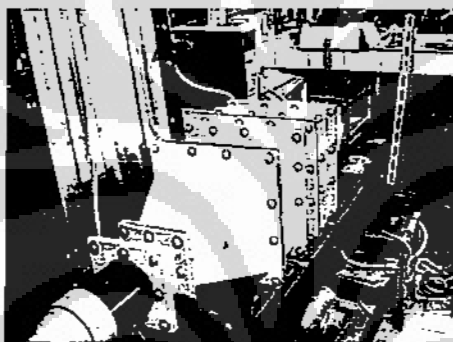
Di antara setiap bagian *wind tunnel* di tempelkan lapisan penyekat (*meshwire*) yang berukuran 18 lubang per inci² yang digunakan untuk memperkecil turbulensi, sehingga pada saat udara memasuki *nozzle* diharapkan turbulensi udara cukup kecil dan dapat dikatakan laminar.

- *Converging nozzle*

Bagian ini merupakan bagian terpenting dalam desain *wind tunnel* ini, karena bagian ini merupakan akhir dari segala upaya untuk menghasilkan aliran yang seragam. *Nozzle* ini memiliki *contraction ratio* sebesar 9,5:1.

- *Settling chamber*

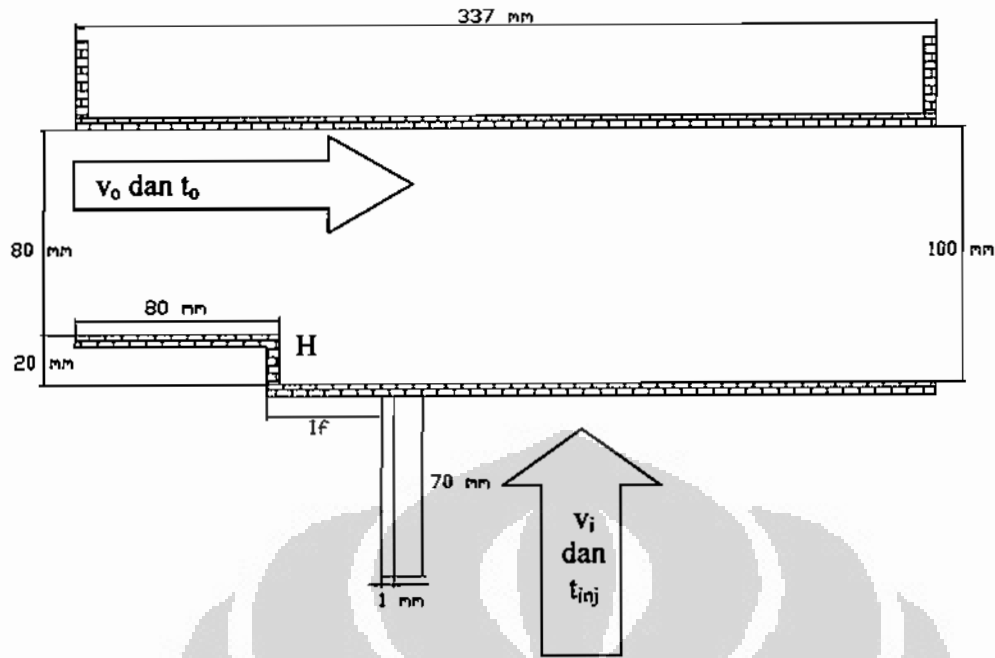
Merupakan bagian yang berisi section-section *wind tunnel* yang memiliki lapisan penyekat (*screen*). Bagian-bagian tersebut dapat dibongkar pasang. *Design* seperti ini dimaksudkan agar bagian dalamnya dapat dibersihkan secara berkala.



Gambar 3.17 Wind Tunnel

c. Test section

Penelitian dilakukan pada tempat pengujian (*test section*) dengan dimensi $80 \times 80 \text{ mm}^2$ pada inlet dan memiliki tinggi tangga (H) 20 mm, dengan panjang total 337 mm. Pada plat bagian dasar terdapat celah melintang dengan panjang 70 mm dan lebar 1 mm yang digunakan untuk injeksi udara panas, dengan jarak sebesar l_j dari tangga ($2H$ dan $4H$), seperti terlihat pada gambar 3.2. *Reattachment point* berada di daerah sekitar $5,5 H$ ^[1].



Gambar 3.18 Potongan dan dimensi *test section*

d. Kompresor

Kompresor digunakan untuk mengalirkan udara panas yang ada di dalam *heater*. Untuk mengatur debit aliran udara dari kompresor yaitu dengan menggunakan sebuah manometer kapiler yang terlebih dahulu di kalibrasi dengan menggunakan *flow meter*.

e. Heater

Udara panas yang timbul dihasilkan oleh *heater*. *Heater* tersebut di desain khusus untuk menghasilkan udara panas hingga 800°C dengan daya 2000 Watt. Untuk mengatur suhunya digunakan sebuah *Thermocontrol analog*. Setelah keluar dari *heater* ini udara panas tersebut melewati sebuah wadah kecil yang berisi bola-bola baja yang dimaksudkan agar aliran yang masuk ke dalam *test section* merata di setiap sisi celah.

f. Nebulizer

Efek asap yang timbul dihasilkan oleh alat nebulizer dengan partikel-partikel yang berpendar oleh pencahayaan dari *light sheet* (lembar cahaya).

Table.3.5 *Specifications Nebulizer*

Model	NE-C28
Type	Non-heating compressor nebulizer
Electrical	230V, 50Hz model

Power Consumption	138 VA
Nebulizer Rate	0.4 ml/min (without cap)
Particle Size	MMD approximately 5 μ m (based on EN13544-1)
Medication Cup Capacity	7 ml (cc) max
Appropriate Medication Quantities	2-7 ml (cc)
Operating Temperature / Humidity	+10 ⁰ C to + 40 ⁰ C, 30% to 85% RH
Storage Temperature / Humidity	-20 ⁰ C to + 60 ⁰ C, 10% to 95% RH
Weight	Approx. 1.9kg (compressor only)
Dimensions	Approx. 170 (W) x 103 (H) x 182 (D) mm
Contents	Compressor, Nebulizer Kit, Air Tube, 5 pcs Replacement Filters, Mouthpiece, Adult Mask, Child Mask, Carrying Bag, Instruction Manual.



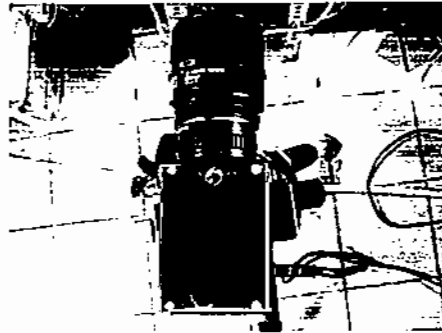
Gambar 3.19 Nebulizer

g. High Speed Camera

Alat yang digunakan untuk merekam aliran yang ditimbulkan oleh penghasil aliran resirkulasi dengan model geometry *back ward facing step*.

Table. 3.6 Visualization High Speed Camera

Camera	High Speed Video Camera
Recording	62 frame/s
Exposure	1/4000 s (shutter speed)
Digitizing	VITcam video capture
Image	1280 x 512 (.avi format)
Resolution	280 dpi



Gambar 3.20 High Speed Camera

h. Light Sheet

Lembar cahaya yang digunakan untuk memendarkan partikel-partikel yang dihasilkan oleh alat penghasil efek asap (*Nebulizer*).

Table.3.7 Light Sheet

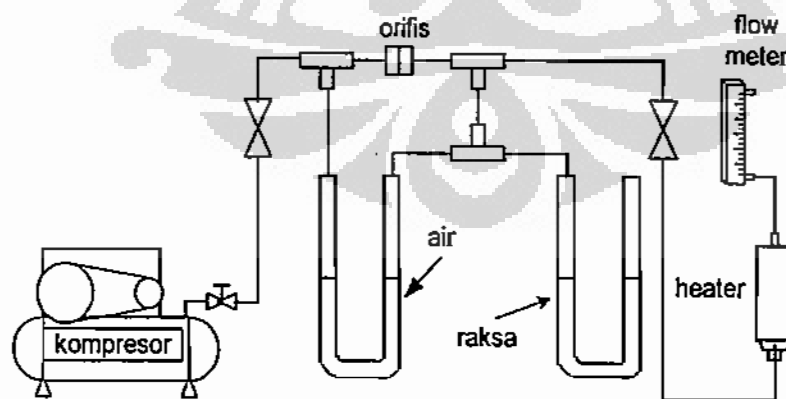
Sumber Cahaya	Halogen Lamp (1000 Watt) or Mercury Lamp
Tebal lembar cahaya	Ketebalan, $t = 0.4 \text{ mm}$
Intensitas lembar cahaya	Bervariasi kurang dari 3% dari nilai puncak di bagian pusat

3.2.3 Peralatan Pengukuran

Peralatan pengukuran yang digunakan untuk mendapatkan data mentah pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

a. Manometer Kapiler

Alat ini berguna untuk mengukur debit udara yang akan dialirkan menuju *heater*. Sebelumnya piranti ini telah dikalibrasi dengan sebuah *flow meter* yang berkapasitas *30 scfh (standard cubic feet per hour)*.



Gambar 3.21 Kalibrasi Manometer Kapiler

Udara yang dialirkan melewati manometer kapiler, akan terbaca dari perbedaan ketinggian permukaan pada manometer berisi air. Manometer yang berisi raksa berfungsi untuk membaca *back pressure*. Dalam hal ini *back pressure* dijaga konstan. Begitu timbul ΔH pada manometer air, ΔH pada raksa harus konstan. *Back pressure* dijaga pada 250mmHg, kemudian dilihat nilai yang terbaca pada manometer air dan *flow meter* maka didapatkan satu data kalibrasi. Untuk kalibrasi tersebut diambil 15 data secara sembarang dengan 3 macam variasi *back pressure*, yaitu 150, 250, dan 350mm. Dari data tersebut dapat dibuat grafik serta persamaan garisnya. Meskipun demikian hanya satu persamaan yang digunakan untuk pengukuran. Skema manometer kapiler beserta skema pengkalibrasiannya dapat dilihat pada gambar 3.21.

b. Digital Thermometer

Digital Thermometer ini digunakan untuk mengukur temperatur yang terjadi di atas lubang pengukuran dan juga digunakan untuk mengukur temperatur injeksi. Termometer ini merk FLUKE type S50 dengan ketelitian 0.1°C . Termometer ini dihubungkan dengan termokopel tipe K.

3.2.4 Kondisi Percobaan

Kondisi percobaan dilakukan dengan menginjeksikan udara melalui celah sempit dari bagian bawah *test section*. Table variasi kondisi percobaan dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

Table.3.8 Variasi Kondisi Percobaan

Jarak Injeksi (I_f)	Rasio Spesifik Momentum (I)	Kec. Aliran Udara (v_0) Temperatur Dingin (t_0)	Kec.Injeksi (v_i) Temperatur Injeksi (t_{inj})
2H = 40 mm	0,1	1,2 m/s dan 30°C	0,42 m/s dan 100°C
		1,8 m/s dan 30°C	0,78 m/s dan 300°C
4H = 80 mm	0,5	1,2 m/s dan 30°C	0,94 m/s dan 100°C
		2,5 m/s dan 30°C	2,5 m/s dan 300°C

Table. 3.9 Density Fluida Udara

Temp ($^{\circ}\text{C}$)	ρ (kg/m^3)
30° Celcius	1.165 kg/m^3
100° Celcius	0.9461 kg/m^3
300° Celcius	0.6159 kg/m^3

Sejumlah parameter di variasikan guna mendapatkan struktur aliran yang terjadi di daerah tangga (*step*)

- ❖ Letak Injeksi (I_f) : 2H (40mm) dan 4H (80mm)
- ❖ Temperatur (T) : 100°C dan 300°C
- ❖ Rasio Spesifik Momentum (I) : 0.1 dan 0.5

Dari ketiga parameter tersebut dapat dikombinasikan menjadi 8 kombinasi parameter (2x2x2).

3.2.5 Prosedur Pengambilan Data

Sebelum melakukan pengambilan data terlebih dahulu dilakukan pengaturan kecepatan *blower*, kecepatan serta temperatur injeksi untuk mendapatkan perbandingan rasio spesifik momentum injeksi yang diharapkan, dengan persamaan sebagai berikut :

$$I = \frac{\rho_i v_i^2}{\rho_0 v_0^2} \dots\dots\dots [3.1]$$

I = Rasio Spesifik Momentum

v_i = Kecepatan Injeksi (m/s)

v_0 = Kecepatan Aliran Utama (m/s)

ρ_i = Density fluida injeksi (kg/m³)

ρ_0 = Density fluida aliran utama (kg/m³)

a. Pengaturan kecepatan *blower* dan injeksi

Kecepatan *blower* diatur dengan mengeset kombinasi antara sudut bukaan pada *inlet blower* dengan sudut pada katup buang. Sebelumnya kalibrasi dilakukan antara kombinasi 2 sudut tersebut dengan sebuah *anemometer digital*. Sedangkan kecepatan injeksi diatur dengan manometer kapiler. Adanya perbedaan ketinggian pada manometer air dengan menjaga *back pressure* konstan menandakan timbulnya debit injeksi yang dapat dikonversikan ke dalam satuan kecepatan. Kedua nilai kecepatan ini di variasikan guna mencapai nilai perbandingan spesifik momentum injeksi 0.1 dan 0.5.

b. Pengaturan temperatur injeksi

Udara panas dihasilkan oleh *heater* yang telah dilengkapi dengan *thermocontrol* sehingga temperturnya dapat diatur. Setelah *thermocontrol* diset pada temperatur yang diinginkan lalu harus di tunggu kurang lebih 15 s/d 30

menit agar temperaturnya relatif stabil. *Thermocontrol* yang dipakai adalah *thermocontrol analog* jenis *on-off*. Sementara *heater* menyala, aliran udara yang berasal dari kompresor harus dialirkan, untuk memastikan temperaturnya sudah berada di sekitar temperatur yang diinginkan, diperlukan termokopel (tipe K) yang dibaca menggunakan *digital thermometer*. Ujung termokopel ini di letakkan di atas lubang udara injeksi.

c. Pengukuran kecepatan aliran udara rata-rata

Pengukuran V_0 dilakukan dengan menggunakan *orifice* yang terpasang setelah *blower* searah aliran. Pada sisi-sisi *orifice* ini dibuat *pressure tap* yang dihubungkan oleh selang ke manometer kapiler yang telah dikalibrasi dengan sebuah *flow meter* berkapasitas 30 scfh (*standard cubic feet per hour*). Udara di alirkan melewati manometer kapiler, maka akan terbaca adanya perbedaan ketinggian permukaan pada manometer berisi air.



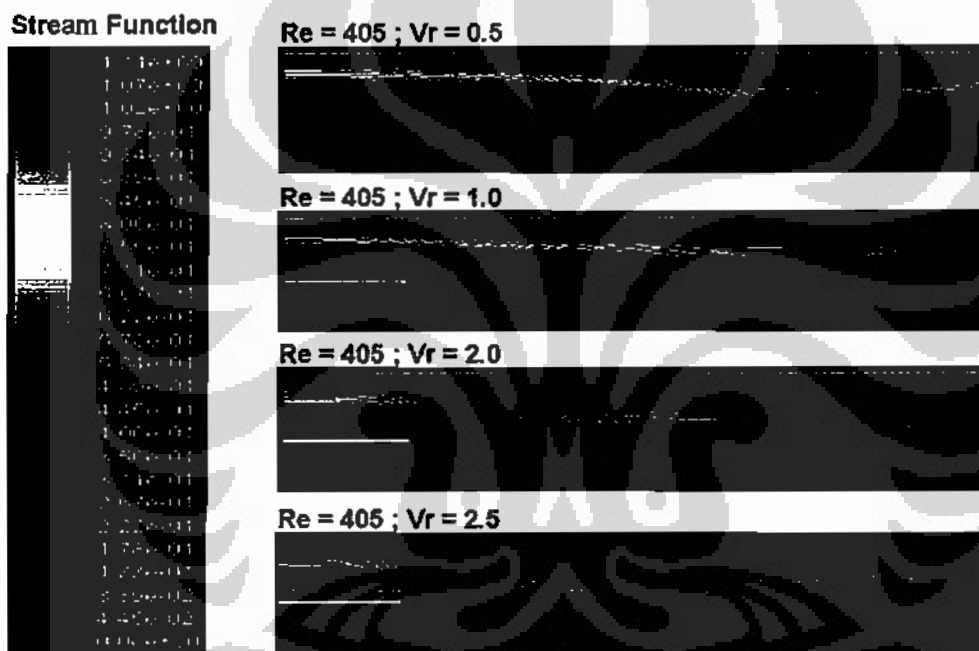
BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Kajian Perpindahan Massa Konvektif Di Medan Aliran Sel Elektrokimia Pelat Sejajar

4.11 Garis Alir (Stream Function)

Berdasarkan hasil simulasi yang dilakukan dengan menggunakan software CFD (*Computational Fluid Dynamics*) maka didapat karakteristik medan aliran resirkulasi di bawah pengaruh eksitasi eksternal kontrol turbulensi hidrodinamik yang direpresentasikan dalam visualisasi garis-garis fungsi arus (*stream fuction*) dengan bilangan Reynold 405 dan pengaruh dari kecepatan injeksi.



Gambar 4.1 Pengaruh kontrol turbulensi hidrodinamik jet $Re = 405$

Dari gambar 4.1 diatas terlihat bahwa pembentukan zona aliran resirkulasi (*recirculation zone*) di bagian belakang kontur tangga (*step*) pada bilangan Reynold 405 dengan kondisi rasio kecepatan yang diberikan, adanya injeksi jet yang diberikan tidak menghilangkan zona aliran resirkulasi tetapi memberikan pengaruh yang signifikan terhadap besarnya zona resirkulasi aliran tersebut, dengan meningkatnya rasio kecepatan jet pengontrol terlihat bahwa panjang zona resirkulasi semakin memendek. Hal ini menandakan bergesernya lapisan geser

dan juga berpindahnya lokasi rata-rata titik pertautan kembali (*time averaged reattachment point*) upstream. Dengan hal ini maka region aliran dengan tingkat turbulensi tinggi akan bergeser ke arah hulu dan pembentukan lapisan batas baru yang kembali berkembang (*new sub boundary layer*) akan terjadi lebih awal.

Kemudian gambar 4.2 menjelaskan karakteristik medan aliran pada bilangan Reynold 1513 yang terlihat di bawah ini memiliki kecenderungan yang sama pada bilangan Reynold 405. Panjang zona aliran resirkulasi berkurang seiring dengan meningkatnya rasio kecepatan jet pengontrol. Jika melihat pengaruh dari bilangan Reynold aliran utama hasil yang didapat cukup sejalan dengan hasil berbagai penelitian dasar terdahulu mengenai kurang signifikannya pengaruh Re pada karakteristik medan aliran di belakang kontur tangga (*step*) [33,34].

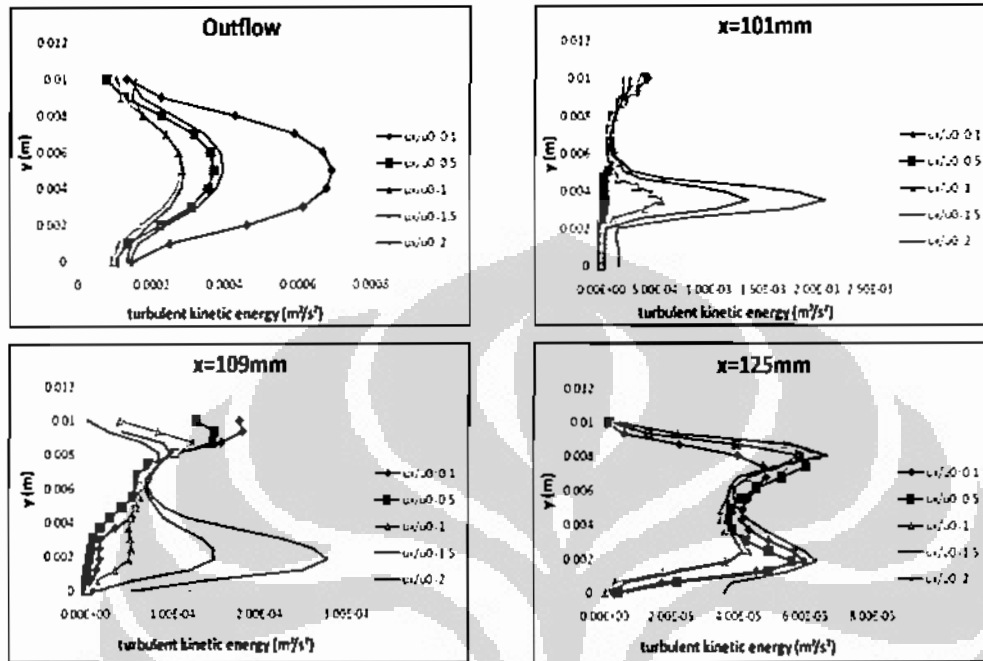


Gambar 4.2 Pengaruh kontrol turbulensi hidrodinamik jet Re 1513

4.12 Tingkat Turbulensi

Tingkat turbulensi aliran merupakan parameter yang sangat penting dalam mendukung sifat-sifat perpindahan (*transport properties*) secara konvektif pada aliran. Dalam penelitian ini tingkat turbulensi aliran diperkirakan merupakan faktor utama yang mendorong peningkatan laju perpindahan massa antar elektroda. Gambar 4.3 menunjukkan tingkat energi kinetik untuk kondisi aliran dengan

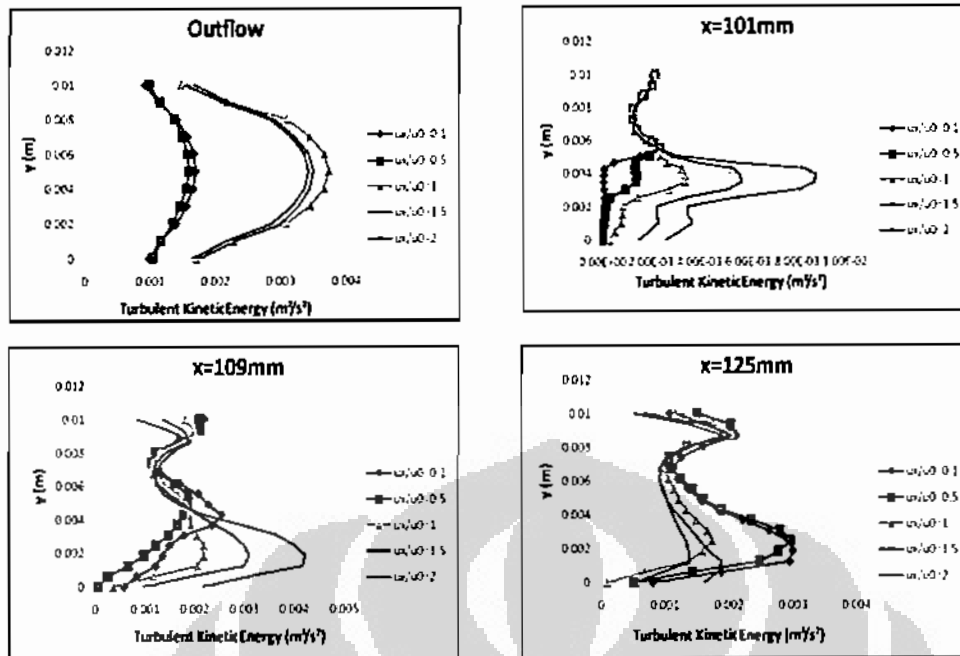
Reynold 405. Terlihat bahwa untuk semua lokasi, eksitasi jet pengontrol memberikan pengaruh sangat signifikan terhadap tingkat energi kinetik turbulensi. Dengan semakin besarnya rasio kecepatan jet pengontrol maka tingkat energi kinetik juga semakin meningkat.



Gambar 4.3 Pengaruh kontrol turbulensi hidrodinamika jet pada tingkat energi kinetik aliran $Re = 405$

Melihat dari grafik diatas tersebut nilai energi kinetik turbulensi, pengaruh rasio kecepatan jet pengontrol turbulensi terlihat lebih dominan pada lokasi yang terletak lebih ke hulu. Hal ini sejalan dengan semakin bergesernya lapisan geser dan titik pertautan kembali ke arah hulu yang ditunjukkan pada medan aliran rata-ratanya. Selain itu terlihat pula peningkatan tingkat energi kinetik turbulensi pada lapisan batas baru yang terbentuk kembali setelah pertautan pada lokasi semakin ke arah hilir. Dengan nilai $x = 125$ mm, terlihat bahwa tingkat turbulensi pada lapisan batas baru ini sudah mendekati tingkatan yang sama dengan tingkat turbulensi pada lapisan gesernya.

Selanjutnya gambar 4.4 menunjukkan tingkat energi kinetik untuk kondisi aliran dengan bilangan $Re = 1513$. Terlihat kecenderungan yang sama dengan kondisi $Re = 1513$ dimana dengan semakin besarnya rasio kecepatan jet pengontrol maka tingkat energi kinetik juga semakin meningkat.



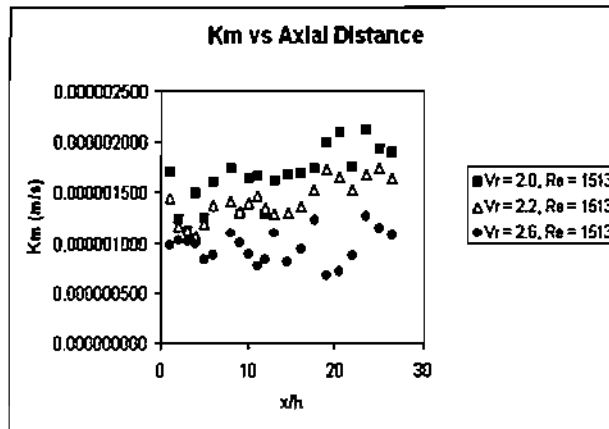
Gambar 4.4 Pengaruh kontrol turbulensi hidrodinamika jet pada tingkat energi kinetik aliran $Re = 1513$

Selain itu terlihat pula perbedaan kecenderungan pada peningkatan tingkat energi kinetik turbulensi pada lapisan batas baru yang terbentuk kembali setelah pertautan pada lokasi semakin ke arah hilir. Untuk $Re = 1513$ terlihat bahwa tingkat turbulensi pada lapisan batas baru ini melebihi dengan tingkat turbulensi pada lapisan gesernya seperti yang ditunjukkan pada posisi $x = 109 \text{ mm}$ dan posisi $x = 125 \text{ mm}$.

4.2 Karakteristik Perpindahan Massa Konvektif – Kontrol Hidrodinamika

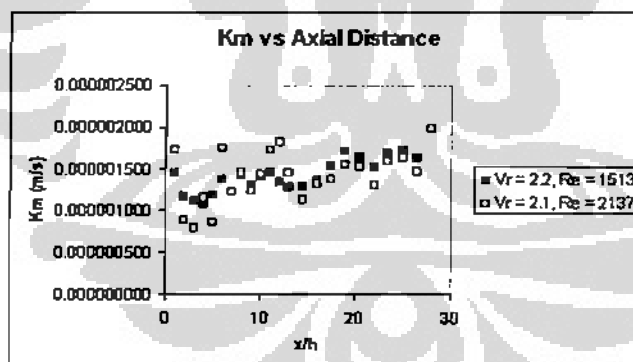
4.2.1 Distribusi Koefisien Perpindahan Massa

Pengaruh rasio kecepatan jet pengontrol turbulensi terhadap distribusi koefisien perpindahan massa konvektif, K_m sepanjang arah aksial ($x/h = 0-30$) yang diperoleh dari pengukuran secara eksperimental dengan metode *limiting diffusion current* ditunjukkan pada gambar 4.5 di bawah ini untuk kondisi aliran dengan bilangan $Re = 1513$. Dari gambar terlihat bahwa pada peningkatan rasio kecepatan jet pengontrol turbulensi akan menyebabkan menurunnya koefisien perpindahan massa konvektif. Selain itu terlihat pula dengan meingkatnya rasio kecepatan jet pengontrol turbulensi, distribusi koefisien massa sepanjang arah aksial menjadi fluktuatif/tersebar, terutama pada daerah lebih ke hilir.



Gambar 4.5 Distribusi koefisien perpindahan massa konvektif, K_m sepanjang arah aksial pada beberapa rasio kecepatan, V_r jet pengontrol turbulensi ($Re = 1513$)

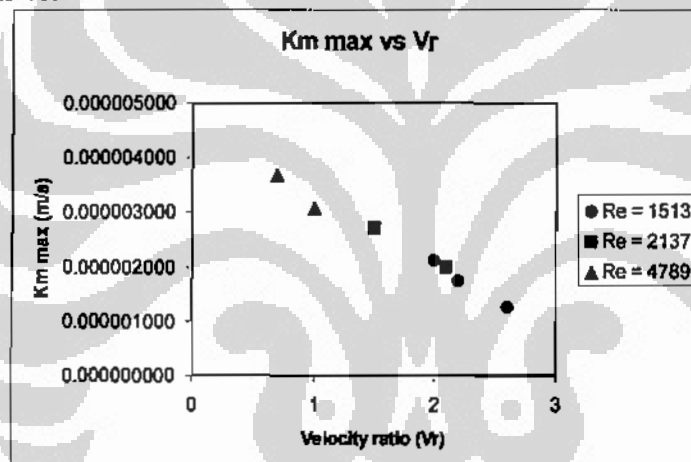
Gambar 4.6 menunjukkan pengaruh bilangan Reynold aliran terhadap distribusi koefisien perpindahan massa konvektif, K_m sepanjang arah aksial untuk pada rasio kecepatan jet pengontrol turbulensi yang relatif tetap ($V_r = 2.1-2.2$). Terlihat dari gambar bahwa bilangan Reynolds relatif kurang memberikan pengaruh yang signifikan pada perubahan nilai rata-rata koefisien perpindahan massa konvektif. Namun demikian, dengan meningkatnya bilangan Reynolds, distribusi koefisien perpindahan massa konvektif sepanjang arah aksil menjadi lebih fluktuatif/tersebar.



Gambar 4.6 Pengaruh bilangan Reynolds, Re pada distribusi koefisien perpindahan massa konvektif, K_m sepanjang arah aksial ($V_r = 2.1-2.2$)

4.2.2 Koefisien Perpindahan Massa Maksimum

Salah satu aspek penting yang berkaitan dengan karakteristik perpindahan massa yang menjadi fokus perhatian penelitian ini adalah laju perpindahan massa maksimum yang dinyatakan dengan koefisien koefisien perpindahan massa maksimum yang dapat dicapai dengan mengontrol turbulensi secara aktif. Gambar 4.7 menunjukkan grafik hubungan koefisien perpindahan massa maksimum ($K_m \max$) dengan rasio kecepatan (V_r) pada berbagai bilangan Reynolds. Dari grafik terlihat bahwa pada aliran elektrolit dengan Reynolds yang lebih tinggi menghasilkan penurunan $K_m \max$. Dari uraian sebelumnya, diperkirakan karakteristik tersebut disebabkan peningkatan TKE yang mendukung peningkatan sifat-sifat laju perpindahan (*rate of transport properties*) seiring dengan kenaikan Re serta mengecilnya zona aliran resirkulasi turbulen akibat peningkatan V_r .

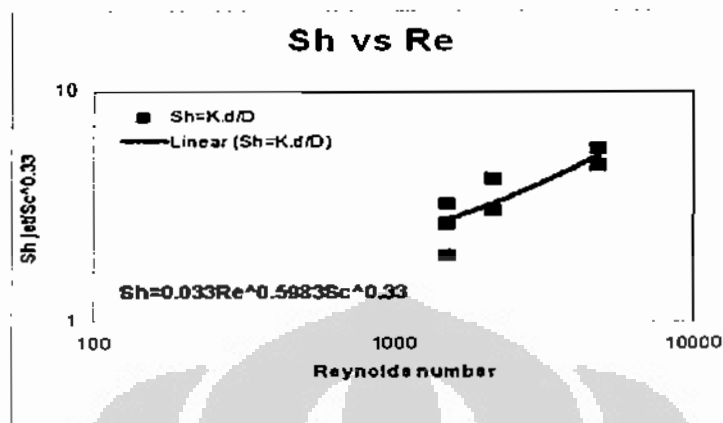


Gambar 4.7 Pengaruh rasio kecepatan jet pengontrol terhadap koefisien perpindahan massa maksimum, $K_m \max$ pada berbagai bilangan Reynolds

4.2.3 Relasi Tak Berdimensi Perpindahan Massa

Relasi-relasi antar parameter fisik pada fenomena perpindahan biasanya dinyatakan sebagai relasi parameter tak berdimensi. Pada kajian mass transfer, relasi tak berdimensi biasanya dinyatakan dalam hubungan antara bilangan Sherwood (Sh), bilangan Schmidt (Sc) dan bilangan Reynolds (Re). Gambar 4.8 menunjukkan plot skala log dari $Sh/Sc^{0.33}$ puncak terhadap Re , yang dirata-ratakan dari seluruh kondisi eksperimen yang dilakukan. Disini, bilangan Sherwood didasarkan pada diameter hidrolis dari penampang laluan aliran dibagian hulu dari

kontur tangga. Plot ini memberikan sebuah korelasi dari data yang relatif cukup memadai dalam rentang $1500 < Re < 4800$ dan $0.7 < Vr < 2.6$. Persamaan korelasi yang terbentuk adalah $Sh = 0.033Re^{0.5983}Sc^{0.33}$.

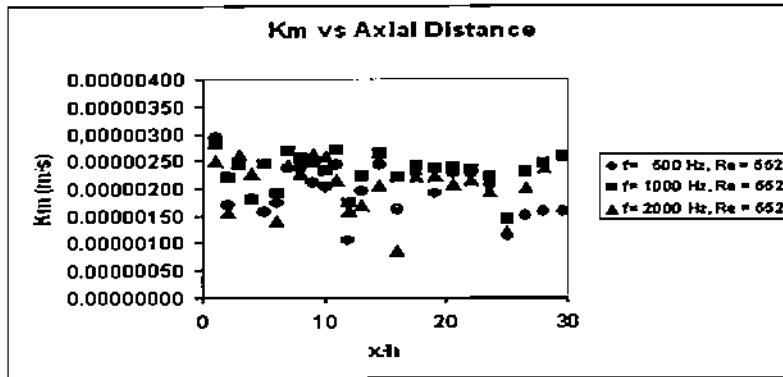


Gambar 4.8 Plot skala log dari $Sh/Sc^{0.3}$ puncak terhadap bilangan Reynolds pada katoda

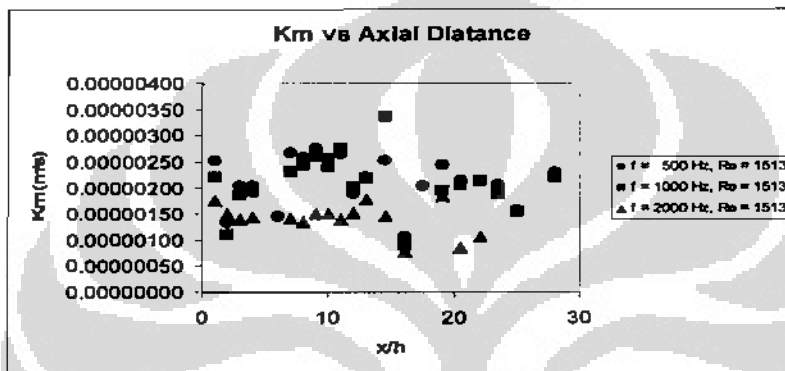
4.3 Karakteristik Perpindahan Massa Konvektif – Kontrol Akustik Mekanik

4.3.1 Distribusi Koefisien Perpindahan Massa

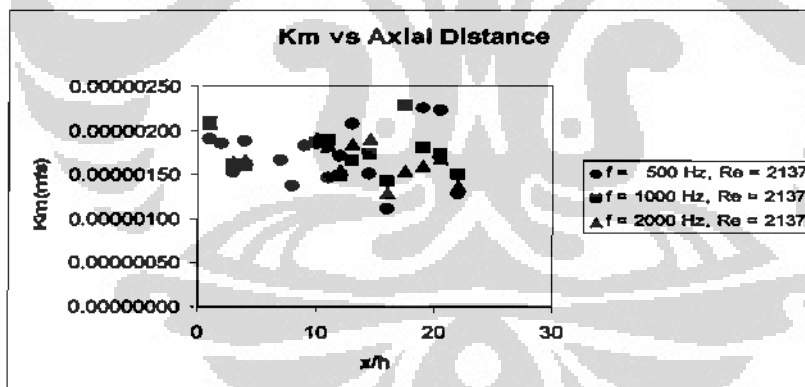
Pengaruh frekuensi eksitasi akustik terhadap distribusi koefisien perpindahan massa konvektif, K_m sepanjang arah aksial ($x/h = 0-30$) yang diperoleh dari pengukuran secara eksperimental ditunjukkan pada gambar 4.9 untuk kondisi aliran dengan bilangan Reynolds, (a) $Re = 552$, (b) $Re = 1513$ dan (c) $Re = 2137$. Dibandingkan dengan metode kontrol hidrodinamik, distribusi koefisien perpindahan massa konvektif yang terukur lebih tersebar nilainya dan kurang terlihat kecenderungan yang konsisten dari pengaruh peningkatan frekuensi eksitasi terhadap perubahan K_m . Namun demikian, di sebagian besar lokasi, peningkatan frekuensi eksitasi akan mengurangi koefisien perpindahan massa. Hal ini terlihat lebih jelas kondisi aliran elektrolit dengan bilangan Reynolds = 552 dan Reynolds = 1513.



(a) $Re = 552$



(b) $Re = 1513$

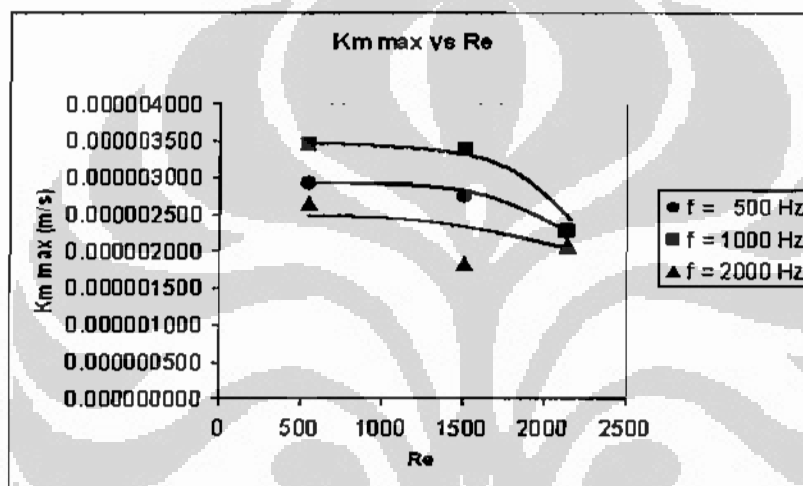


(e) $Re = 2137$

Gambar 4.9 Pengaruh Peningkatan frekuensi eksitasi terhadap distribusi koefisien perpindahan massa konvektif, K_m sepanjang arah aksial pada beberapa bilangan Reynolds (a) $Re = 552$ (b) $Re = 1513$ dan (e) $Re = 2137$

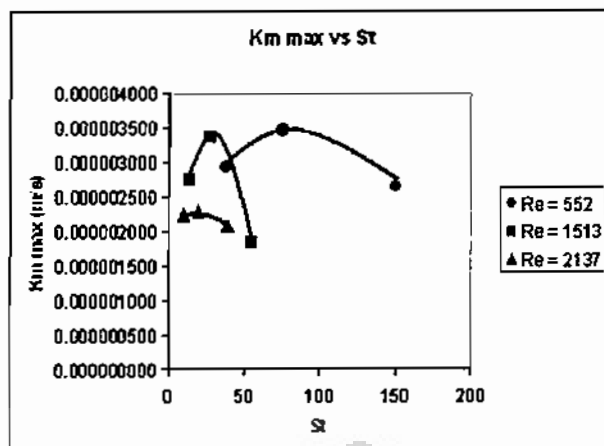
4.3.2 Koefisien Perpindahan Massa Maksimum

Laju perpindahan massa maksimum yang dinyatakan dengan koefisien perpindahan massa maksimum yang dapat dicapai dengan mengontrol turbulensi secara akustik-mekanik ditunjukkan pada gambar 4.10. Dari grafik pada gambar terlihat bahwa untuk suatu frekuensi eksitasi akustik tertentu, peningkatan bilangan Reynolds aliran akan mengurangi nilai koefisien perpindahan massa maksimum. Indikasi lain yang ditunjukkan pada gambar adalah semakin kurang signifikannya pengaruh frekuensi eksitasi terhadap koefisien perpindahan massa maksimum untuk bilangan Reynolds yang tinggi. Dalam hal ini, nilai K_m maks cenderung menuju satu nilai yang konvergen untuk semua frekuensi eksitasi.



Gambar 4.10 Pengaruh bilangan Reynolds terhadap koefisien perpindahan massa maksimum, K_m max pada berbagai frekuensi eksitasi akustik.

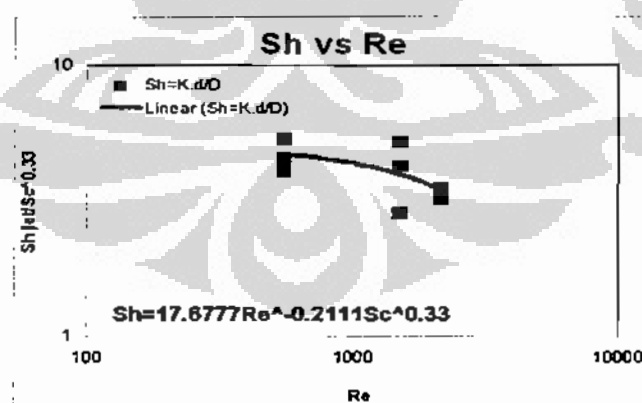
Sementara itu, jika frekuensi eksitasi dinyatakan dalam parameter tak berdimensi berupa bilangan Strouhal yang didasarkan atas kecepatan aliran utama (V_0) dan ketinggian kontur tangga (h) sebagai $St = f \cdot h / V_0$, maka hubungan antara koefisien perpindahan massa maksimum dengan bilangan Strouhal pada berbagai variasi bilangan Reynolds ditunjukkan oleh gambar 4.11. Dari gambar terdapat dua karakteristik yang cukup signifikan. Pertama terlihat adanya bilangan Strouhal optimum yang memberikan nilai K_m max untuk setiap bilangan Reynolds. Kedua pada bilangan Reynolds yang tinggi pengaruh eksitasi akustik semakin lemah.



Gambar 4.11 Pengaruh bilangan Strouhal terhadap koefisien perpindahan massa maksimum, Km Max pada berbagai bilangan Reynolds

4.3.3 Relasi Tak Berdimensi Perpindahan Massa

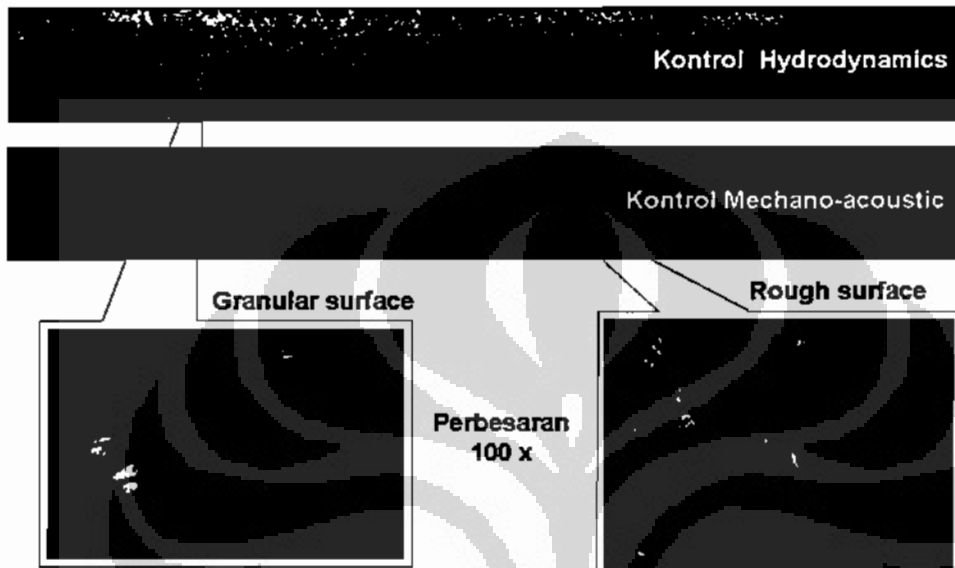
Seperti halnya pada eksperimen kontrol turbulensi dengan hidrodinamika jet pengontrol, relasi tak berdimensi perpindahan massa konvektif biasanya dinyatakan dalam hubungan antara bilangan Sherwood (Sh), bilangan Schmidt (Sc) dan bilangan Reynolds (Re). Gambar 4.12 menunjukkan plot skala log dari $Sh/Sc^{0.33}$ puncak terhadap Re, yang dirata-ratakan dari seluruh kondisi eksperimen yang dilakukan. Disini, bilangan Sherwood didasarkan pada diameter hidrolik dari penampang laluan aliran dibagian hulu dari kontur tangga. Plot ini memberikan sebuah korelasi dari data yang relatif cukup memadai dalam rentang $550 < Re < 2150$ dan $10 < St < 150$. Persamaan korelasi yang terbentuk adalah $Sh = 17.678Re^{-0.2111}Sc^{0.33}$



Gambar 4.12 Plot skala log dari $Sh/Sc^{0.3}$ puncak terhadap bilangan Reynolds pada katoda

4.3.4 Karakteristik Permukaan Elektroda Hasil Proses Elektrokimia

Pengamatan visual terhadap permukaan elektroda hasil proses elektrokimia dilakukan untuk mendapatkan gambaran kualitatif mengenai pengaruh kontrol turbulensi terhadap karakteristik deposisi yang dihasilkan di katoda yang ditampilkan pada gambar 4.13 untuk kontrol hydrodynamics dan kontrol mechano acoustic.



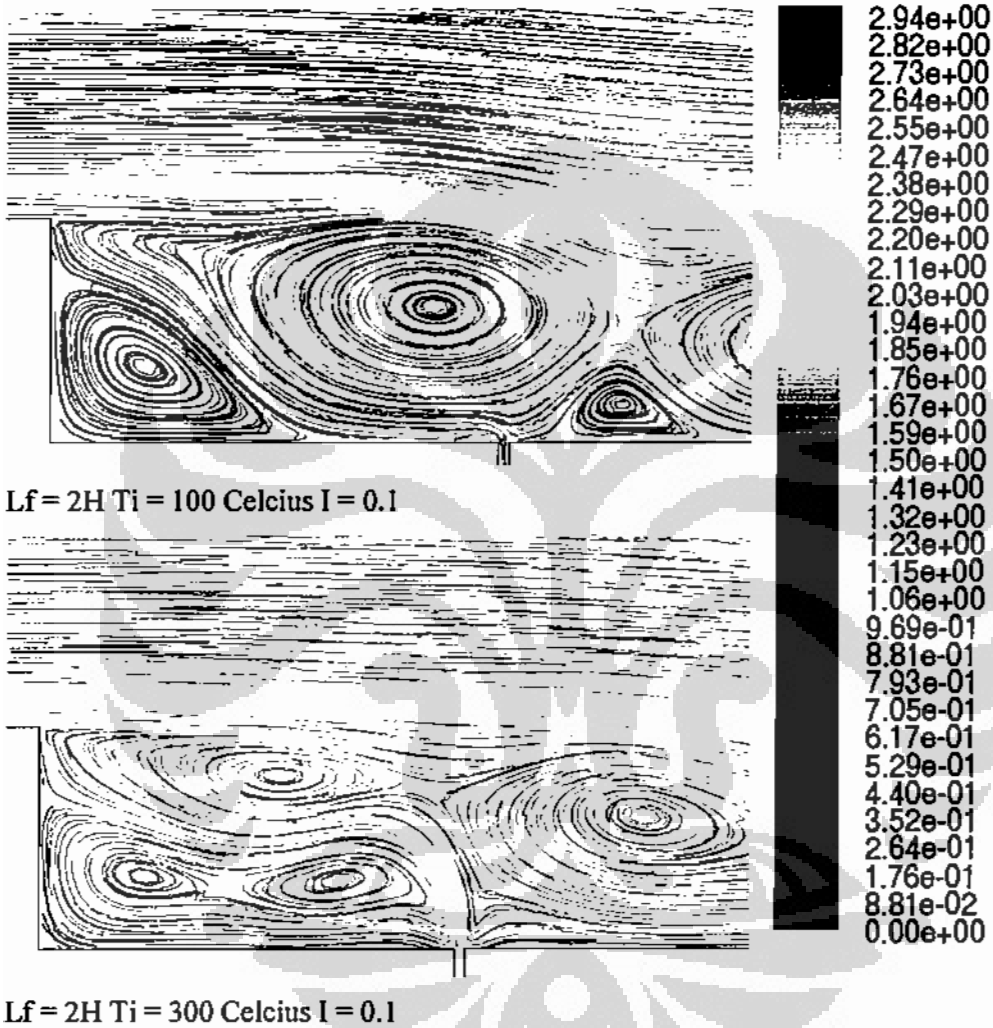
Gambar 4.13 Foto permukaan elektroda (katoda) hasil proses elektrokimia

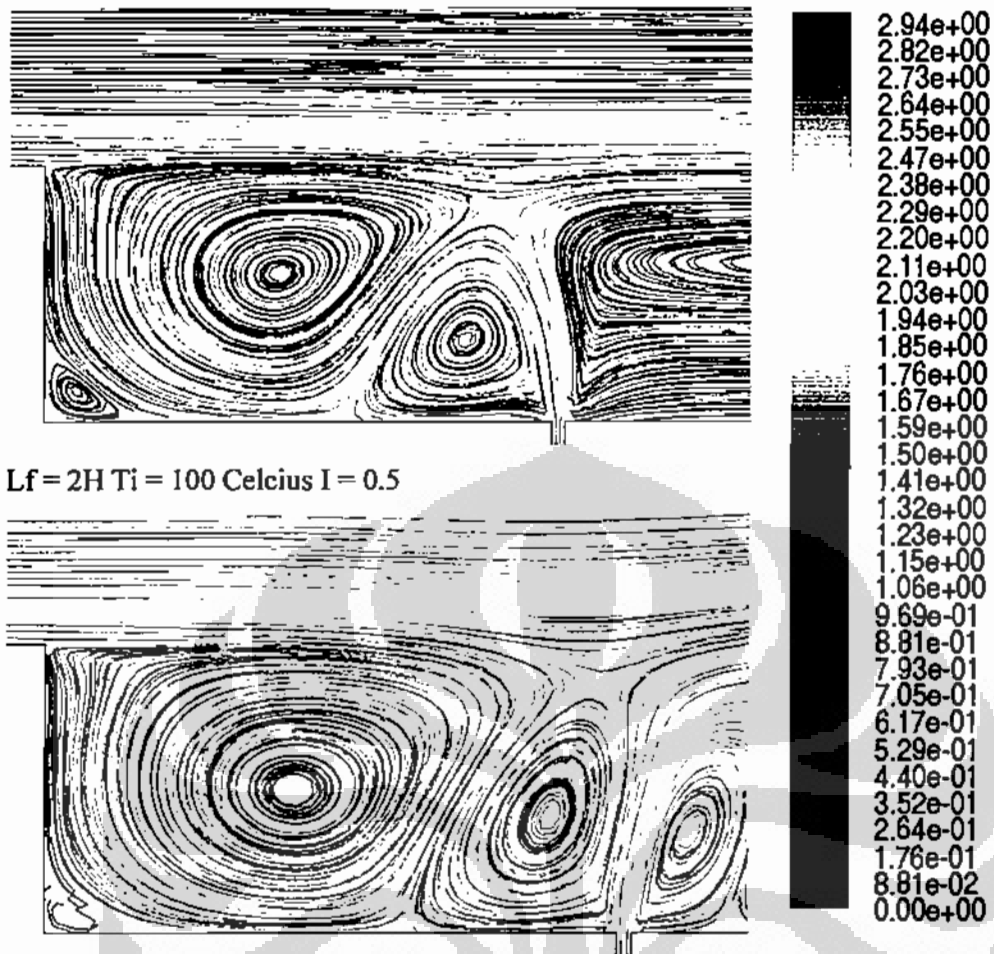
Proses elektrokimia dibawah kontrol turbulensi secara hydrodynamics dengan jet pengontrol menghasilkan permukaan granular pada katoda. Di bagian lebih ke hulu, butiran granular ini relatif berdiameter lebih kecil dibandingkan bagian lebih hilir. Hal ini mengindikasikan pengaruh jet yang menimbulkan interupsi parsial yang kontinyu pada proses deposisi. Sementara itu, proses elektrokimia dibawah kontrol turbulensi secara mechano acoustic menghasilkan permukaan yang relatif lebih seragam di seluruh bagian katoda mulai dari hulu sampai ke hilir.

4.4 Kajian Struktur Aliran Thermal Dengan Injeksi Udara Gas Panas

4.4.1 Kecepatan Rata-Rata (Velocity Magnitude)

Berdasarkan hasil simulasi dari CFD (*Computational Fluid Dynamics*) dengan variasi rasio spesifik momentum 0.1 dan 0.5 yang diberi injeksi gas panas bertemperatur 100°C dan 300°C maka diperoleh medan aliran kecepatan yang terjadi dengan bilangan Reynolds = 6250, 13 – 9375,20.





$L_f = 2H \quad T_i = 100 \text{ Celcius} \quad I = 0.5$

$L_f = 2H \quad T_i = 300 \text{ Celcius} \quad I = 0.5$

Gambar 4.14 Medan aliran kecepatan rata-rata (*velocity magnitude*) dengan injeksi udara panas temperatur 100°C dan 300°C

Pada gambar diatas terlihat bahwa zona aliran resirkulasi terbelah menjadi beberapa bagian akibat pengaruh dari injeksi udara panas yang diberikan. Hal ini menunjukkan bahwa injeksi aliran dengan jarak $2H = 40\text{mm}$ memberikan pengaruh terhadap zona aliran resirkulasi yang terjadi di bagian belakang kontur tangga (*step*) dengan kenaikan rasio spesifik momentum yang diberikan pola pencampuran aliran yang terjadi membentuk corner edy di bagian belakang tangga (*step*) hal ini di akibatkan oleh besarnya kecepatan injeksi sehingga menyebabkan aliran saluran utama tertahan lebih kuat di daerah sekitar injeksi.

Sementara itu gambar 4.15 menunjukkan karakteristik medan aliran kecepatan dengan variasi rasio spesifik momentum 0.1 dan 0.5 yang di beri injeksi

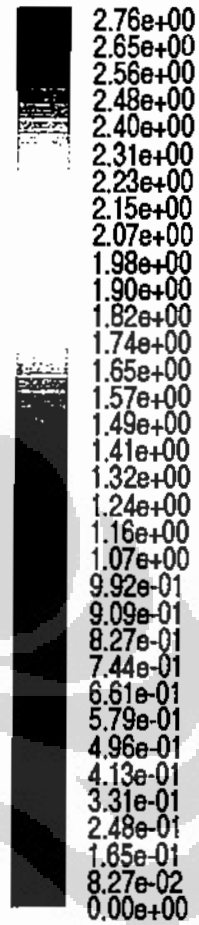
udara panas dengan temperatur 100°C dan 300°C dengan bilangan Reynolds = 6250,13- 13021,12.

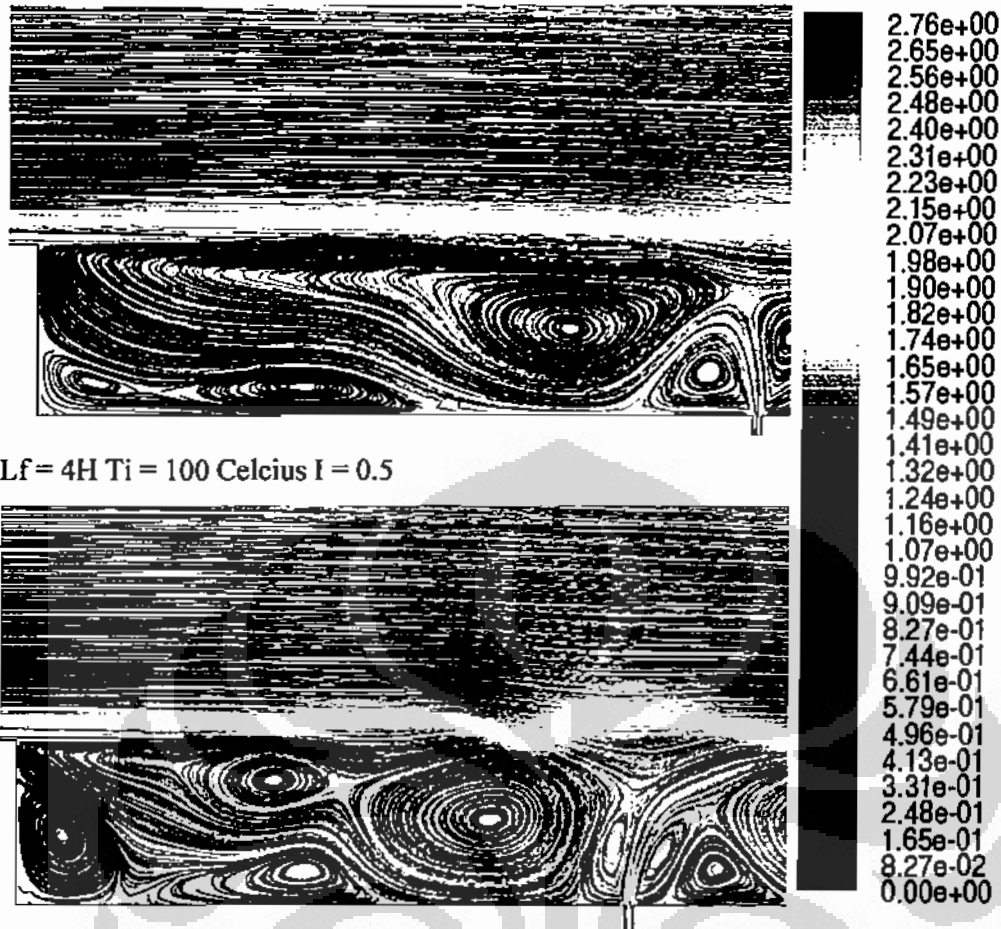


$L_f = 4H$ $T_i = 100$ Celcius $I = 0.1$



$L_f = 4H$ $T_i = 300$ Celcius $I = 0.1$





$Lf = 4H Ti = 100$ Celcius $I = 0.5$

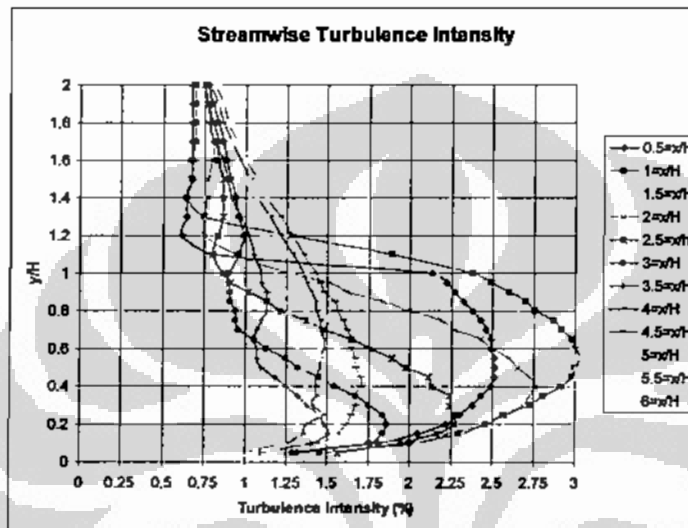
$Lf = 4H Ti = 300$ Celcius $I = 0.5$

Gambar 4.15 Medan aliran kecepatan rata-rata (*velocity magnitude*) dengan injeksi udara panas temperatur 100°C dan 300°C

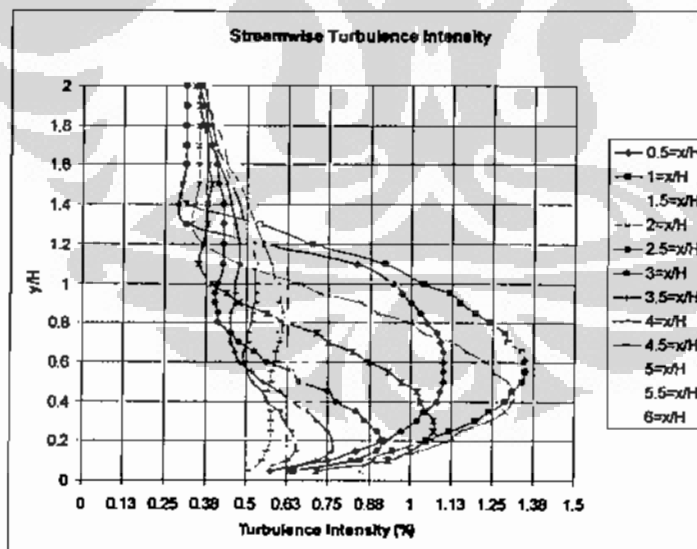
Pada gambar diatas terlihat bahwa zona aliran resirkulasi terbelah menjadi beberapa bagian hal ini disebabkan oleh temperatur injeksi udara panas yang diberikan terhadap saluran utama (*free stream*), dengan kenaikan rasio spesifik momentum injeksi yang diberikan memberikan pengaruh terhadap pola aliran resirkulasi dimana aliran resirkulasi lebih banyak terbentuk di daerah upstream yang di sebabkan oleh besarnya kecepatan injeksi sehingga saluran utama yang masuk terhalang lebih kuat oleh injeksi aliran.

4.4.2 Tingkat Turbulensi Dengan Injeksi Udara Panas

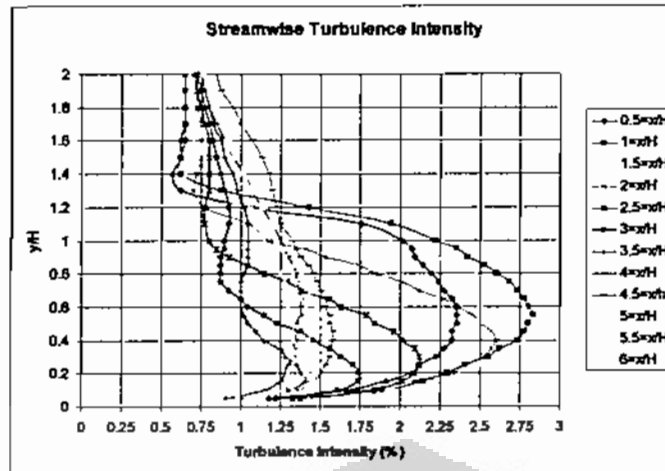
Tingkat turbulensi aliran merupakan parameter yang sangat penting dalam mendukung sifat-sifat perpindahan panas (*heat transfer*) secara konvektif pada aliran. Dalam hal ini pengaruh dari kecepatan injeksi berupa gas panas yang diberikan memberikan efek yang cukup signifikan terhadap nilai turbulence intensity, dengan semakin meningkatnya rasio spesifik momentum injeksi maka didapat nilai turbulence intensity semakin mengecil.



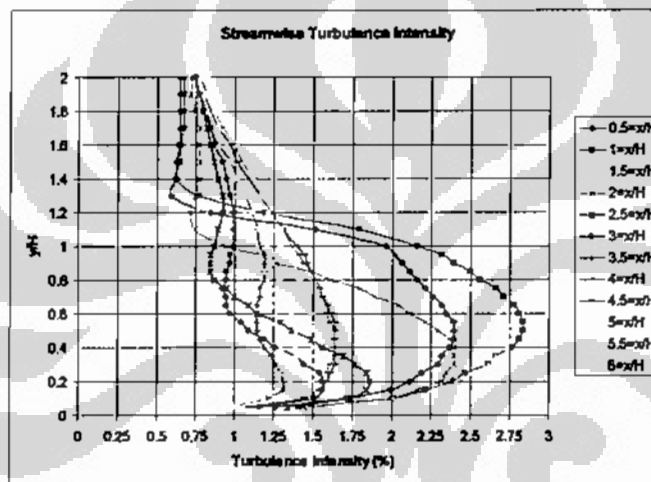
$$L_f = 2H Ti = 100 \text{ Celcius } I = 0.1$$



$$L_f = 2H Ti = 100 \text{ Celcius } I = 0.5$$



$$L_f = 2H \quad T_i = 300 \text{ Celcius} \quad I = 0.1$$



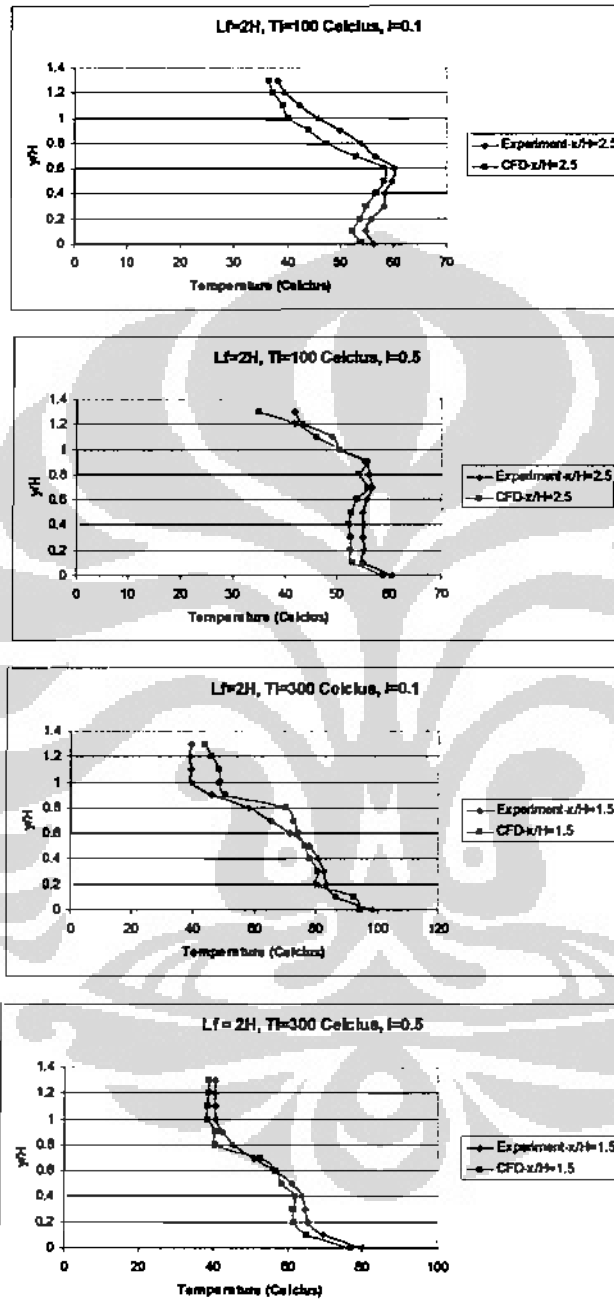
$$L_f = 4H \quad T_i = 300 \text{ Celcius} \quad I = 0.1$$

Gambar 4.16 Turbulence Intensity dengan injeksi udara panas 100°C dan 300°C

Ditinjau dari nilai turbulence intensity, pengaruh rasio kecepatan injeksi jet pengontrol aliran turbulence terlihat lebih dominan pada lokasi yang terletak di daerah *upstream*. Hal ini sejalan dengan semakin bergesernya lapisan geser dan titik pertautan kembali ke arah hulu yang ditunjukkan pada medan kecepatan aliran rata-rata. Nilai turbulence intensity maksimal diperoleh pada daerah 20mm dari tinggi tangga (*step*) hal ini disebabkan oleh perbedaan tekanan (*adverse pressure gradient*) yang terjadi antara saluran utama (*free stream*) dengan bagian belakang kontur tangga (*step*).

4.4.3 Perbandingan Hasil CFD dan Eksperimen Dengan Slot Injeksi Udara Panas.

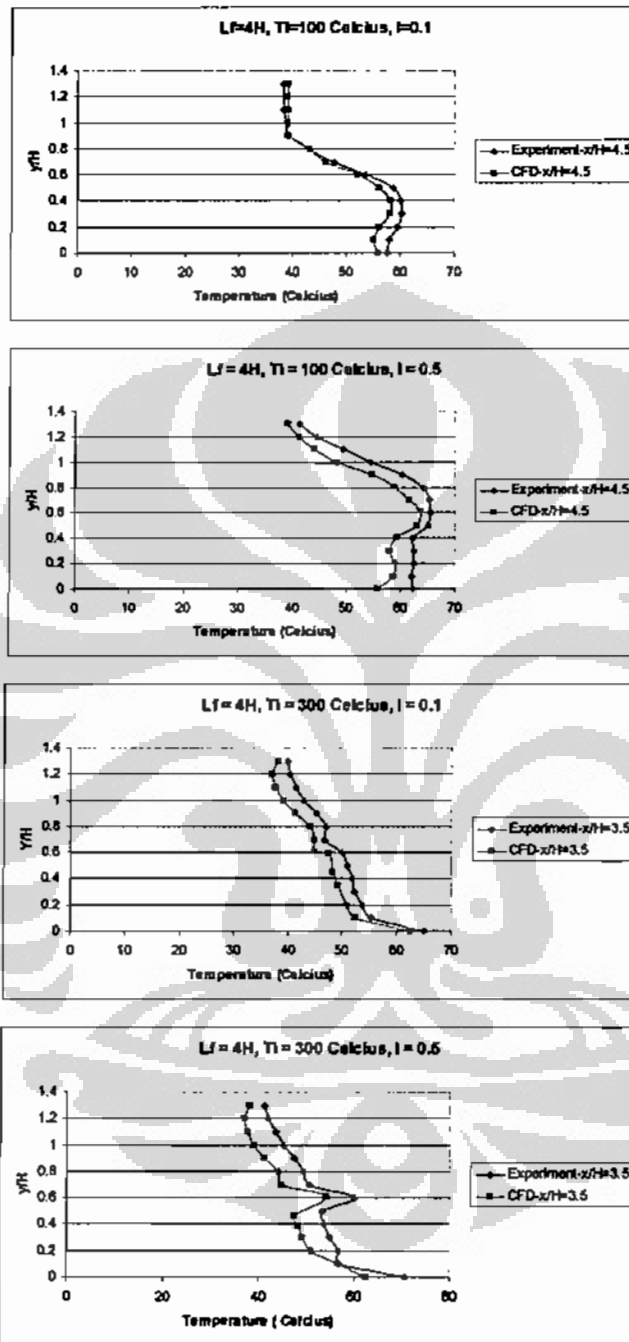
Pada gambar dibawah ini menjelaskan grafik perbandingan hasil eksperimental dengan kajian komputasi dengan menggunakan software CFD.



Gambar 4.17 Distribusi Temperatur Di Daerah Dekat Injeksi

Pada gambar di atas di peroleh hasil perbandingan dari kajian komputasi dan kegiatan eksperimental dimana nilai pengukuran yang dilakukan pada 50 mm

dari step untuk injeksi udara panas dengan jarak injeksi $2H$ temperatur 100°C dan pengukuran dilakukan pada jarak 30 mm dari step untuk injeksi udara panas dengan jarak injeksi $2H$ pada temperatur 300°C .



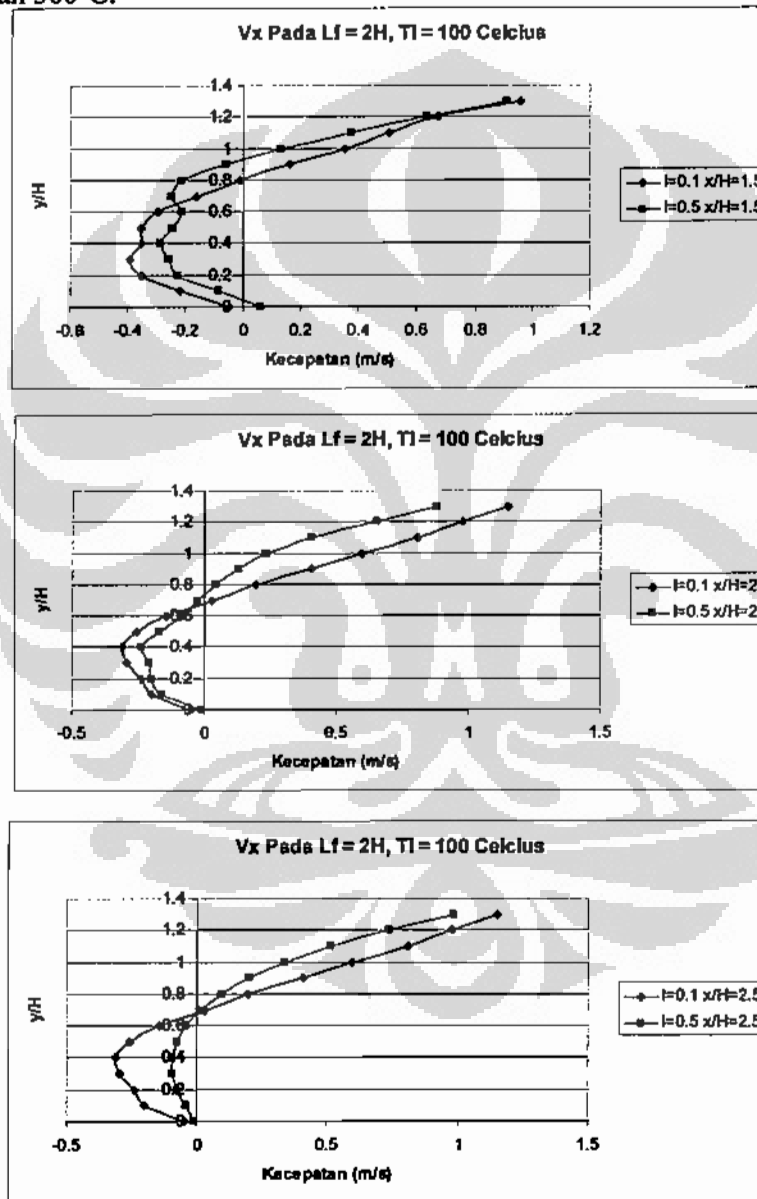
Gambar 4.18 Distribusi Temperatur Di Daerah Dekat Injeksi

Pada gambar di atas di peroleh hasil perbandingan dari kajian komputasi dan kegiatan eksperimental dimana nilai pengukuran yang dilakukan pada 90 mm

dari step untuk injeksi udara panas dengan jarak injeksi 4H temperatur 100°C dan pengukuran dilakukan pada jarak 70 mm dari step untuk injeksi udara panas dengan jarak injeksi 4H pada temperatur 300°C.

4.4.4 Kecepatan Medan Aliran Arah Sumbu X (*Velocity Profile V_x*)

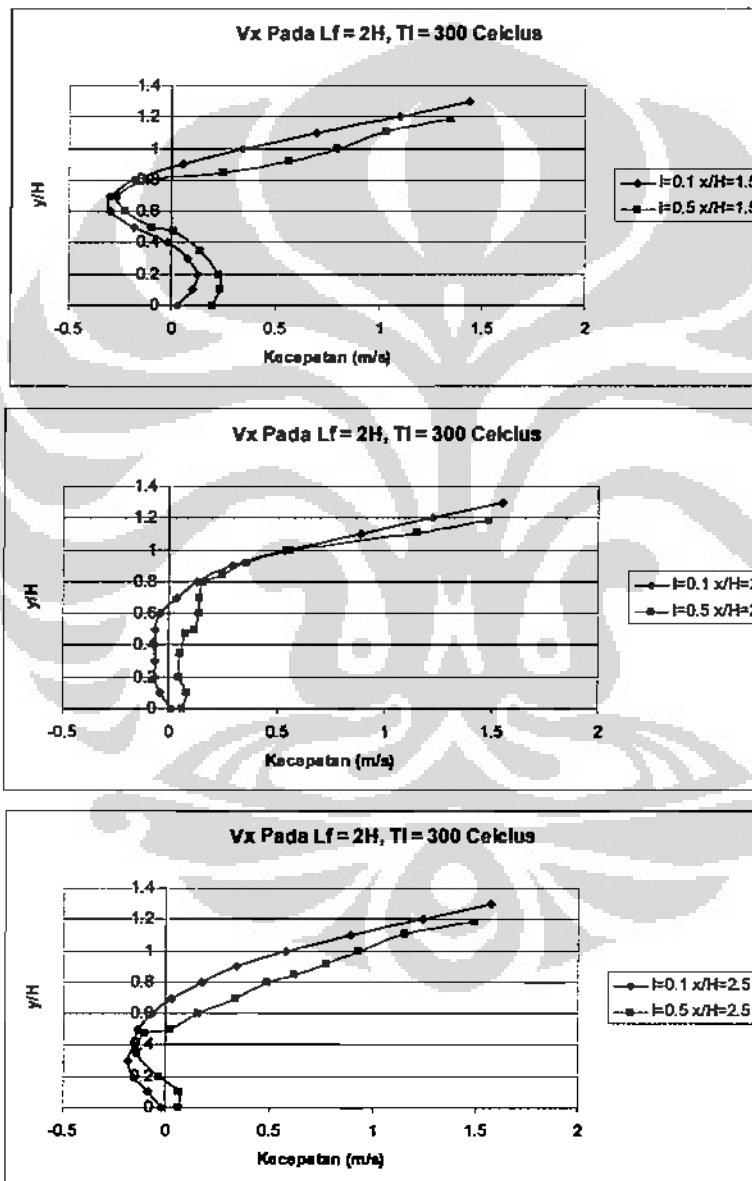
Medan aliran kecepatan yang terjadi di kanal aliran penghasil aliran resirkulasi di pengaruhi oleh rasio spesifik momentum injeksi dimana nilai rasio spesifik momentum injeksi 0.1 dan 0.5 dengan temperatur injeksi udara panas 100°C dan 300°C.



Gambar 4.19 Reynolds = 6250, 13

Pada gambar diatas menjelaskan medan aliran kecepatan dalam arah sumbu x, dengan jarak injeksi $2H = 40$ mm dari step temperatur injeksi udara panas 100°C diperoleh hasil perbandingan rasio injeksi 0.1 dan 0.5 maka didapat dengan kenaikan rasio injeksi aliran yang terjadi di kanal saluran menjadi berkurang.

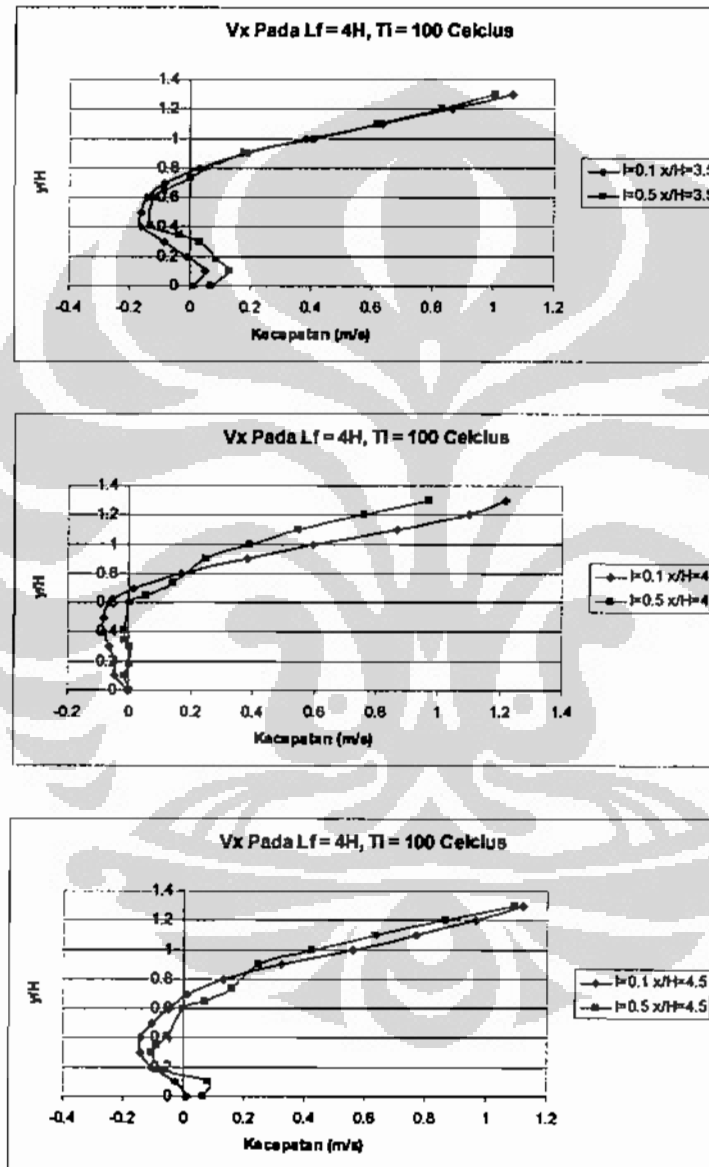
Sementara itu gambar 4.20 menjelaskan medan aliran kecepatan dalam arah sumbu x, dengan jarak injeksi $2H = 40$ mm dari step temperatur injeksi udara panas 300°C dengan rasio injeksi 0.1 dan 0.5 bilangan Reynolds 9375,20



Gambar 4.20 Reynolds = 9375,20

Dari gambar tersebut diatas diperoleh hasil yang sama dengan antara bilangan Reynolds 6250, 13 dengan kondisi bilangan Reynolds 9375,20 maka dengan kenaikan rasio injeksi memberikan pengaruh terhadap medan kecepatan aliran menjadi berkurang.

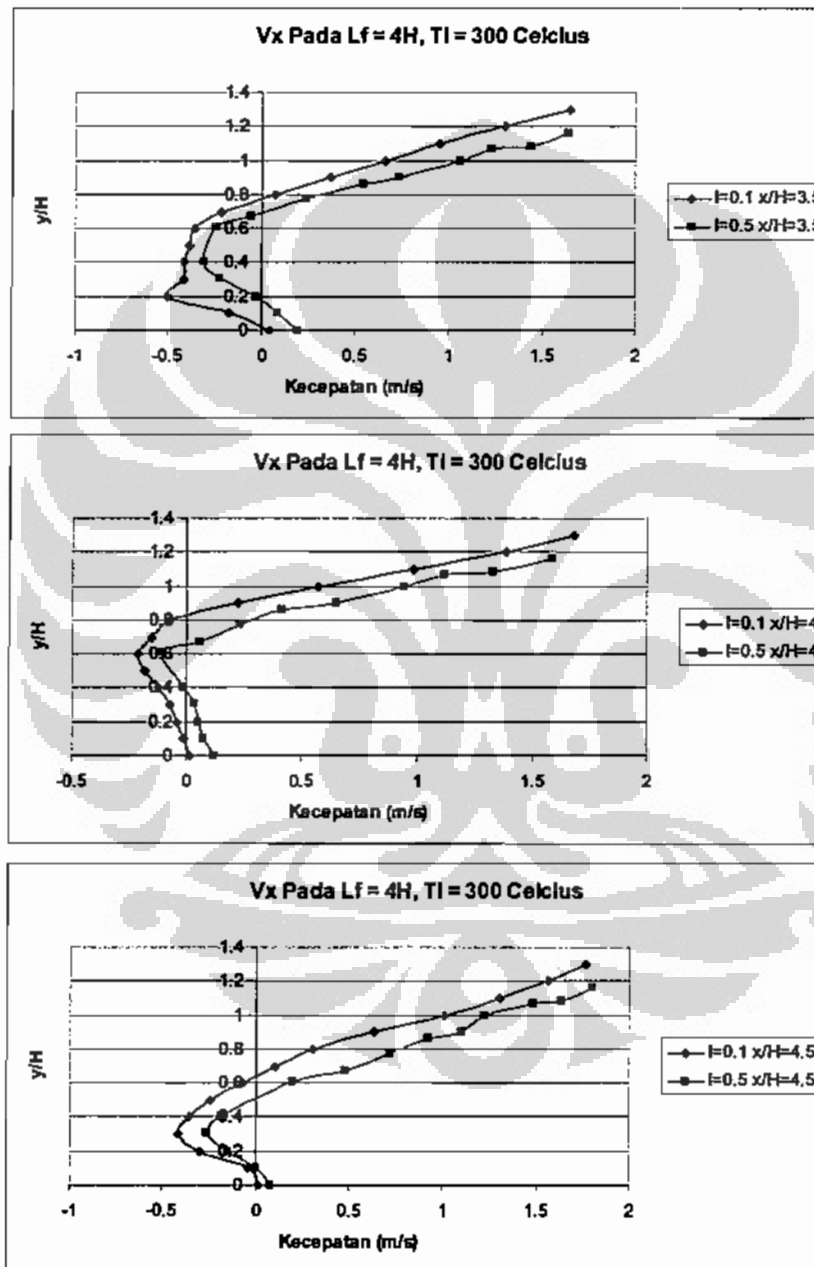
Selanjutnya pada gambar 4.21 dengan bilangan Reynolds 6250,13 dengan jarak injeksi $4H = 80$ mm dari step temperatur injeksi udara panas 100°C dimana rasio spesifik momentum injeksi 0.1 dan 0.5.



Gambar 4.21 Reynolds 6250,13

Dari gambar diatas didapatkan hasil yang hampir serupa dengan jarak injeksi $2H$, yakni dengan kenaikan rasio spesifik momentum injeksi maka kecepatan medan aliran menjadi berkurang.

Selanjutnya pada gambar 4.22 dengan bilangan Reynolds 13021,12 dengan jarak injeksi $4H = 80 \text{ mm}$ dari step temperatur injeksi udara panas 300°C dimana rasio spesifik momentum injeksi 0.1 dan 0.5.

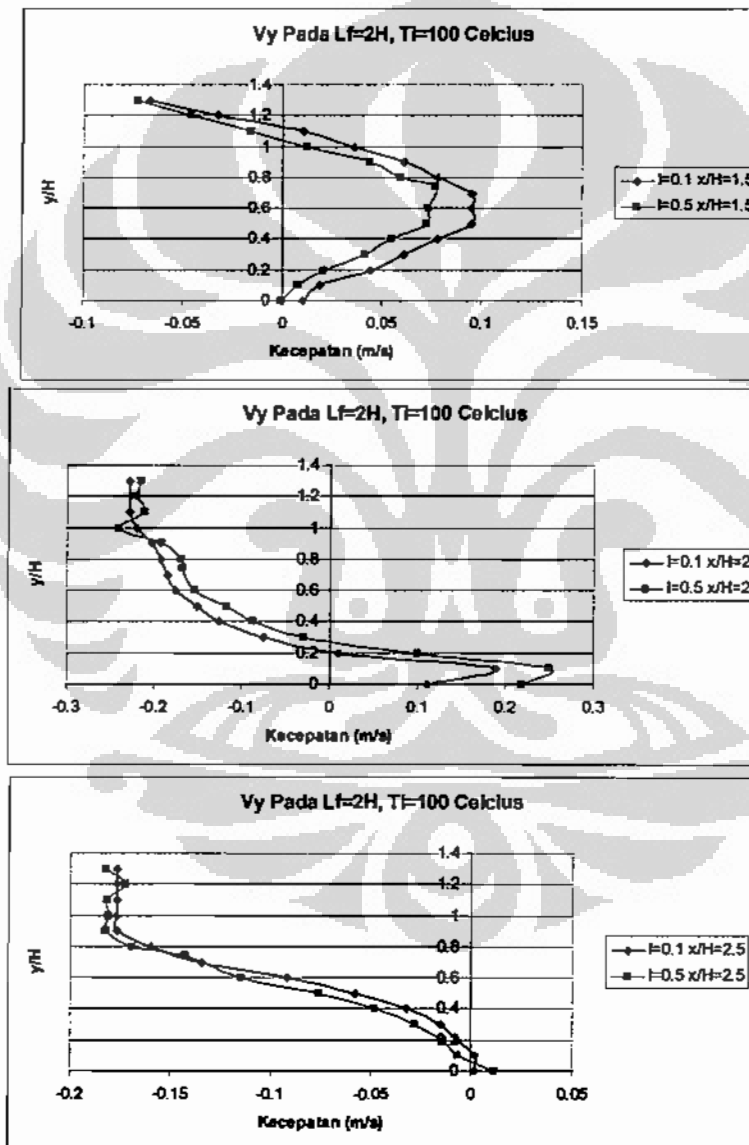


Gambar 4.22 Reynolds 13021,12

Dari gambar diatas diperoleh hasil yang menyerupai dengan bilangan Reynolds 6250,13 yakni dengan kenaikan rasio injeksi yang diberikan maka kecepatan medan aliran menjadi berkurang, hal ini di sebabkan oleh aliran saluran utama terhalang oleh besarnya injeksi yang di berikan.

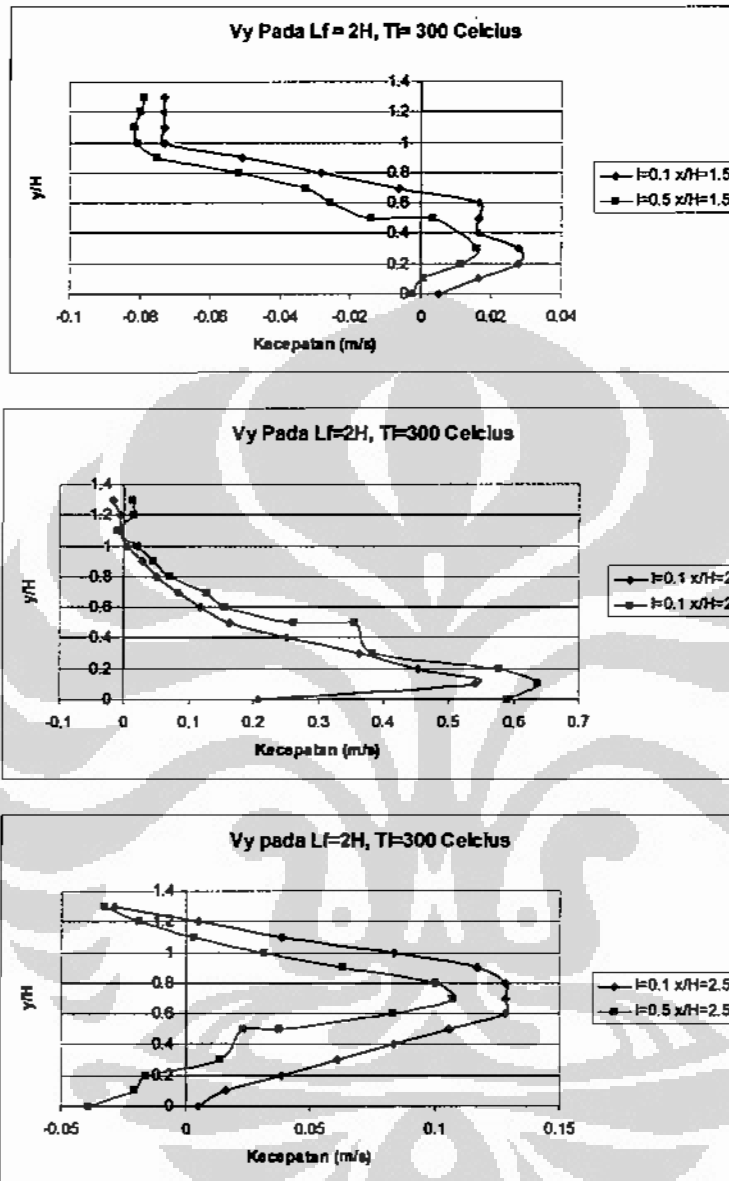
4.4.5 Kecepatan Medan Aliran Arah Sumbu Y (*Velocity Profile V_y*)

Medan aliran kecepatan yang terjadi di kanal aliran penghasil aliran resirkulasi di pengaruhi oleh rasio spesifik momentum injeksi dimana nilai rasio spesifik momentum injeksi 0.1 dan 0.5 dengan temperatur injeksi udara panas 100°C dan 300°C .



Gambar 4.23 Reynolds 6250, 13

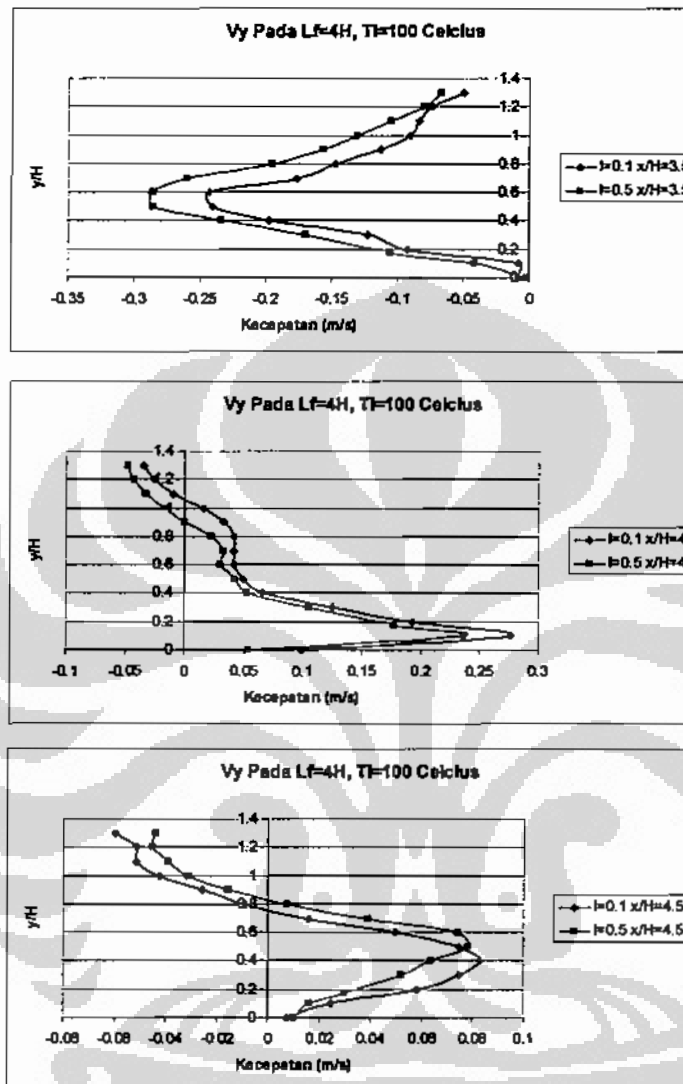
Dari gambar diatas menjelaskan bahwa pada jarak $x = 40$ mm di dapat nilai kecepatan medan aliran arah sumbu y bernilai lebih besar hal ini dipengaruhi oleh kenaikan rasio momentum injeksi yang diberikan.



Gambar 4.24 Reynolds 9375,20

Dari gambar diatas diperoleh hampir sama dengan bilangan Reynolds 6250,13 di dapat nilai kecepatan medan aliran arah sumbu y bernilai lebih besar hal ini dipengaruhi oleh kenaikan rasio momentum injeksi yang diberikan.

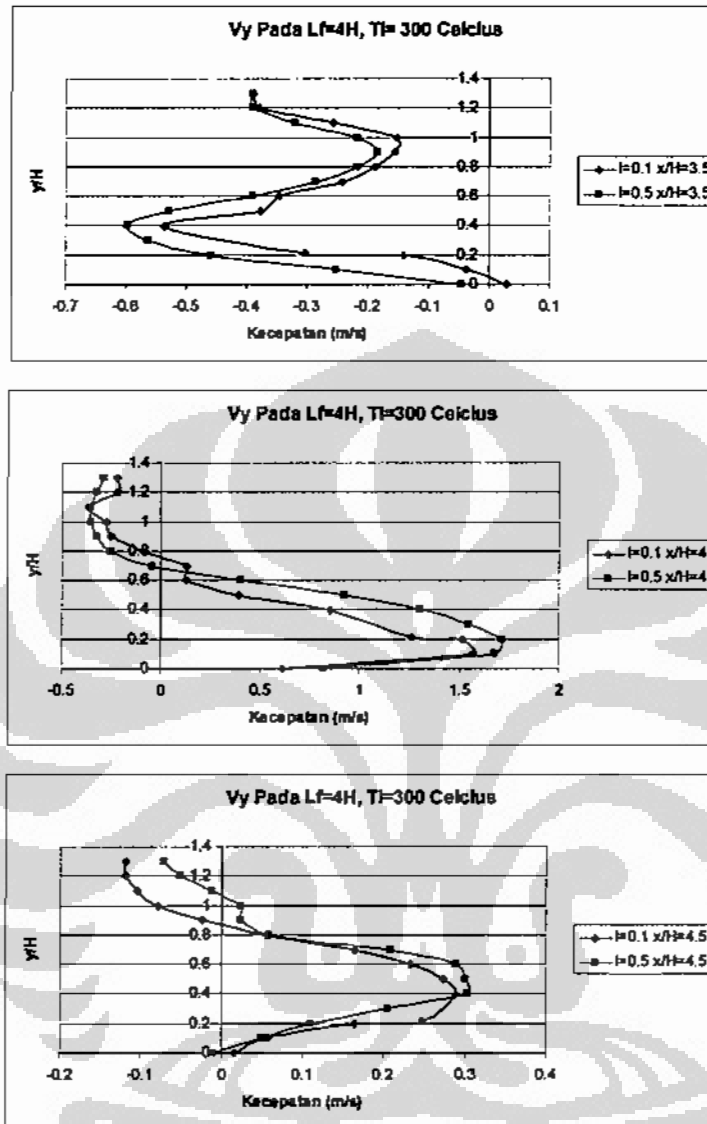
Selanjutnya pada gambar 4.25 dengan bilangan Reynolds 6250, 13 dengan jarak injeksi $4H = 80 \text{ mm}$ dari step temperatur injeksi udara panas 100°C dimana rasio spesifik momentum injeksi 0.1 dan 0.5.



Gambar 4.25 Re 6250, 13

Pada gambar di atas diperoleh nilai hasil kecepatan medan aliran arah sumbu y dengan rasio injeksi 0.1 dan 0.5 pada daerah $x = 70 \text{ mm}$ terlihat medan aliran bernilai negatif semua hal ini menjadikan aliran resirkulasi di bagian belakang kontur tangga ikut terbelah menjadi beberapa bagian.

Selanjutnya pada gambar 4.26 dengan bilangan Reynolds 13021, 12 dengan rasio momentum spesifik injeksi 0.1 dan 0.5 injeksi udara panas 300°C

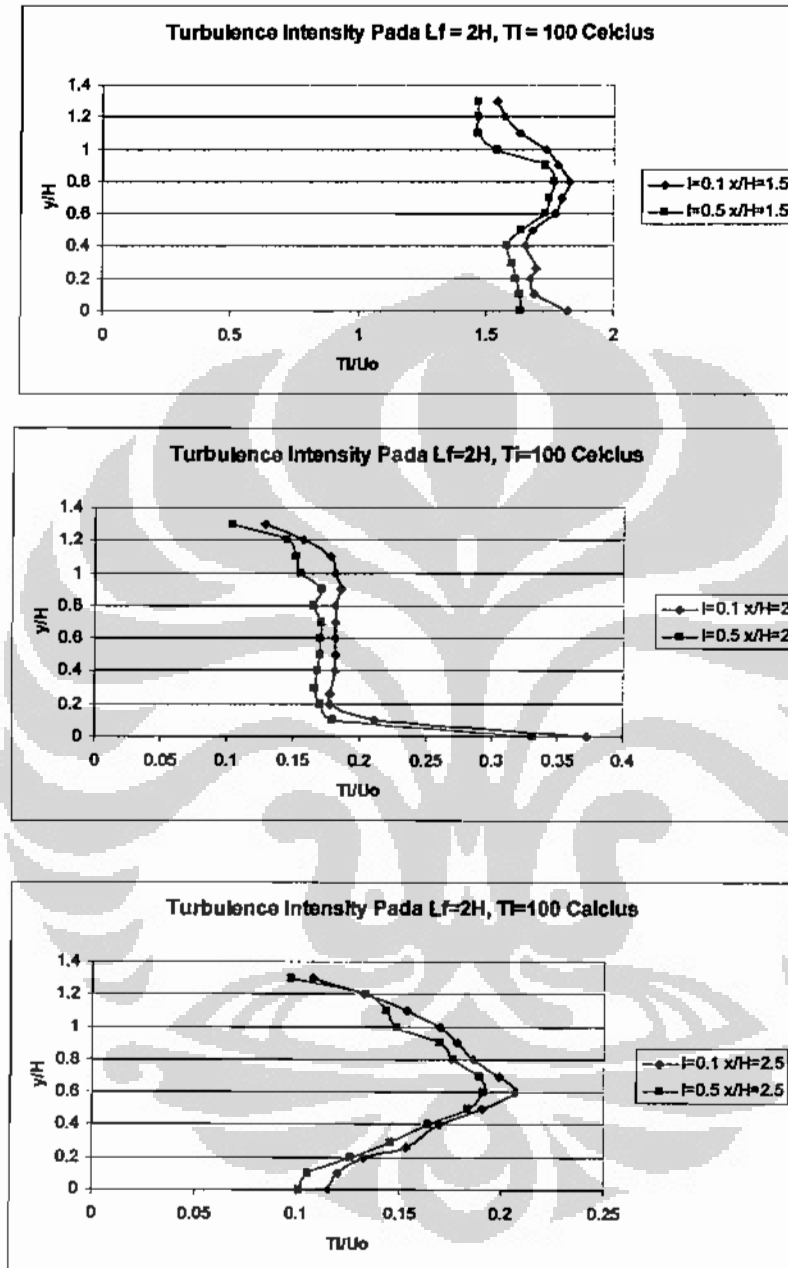


Gambar 4.26 Re 13021, 12

Pada gambar di atas diperoleh nilai medan kecepatan arah sumbu y, terlihat hampir terjadi kemiripan dengan dengan bilangan Reynolds 6250,13 pada daerah $x = 70$ mm diperoleh untuk kecepatan medan aliran bernilai negatif hal ini menjadikan aliran resirkulasi di bagian belakang kontur tangga ikut terbelah menjadi beberapa bagian.

4.4.6 Turbulensi Intensiti Pada Jarak Injeksi 2H dan 4H

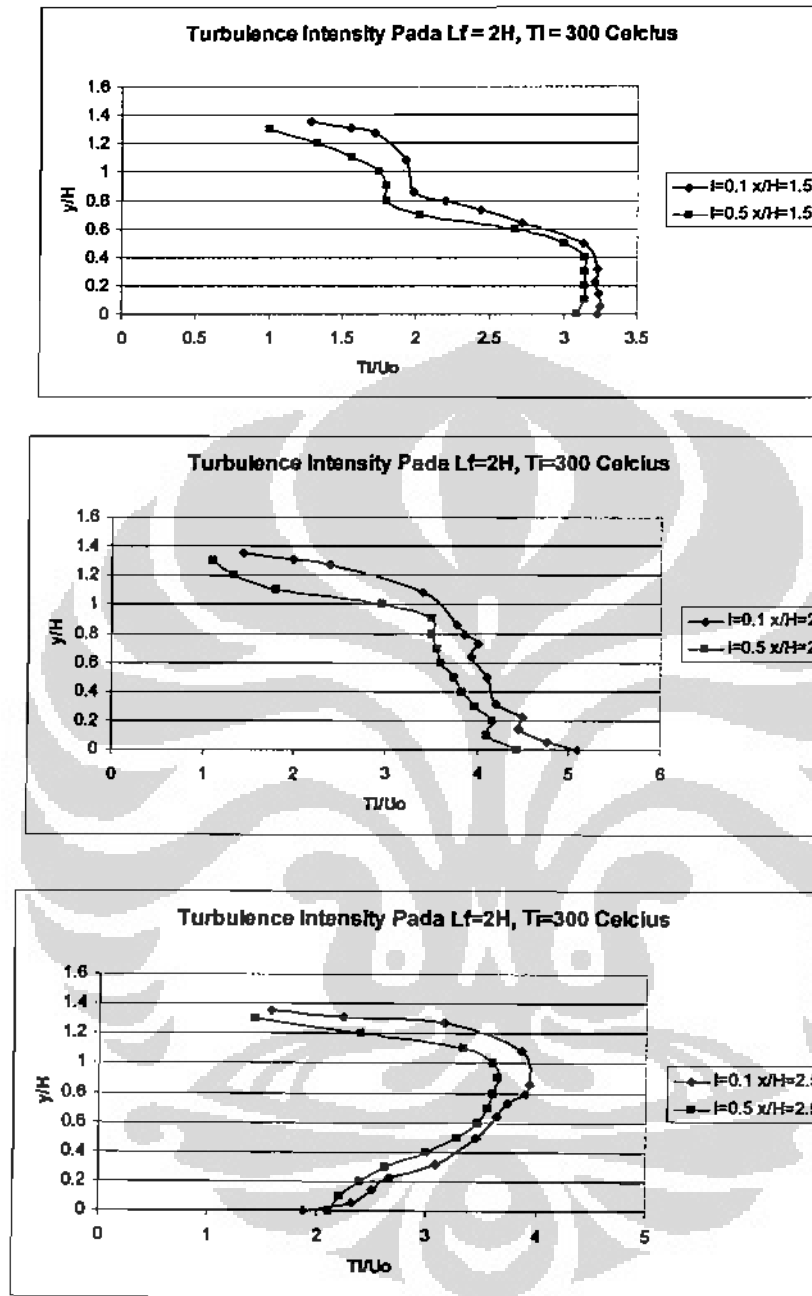
Pada gambar 4.27 di bawah ini menjelaskan nilai turbulensi intensiti dengan rasio injeksi 0.1 dan 0.5 temperatur udara panas 100°C.



Gambar 4.27 Re 6250, 13

Dari gambar di atas menampilkan nilai turbulensi intensiti berubah karena dipengaruhi oleh kecepatan injeksi aliran fluida, semakin tinggi rasio injeksi maka nilai turbulensi intensiti menjadi berkurang.

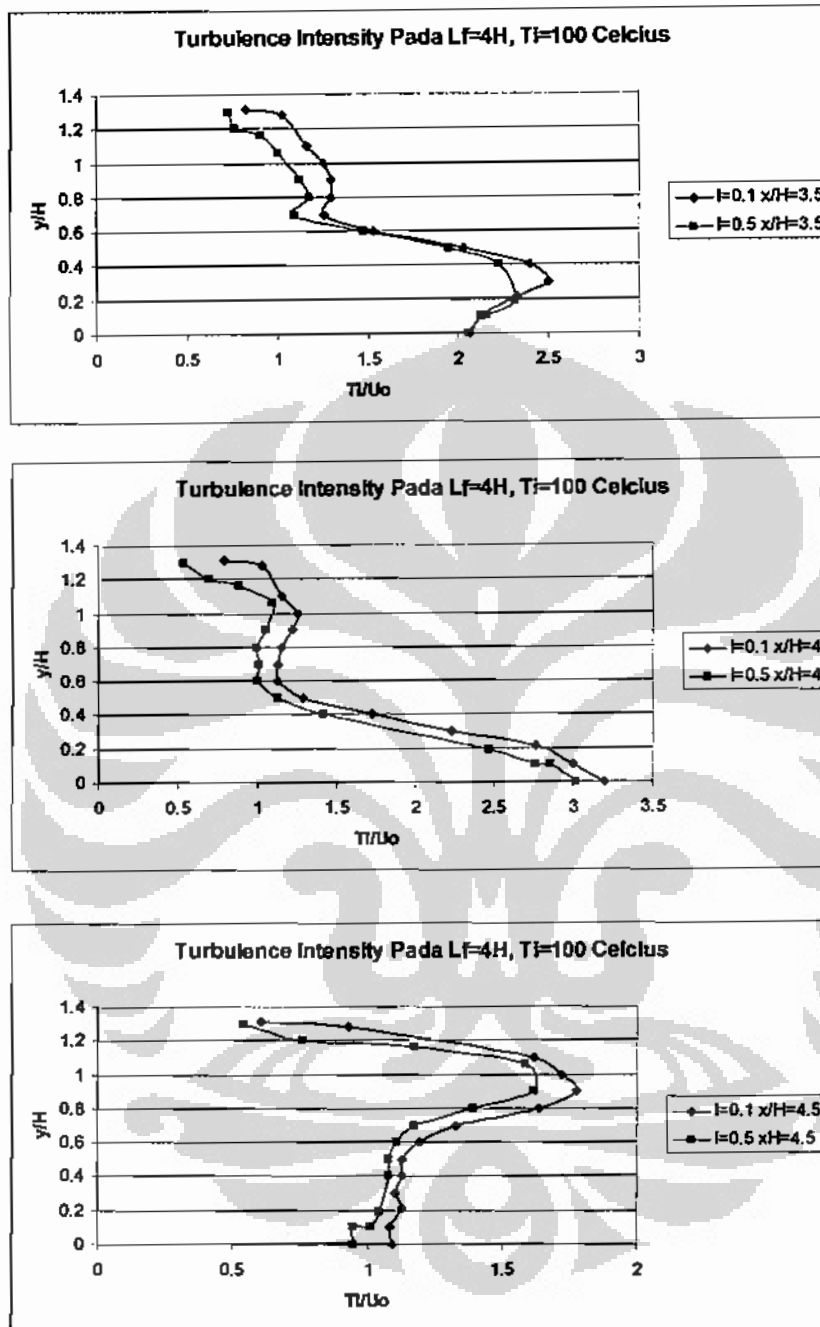
Selanjutnya pada gambar 4.28 menampilkan nilai turbulensi intensiti untuk rasio injeksi 0.1 dan 0.5 dengan temperatur injeksi panas 300°C.



Gambar 4.28 Re 9375,20

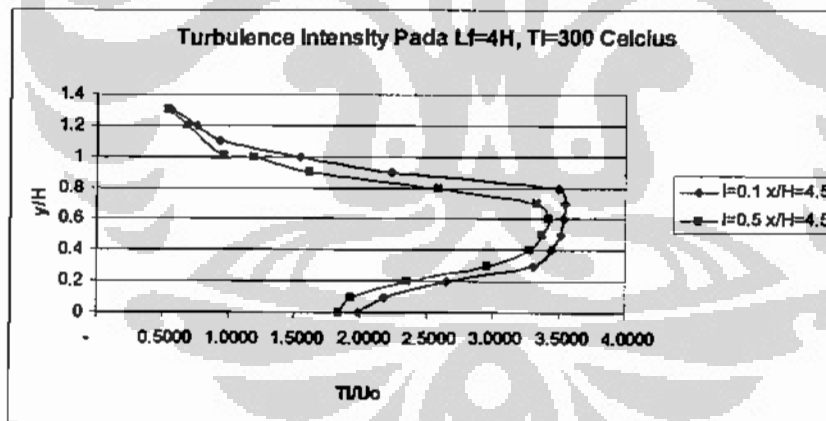
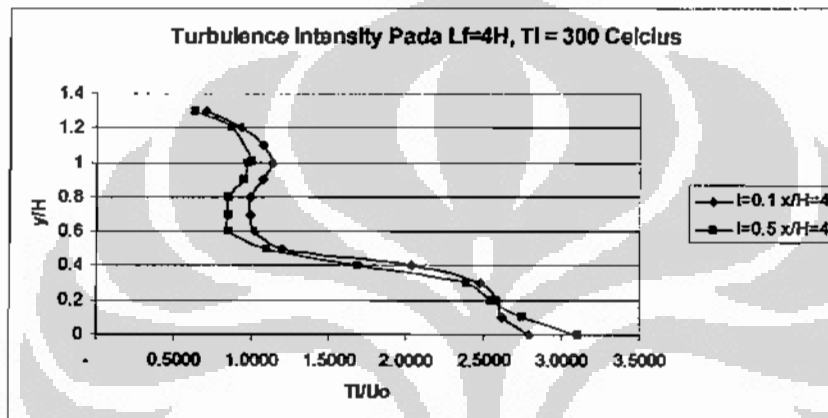
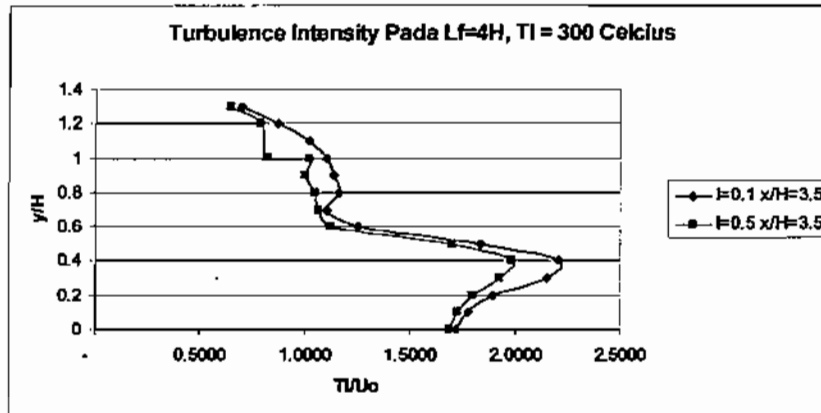
Pada gambar di atas di peroleh nilai turbulensi intensiti menjadi berkurang dengan semakin meningkatnya rasio injeksi aliran yang diberikan.

Kemudian pada gambar 4.29 menampilkan nilai turbulensi intensiti untuk rasio injeksi 0.1 dan 0.5 dengan temperatur injeksi panas 100°C.



Gambar 4.29 Re 6250, 13

Pada gambar diatas nilai turbulensi intensiti menjadi semakin berkurang dengan naiknya rasio spesifik momentum injeksi hal ini hampir serupa dengan nilai turbulensi intensiti pada bilangan Reynolds 9375, 20.

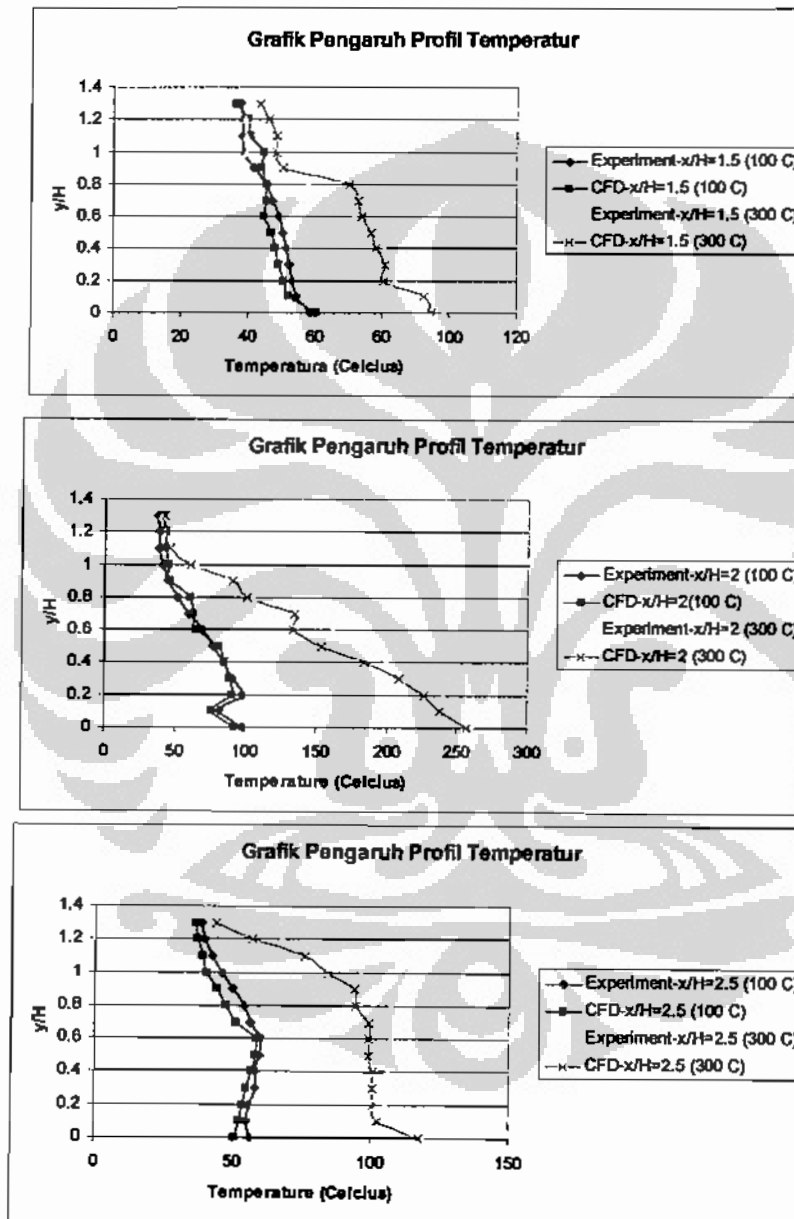


Gambar 4.30 Re 13021, 12

Pada gambar diatas nampak bahwa nilai turbulensi intensiti berkurang seiring dengan naiknya rasio injeksi yang diberikan, hal ini dipengaruhi oleh kecepatan injeksi yang diberikan menyebabkan saluran utama menjadi berkurang.

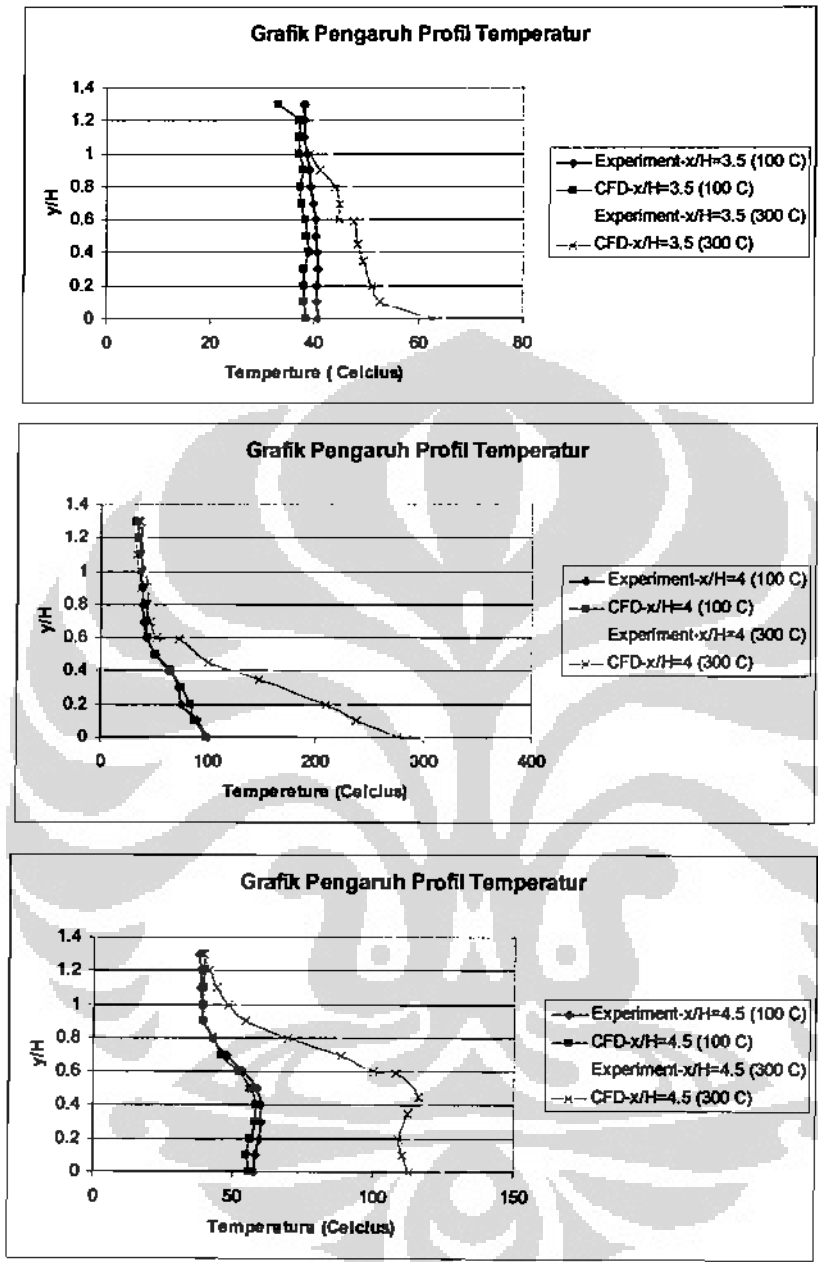
4.4.7 Perbandingan Hasil Eksperimen dan CFD Untuk Nilai Temperatur Yang Terukur Di Sekitar Daerah Injeksi.

Distribusi temperatur yang terjadi di kanal saluran penghasil aliran resirkulasi di pengaruhi oleh letak jarak injeksi yang menyebabkan terjadinya proses pencampuran udara lingkungan (*ambient*) dengan injeksi udara panas. Pada jarak injeksi 2H proses pencampuran udara terjadi lebih merata.



Gambar 4.31 Grafik nilai Temperatur $L_f = 2H$, $I = 0.1$

Pada gambar 4.31 di atas menjelaskan distribusi temperatur arah sumbu y dengan rasio injeksi 0.1 jarak injeksi dari step $2H = 40$ mm.

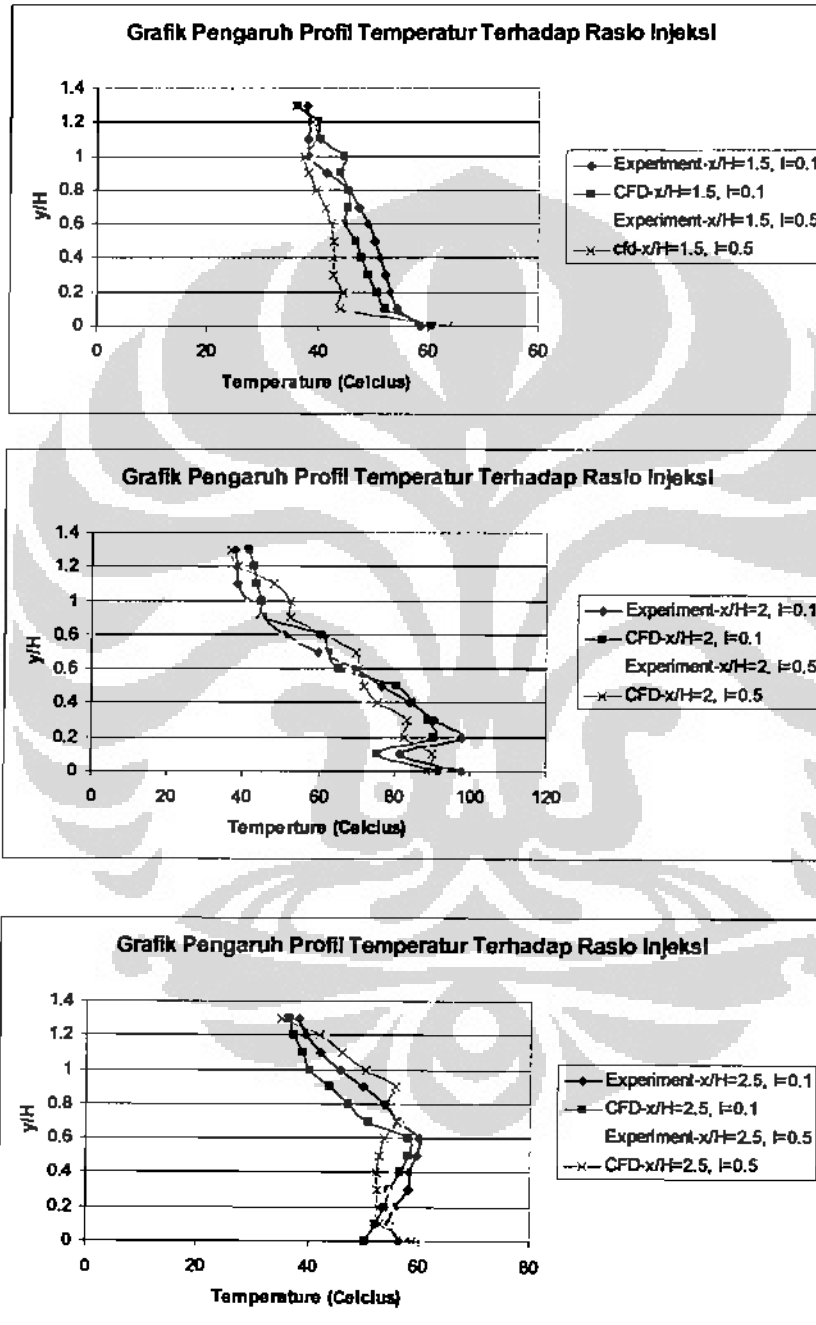


Gambar 4.32 Grafik nilai Temperatur $L_f = 4H, I = 0.1$

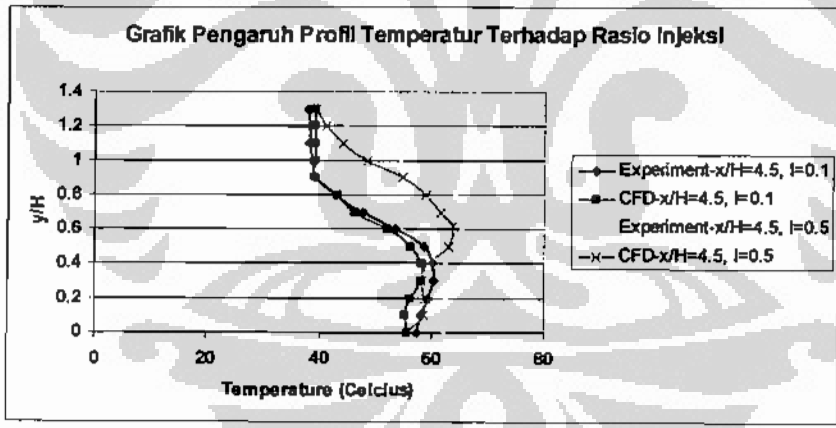
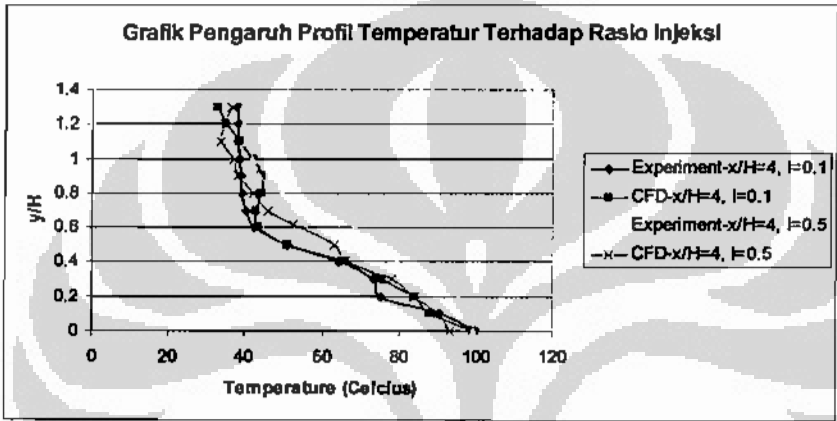
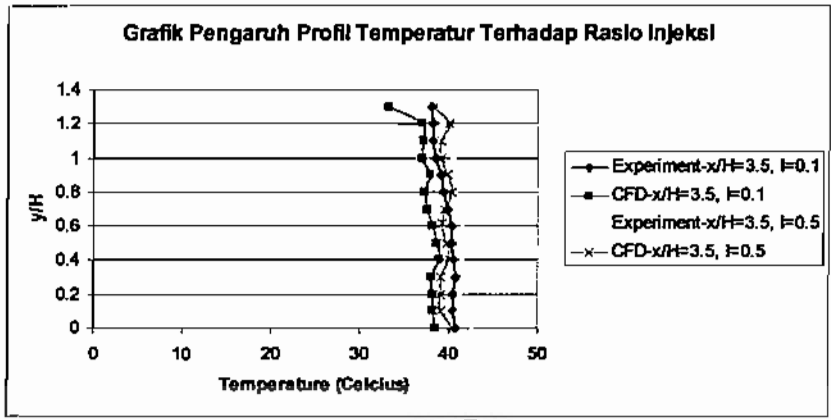
Pada gambar 4.32 di atas menjelaskan distribusi temperatur arah sumbu y dengan rasio injeksi 0.1 jarak injeksi dari step $4H = 80$ mm.

4.4.8 Pengaruh Profil Temperatur Terhadap Rasio Injeksi

Proses pencampuran nilai temperatur antara saluran utama dan injeksi amat dipengaruhi oleh rasio spesifik momentum injeksi yang diberikan, dengan kenaikan rasio injeksi maka aliran yang terjadi semakin mencampur dengan baik antara saluran utama (*free stream*) dengan udara panas yang di injeksikan.



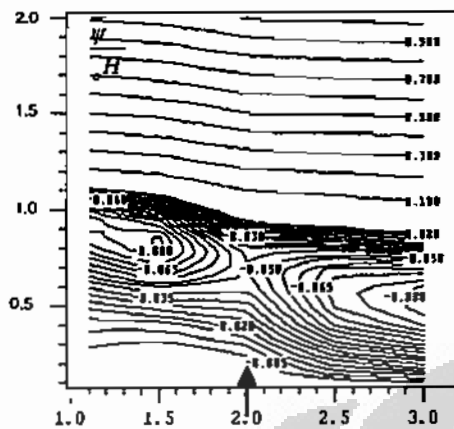
Gambar 4.33 Grafik nilai Temperatur $L_f = 2H$, $T_i = 100$ Celcius



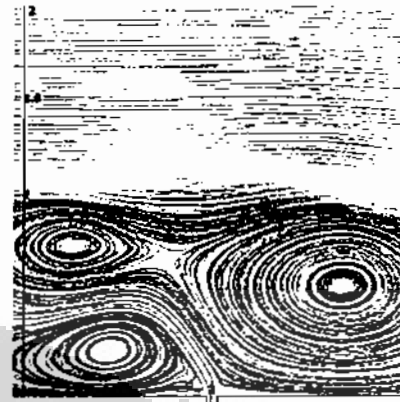
Gambar 4.34 Grafik nilai Temperatur $L_f = 4H, T_i = 100$ Celcius

Pada jarak Injeksi $4H = 80$ mm proses pencampuran yang terjadi kurang baik hal ini disebabkan oleh letak injeksi di luar daerah resirkulasi yang terbentuk di belakang tangga (*step*).

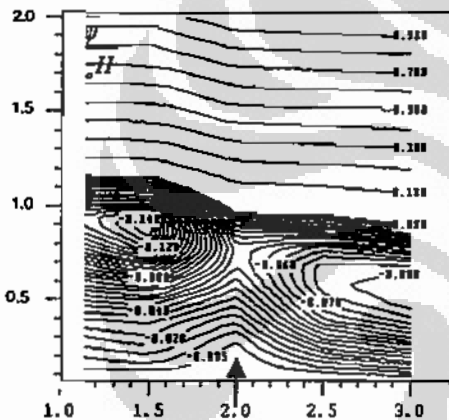
4.4.9 Perbandingan Injeksi Jet Tanpa Pemanas Hasil Eksperimen Terdahulu dengan Kajian Komputasi



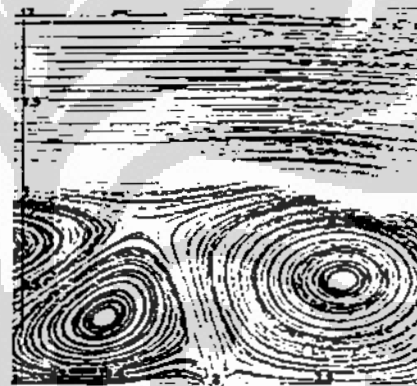
Gambar 4.35 Eksperimen $I = 0.1, L_f = 2H$



Gambar 4.36 Komputasi $I = 0.1, L_f = 2H$



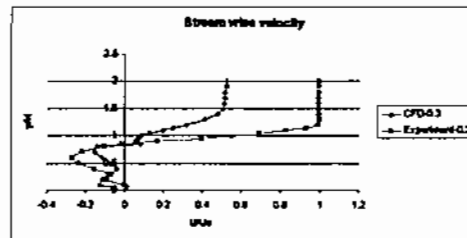
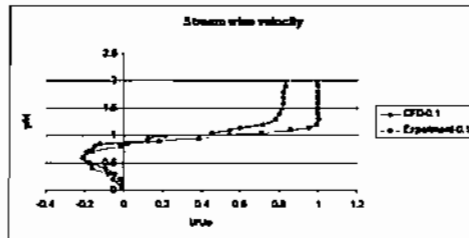
Gambar 4.37 Eksperimen $I = 0.3, L_f = 2H$



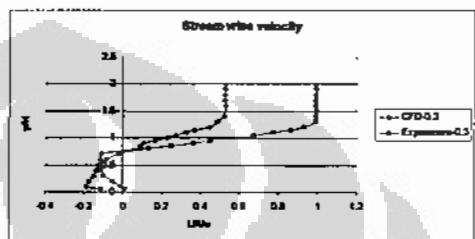
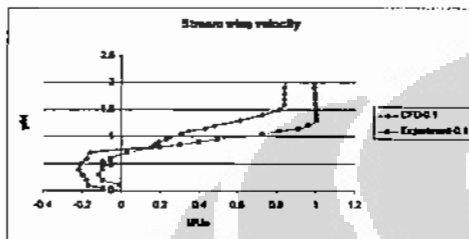
Gambar 4.38 Komputasi $I = 0.3, L_f = 2H$

Pada gambar diatas menjelaskan hasil eksperimen tanpa menggunakan injeksi jet pemanas dengan kajian komputasi menggunakan software CFD, dari hasil tersebut dapat di peroleh aliran resirkulasi terbelah menjadi beberapa bagian yang disebabkan oleh injeksi aliran yang diberikan hal ini cukup sejalan dengan hasil berbagai penelitian terdahulu mengenai karakteristik aliran di belakang kontur tangga akibat pengaruh injeksi aliran yang diberikan ^[1]. Dimana jarak Injeksi dari step bernilai $2H = 40$ mm dengan rasio spesifik momentum injeksi 0.1 dan 0.3

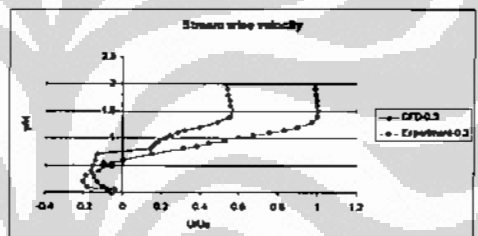
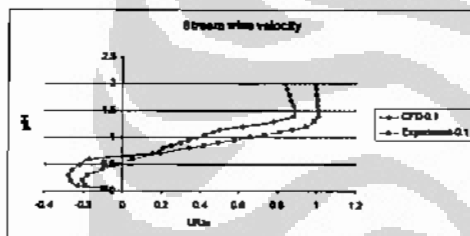
4.4.10 Perbandingan Hasil Eksperimental VS CFD Tanpa Pemanas Injeksi Arah Medan Aliran Horizontal (Sumbu X)



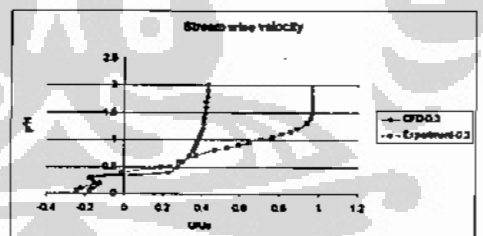
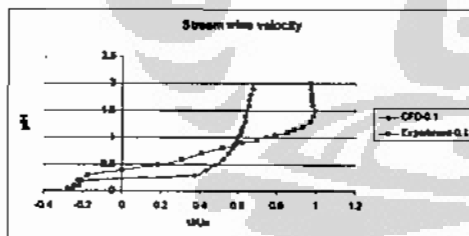
$L_f = 40 \text{ mm}, x = 30 \text{ mm}$



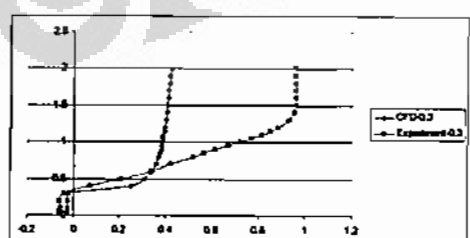
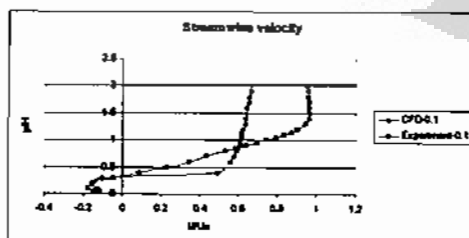
$L_f = 40 \text{ mm}, x = 40 \text{ mm}$



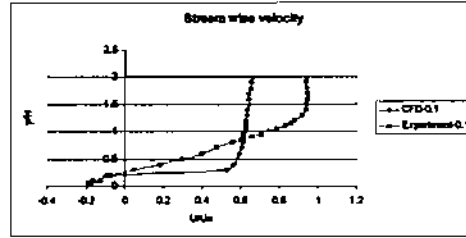
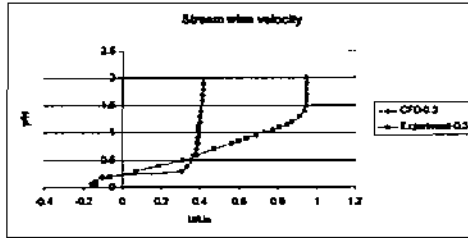
$L_f = 40 \text{ mm}, x = 50 \text{ mm}$



$L_f = 80 \text{ mm}, x = 70 \text{ mm}$



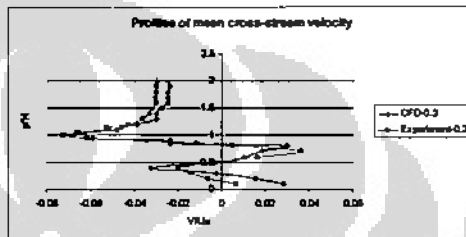
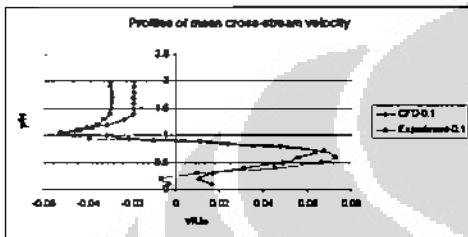
$L_f = 80 \text{ mm}, x = 80 \text{ mm}$



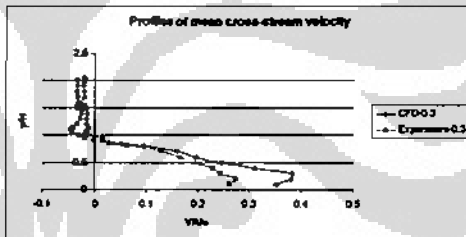
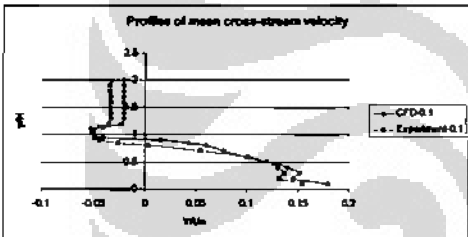
Lf = 80 mm , x = 90 mm

Gambar 4.39 Medan Kecepatan Arah Sumbu X

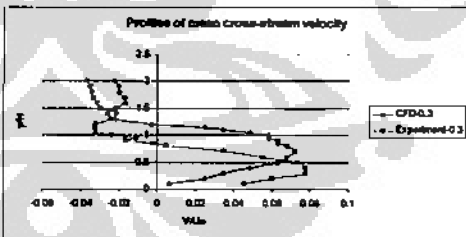
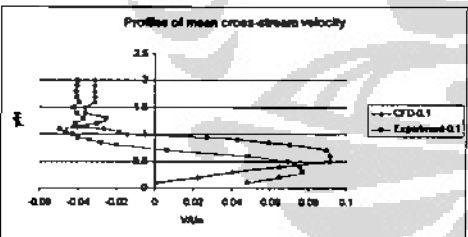
4.4.11 Perbandingan Hasil Eksperimental VS CFD Tanpa Pemanas Injeksi Arah Medan Aliran Horizontal (Sumbu Y)



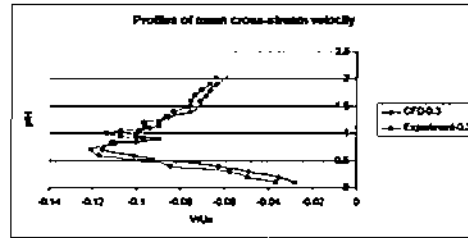
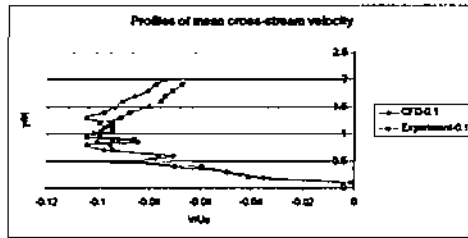
Lf = 40 mm , x = 30 mm



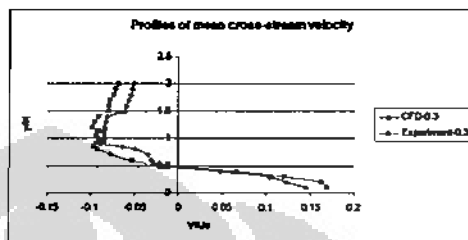
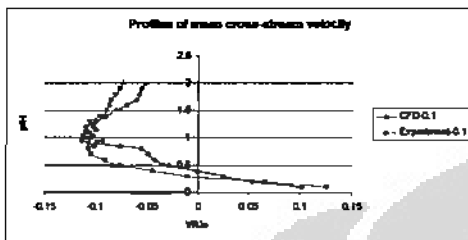
Lf = 40 mm , x = 40 mm



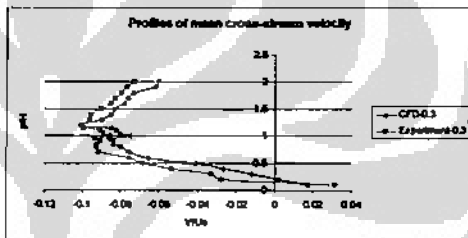
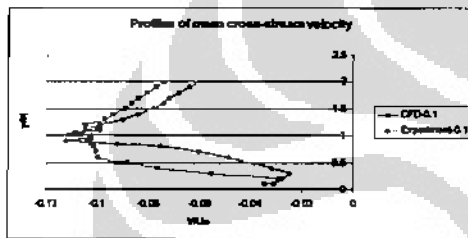
Lf = 40 mm , x = 50 mm



$L_f = 80 \text{ mm}, x = 70 \text{ mm}$



$L_f = 80 \text{ mm}, x = 80 \text{ mm}$

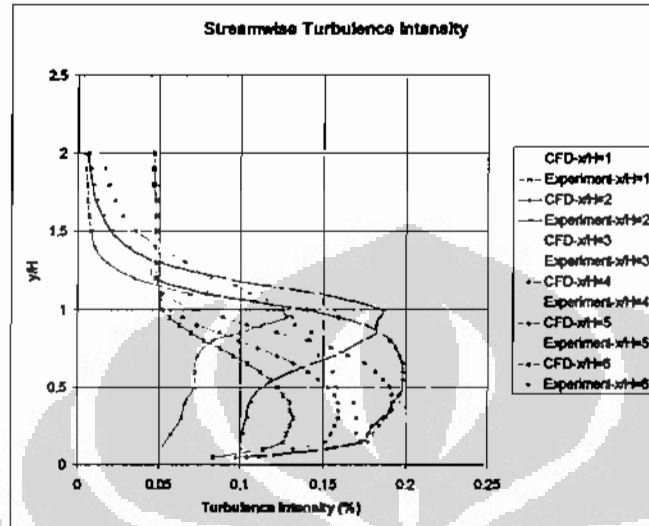


$L_f = 80 \text{ mm}, x = 90 \text{ mm}$

Gambar 4.40 Medan Kecepatan Arah Sumbu Y

4.4.12 Tingkat Turbulensi Tanpa Injeksi Udara Panas

Pada gambar di bawah ini menampilkan nilai turbulensi intensiti dari hasil eksperimental tanpa menggunakan udara panas dan kajian menggunakan software CFD (*Computational Fluid Dynamics*).



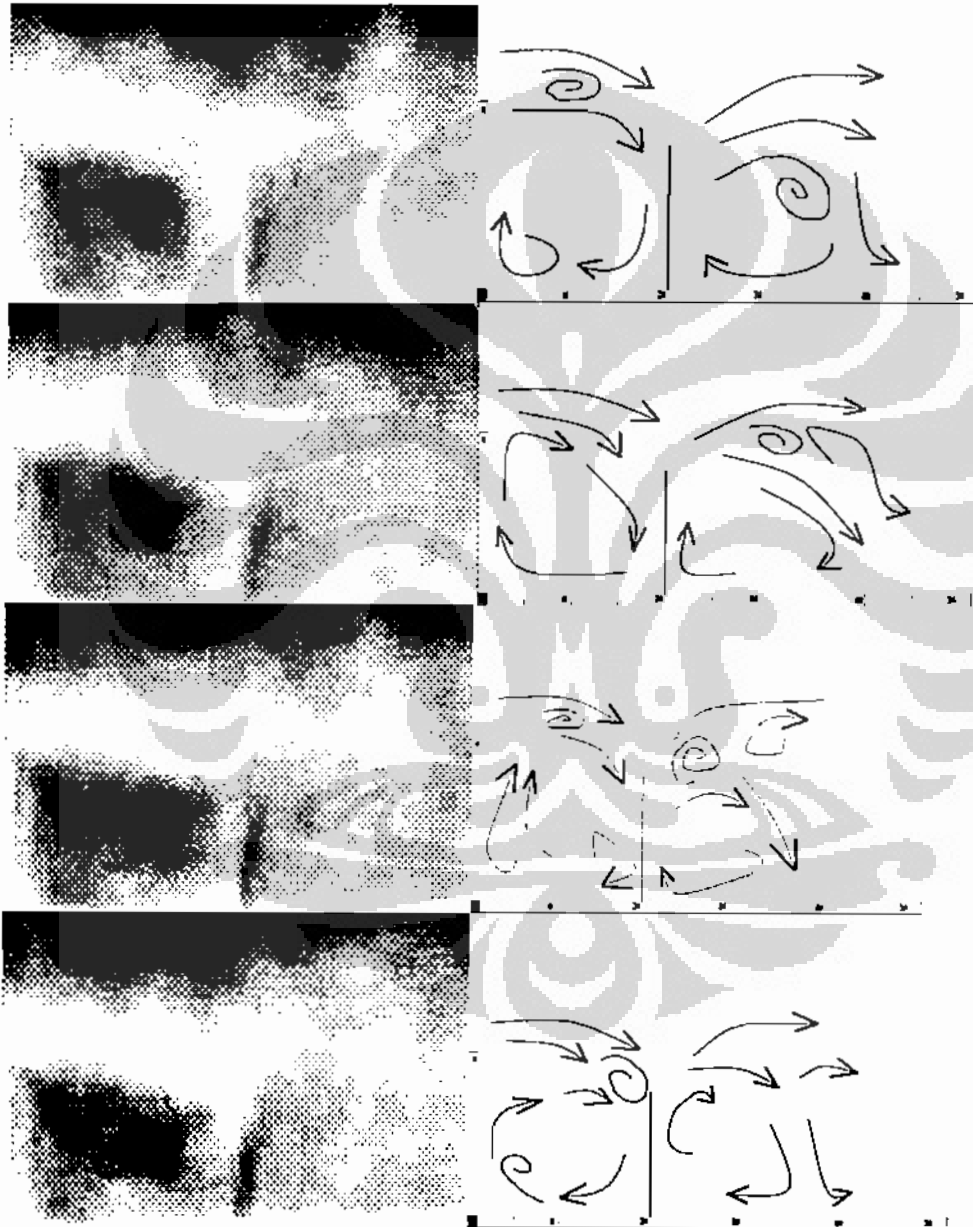
Gambar 4.41 Turbulence Intensity Tanpa Injeksi Udara Panas

Dari gambar diatas diperoleh nilai intensity turbulence maksimal dari hasil perbandingan kajian CFD dengan kegiatan eksperimental di peroleh pada jarak 60 mm dari tangga (*step*) hal ini disebabkan oleh perbedaan tekanan (*adverse pressure gradiend*) yang terjadi di antara saluran utama (*free stream*) dengan tekanan di daerah bagian belakang tangga (*step*), yang menyebabkan terjadinya aliran resirkulasi yang arah gerakannya menuju ke arah hulu dimana kecepatan aliran resirkulasi yang terjadi lebih rendah dibandingkan dengan kecepatan aliran utama hal inilah yang disebut dengan separasi aliran atau aliran yang berpisah dari aliran utama.

4.5 Hasil Visualisasi Aliran Resirkulasi Dengan Menggunakan Metode Light Sheet

4.5.1 Ketinggian Step 1H Jarak Injeksi 2H

Metode yang dilakukan dalam kegiatan eksperimen ini menggunakan lembar cahaya (*light sheet*) untuk melihat visualisasi aliran yang terjadi akibat dari pengaruh injeksi udara panas yang diberikan. Dari gambar tersebut di dapat aliran resirkulasi terbelah menjadi beberapa bagian yang disebabkan oleh injeksi aliran.



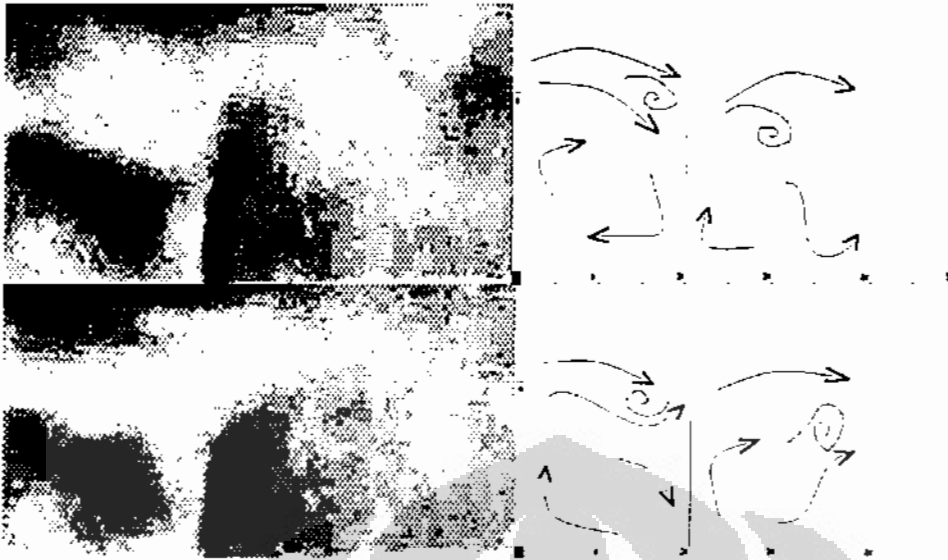
Gambar 4.42 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.1 dan temperatur 100 °C

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 4.42 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.

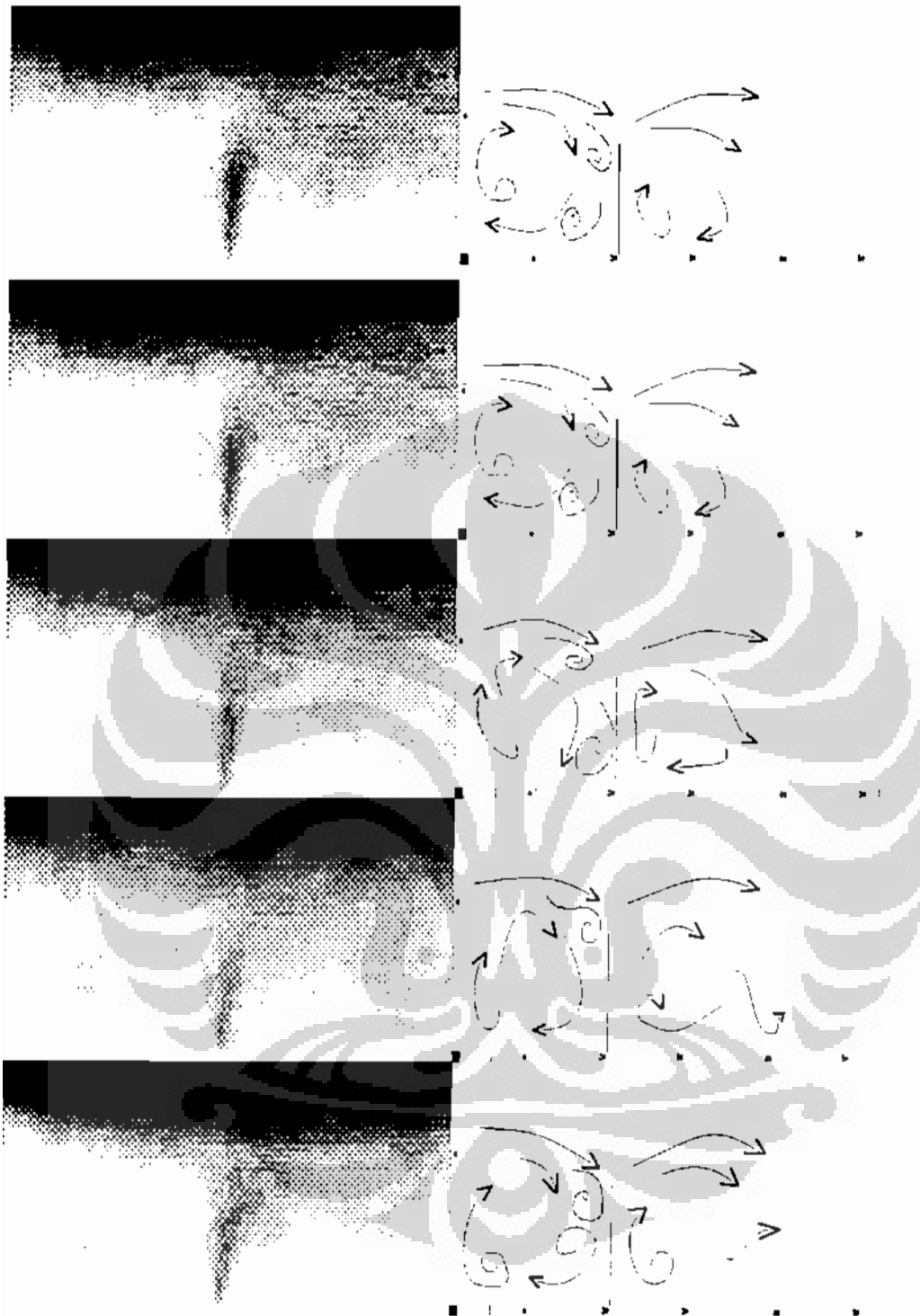




Gambar 4.43 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.1 dan temperatur 300 °C

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 4.43.

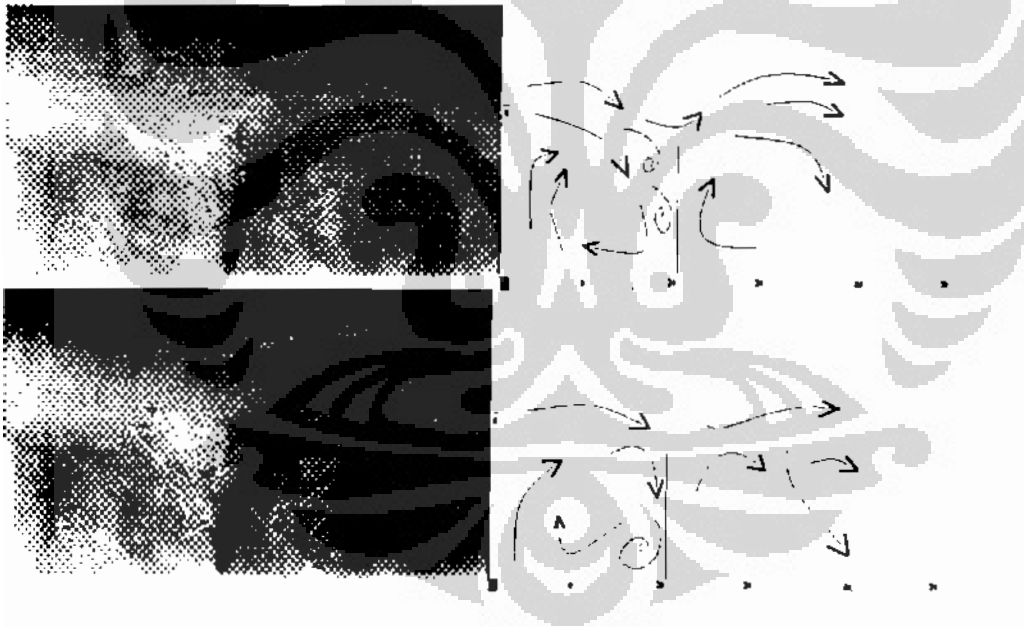
Hal yang membedakan antara kondisi 100 °C dan 300 °C adalah besar ruang kosong yang ditimbulkan setelah daerah injeksi. Fenomena ruang kosong ini dinamakan "*barrel effect*" dimana efek ini akan membesar pada saat temperatur injeksi ditingkatkan. Selain itu, injeksi yang dihasilkan pada mempunyai ketinggian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

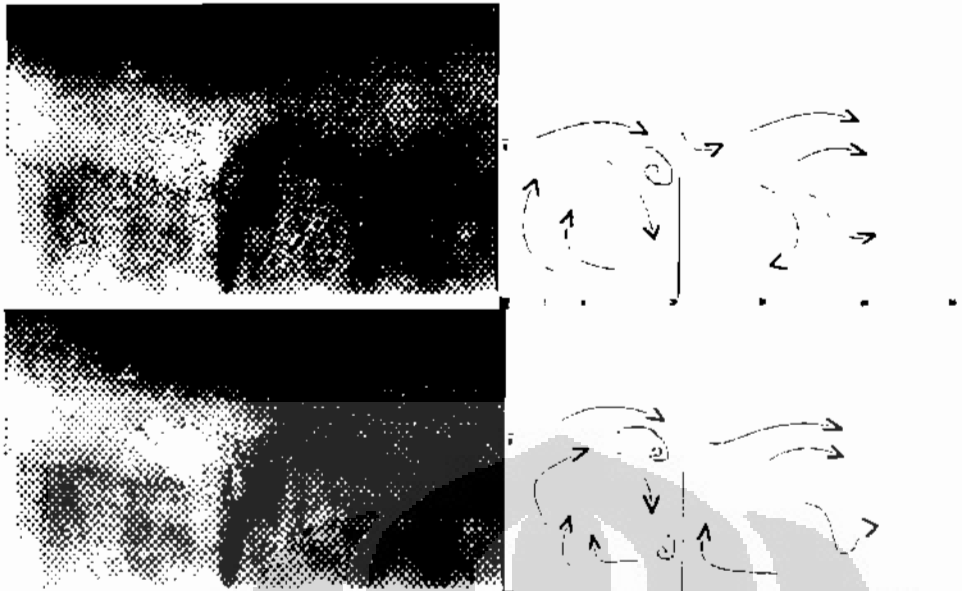


Gambar 4.44 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.5 dan temperatur 100 °C

Variasi untuk analisa Gambar 4.44 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.





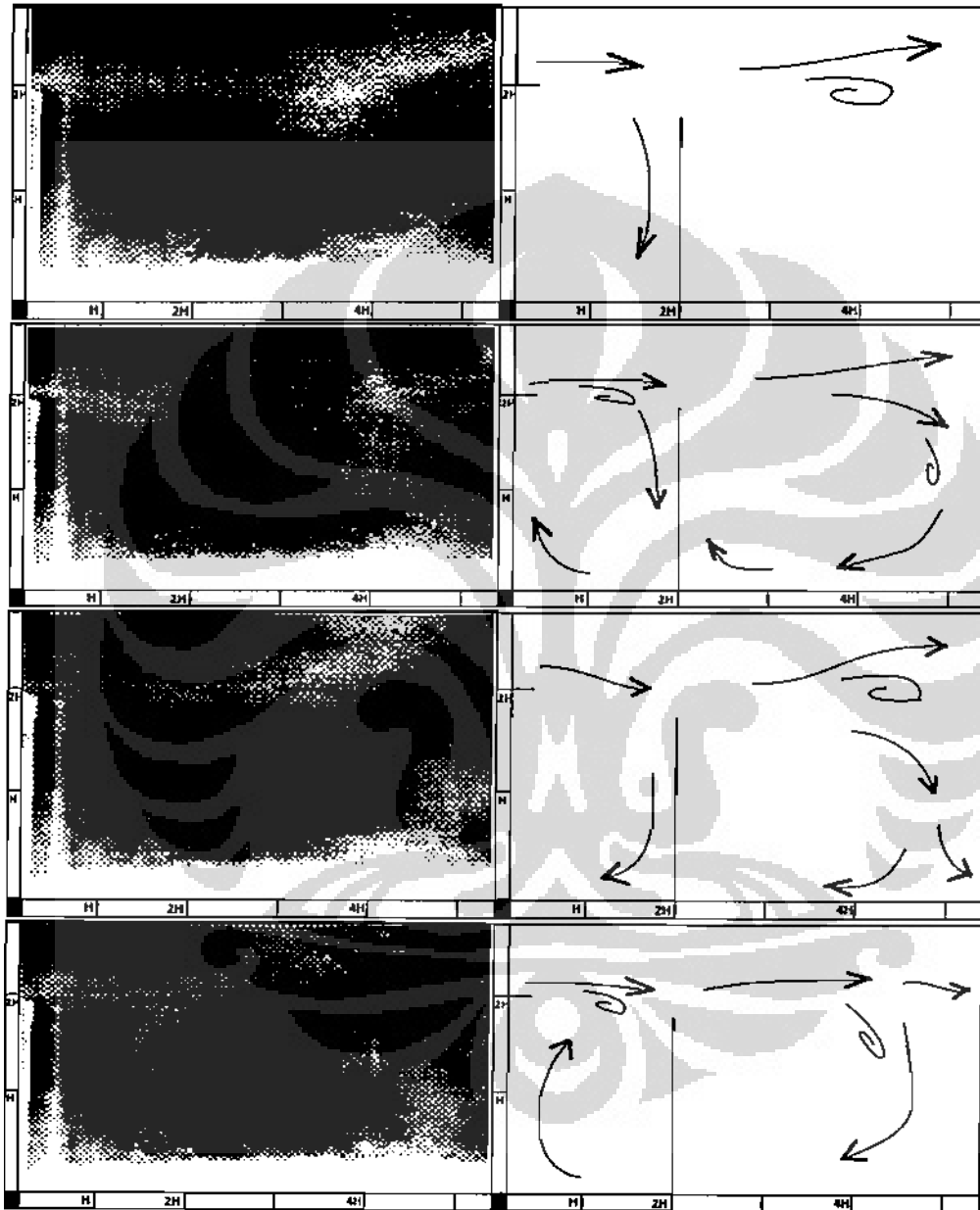
Gambar 4.45 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.5 dan temperatur 300 °C

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 4.45 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 sangat mungkin 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.

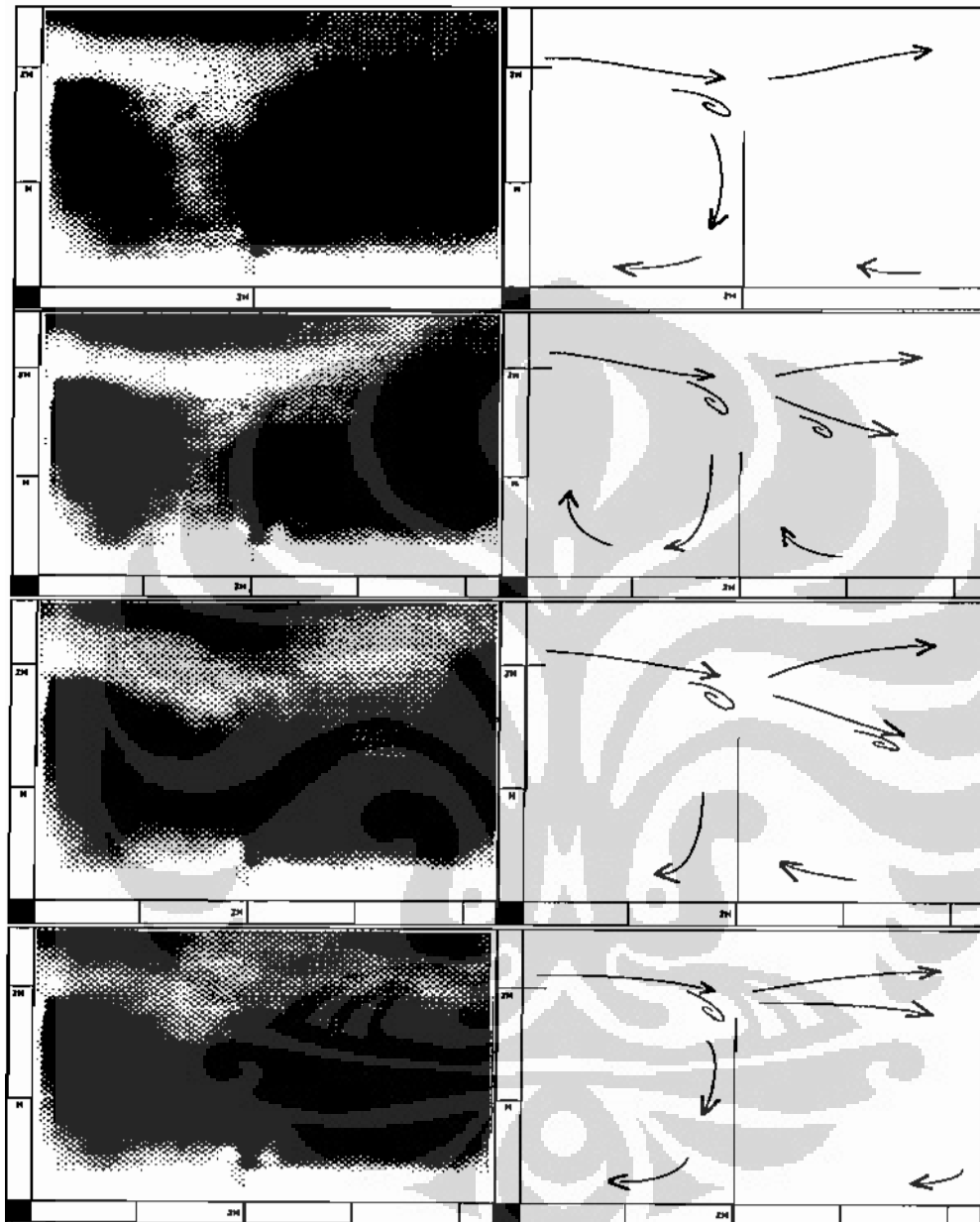
4.5.2 Ketinggian Step 2H Jarak Injeksi 2H

Kondisi aliran yang terjadi pada ketinggian step $2H = 40\text{mm}$ berbeda dengan kondisi aliran $1H$, hal ini menyebabkan perbedaan tekanan yang cukup besar antara saluran utama dan injeksi yang di berikan sehingga menyebabkan aliran resirkulasi terbagi menjadi lebih besar.



Gambar 4.46 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.1 dan temperatur $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ untuk tinggi *step* $2H$

Pada ketinggian step 2H Bentuk injeksi yang dihasilkan cukup tegak dan hal ini berbeda dengan kondisi pada saat ketinggian *step* sebesar H. Hal ini terlihat bahwa *block effect* terdapat pada injeksi gas panas yang ada.

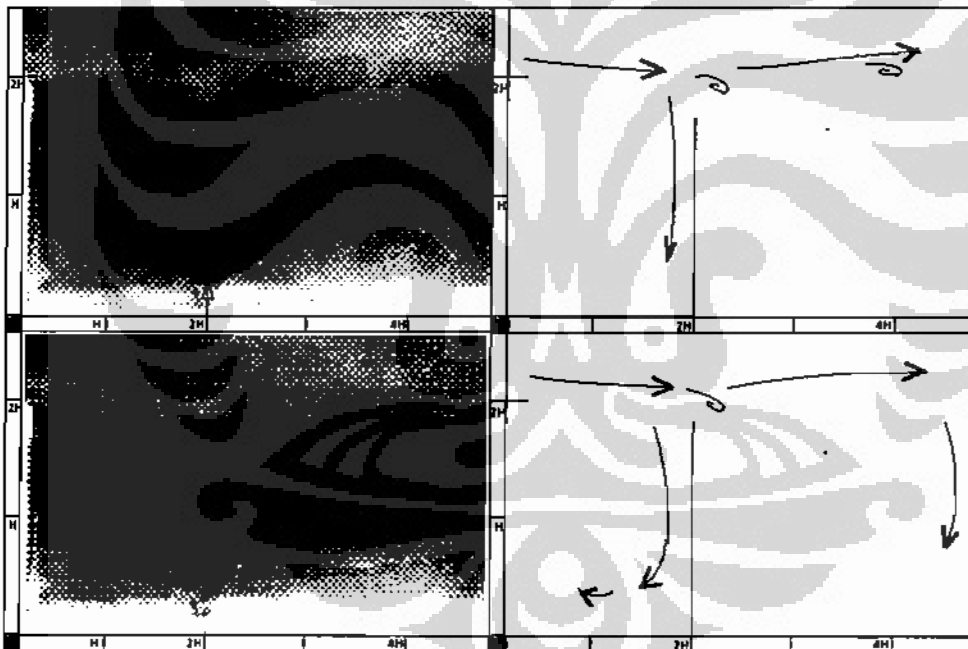


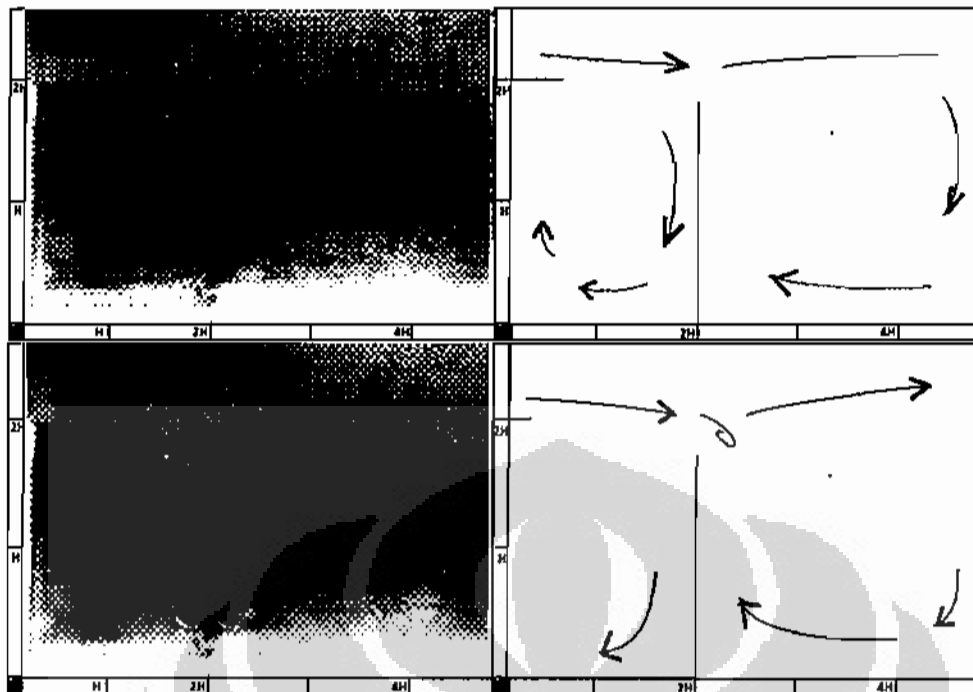
Gambar 4.47 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.1 dan temperatur 300 °C untuk tinggi *step* 2H

Peningkatan temperatur pada ketinggian *step* 2H menunjukkan hasil yang sama seperti ketinggian *step* H 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 4.47 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.



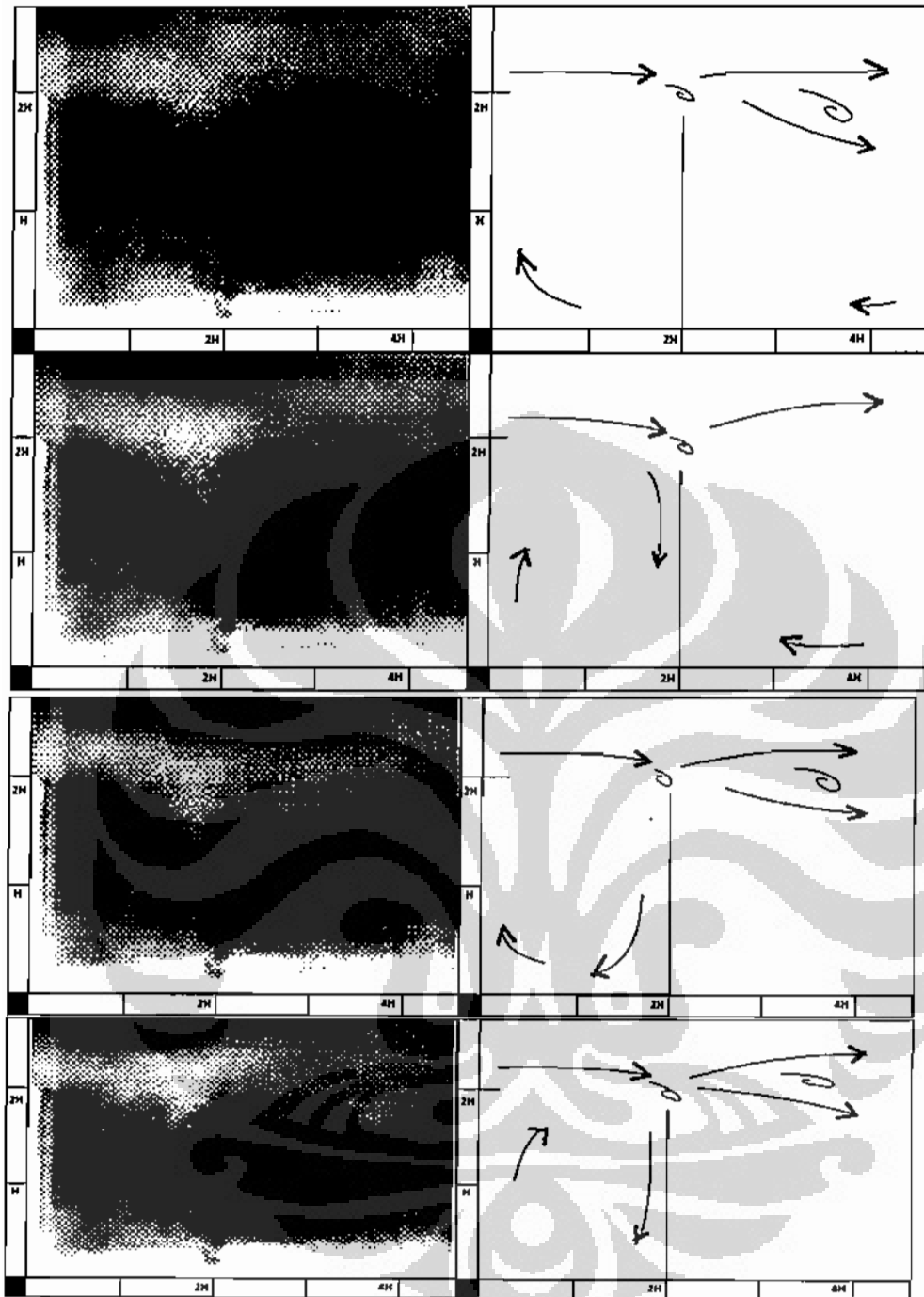


Gambar 4.48 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.5 dan temperatur 100 °C untuk tinggi *step* 2H

Analisa kondisi ketiga untuk ketinggian *step* 2H 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 dikarenakan 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 4.49 Rangkaian gambar pola aliran kondisi rasio injeksi 0.5 dan temperatur 300 °C untuk tinggi *step* 2H

Bagian analisa kuantitatif terakhir adalah kondisi rasio injeksi 0.5 dan temperatur 300 °C. Pada Gambar 4.49 ditunjukkan bahwa tingkat turbulensi yang ada lebih besar dibandingkan kondisi lain untuk ketinggian *step* 2H. 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* H, dimana resirkulasi pada bagian *downstream* akan mengecil dan pada bagian *upstream* akan membesar.

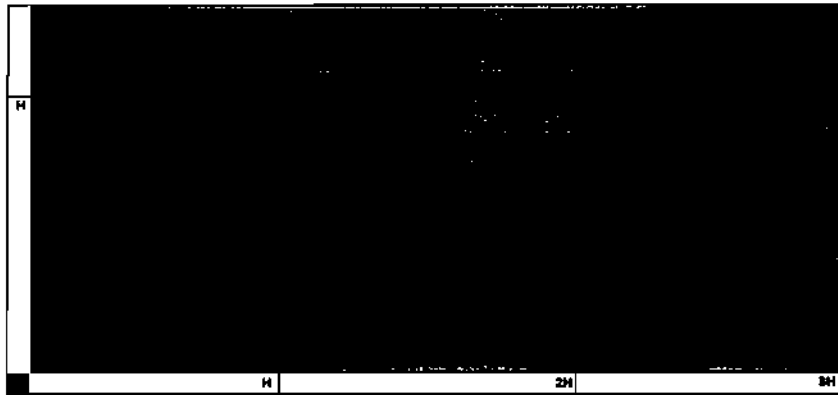
4.5.3 Analisa Kualitatif

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 kualitatif 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 kualitatif 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 kualitatif.

Berikut adalah ilustrasi dari 2 tipe penyekalaan atau *scaling* yang digunakan untuk analisa kualitatif yaitu kondisi ketinggian H (2 cm) dan 2H (4cm) :



Gambar 4.50 *Scaling* citra kondisi ketinggian *step* H

Penyekalaan pada Gambar 4.50 adalah untuk kondisi dengan ketinggian *step* sebesar H. 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 2 dan seterusnya hingga baris ke-5 pada bagian terdekat dengan dasar plat *test section*.



Gambar 4.51 *Scaling* citra kondisi ketinggian *step* 2H

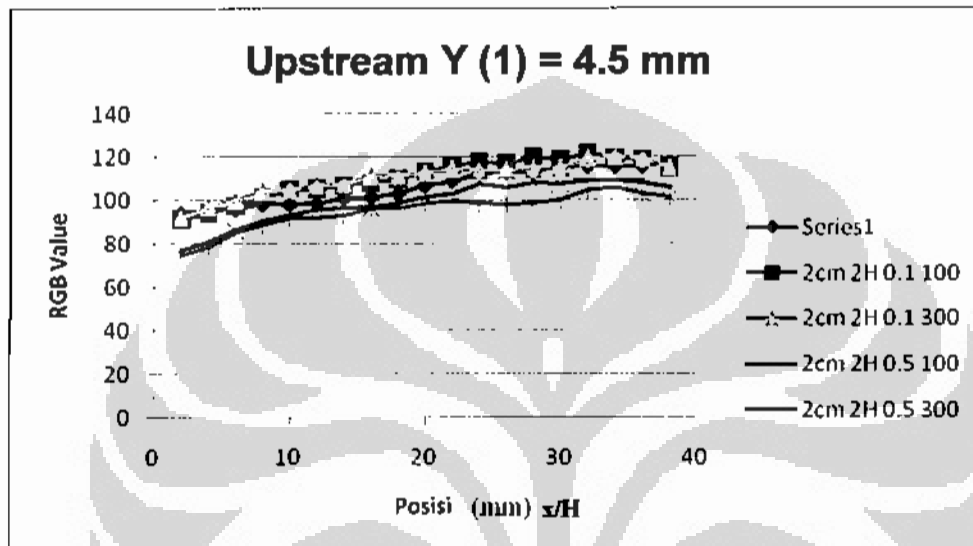
Gambar 4.51 menggambarkan penyekalaan untuk kondisi ketinggian *step* sebesar 2H. Prinsip yang digunakan untuk memberi posisi titik pengambilan data sama dengan kondisi *step* H.

Analisa kualitatif ini dilakukan pada dua bagian berbeda yaitu daerah *upstream* (daerah sebelum titik injeksi) dan daerah *downstream* (daerah setelah

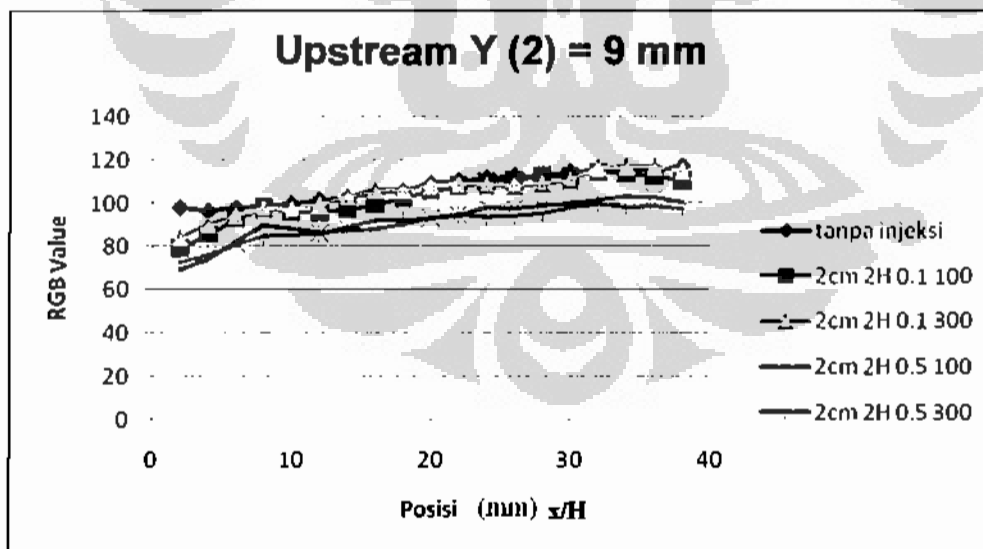
titik injeksi). Atas dasar metode ini, maka semua analisa akan berdasarkan kedua daerah ini.

4.5.4 Ketinggian *step* H Jarak Injeksi 2H

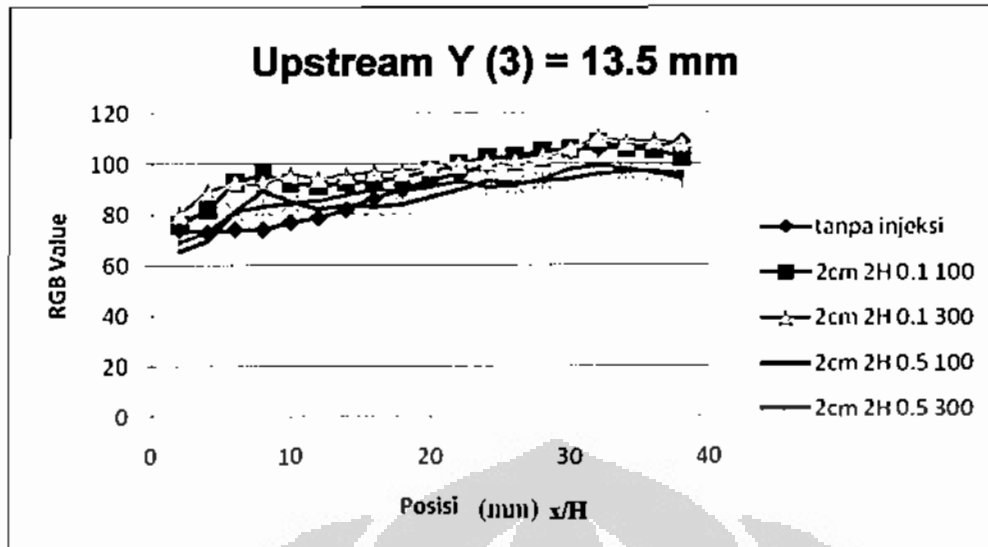
Data RGB akhir yang berupa data rata-rata dari 100 *sample* yang telah didapatkan kemudian dikelompokkan berdasarkan ketinggian dan akhirnya semua kondisi injeksi dibandingkan dengan kondisi pada saat tidak diberikan injeksi gas panas.



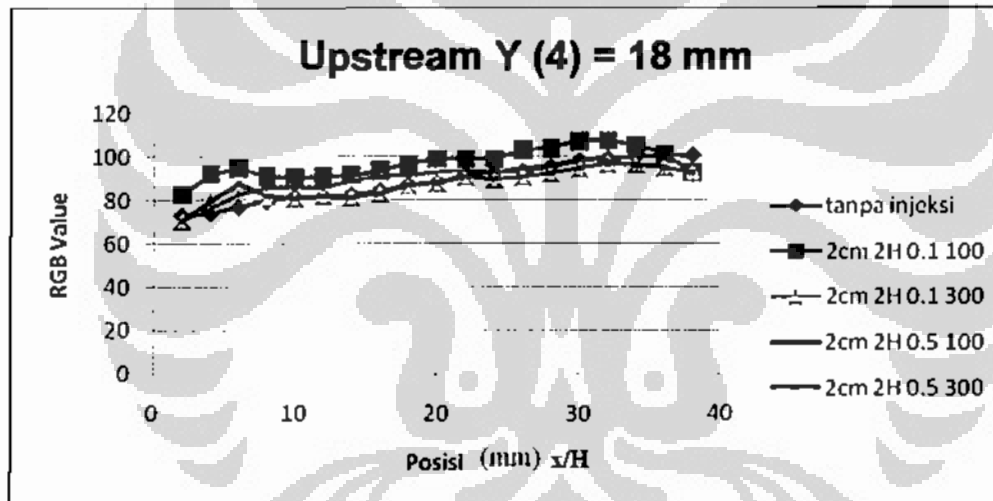
Gambar 4.52 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* baris pertama dengan tinggi *step* H



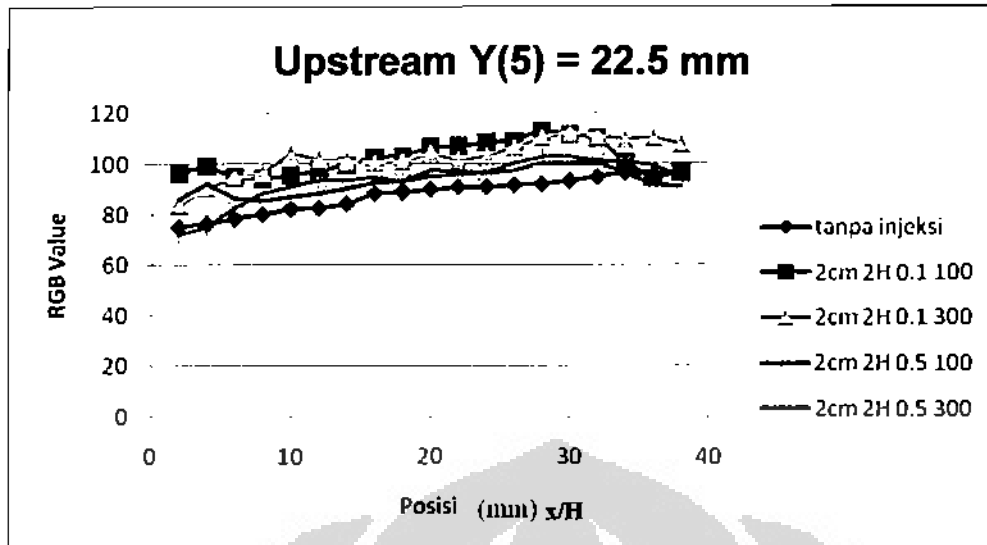
Gambar 4.53 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* baris kedua dengan tinggi *step* H



Gambar 4.54 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* baris ketiga dengan tinggi *step* H



Gambar 4.55 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* baris keempat dengan tinggi *step* H

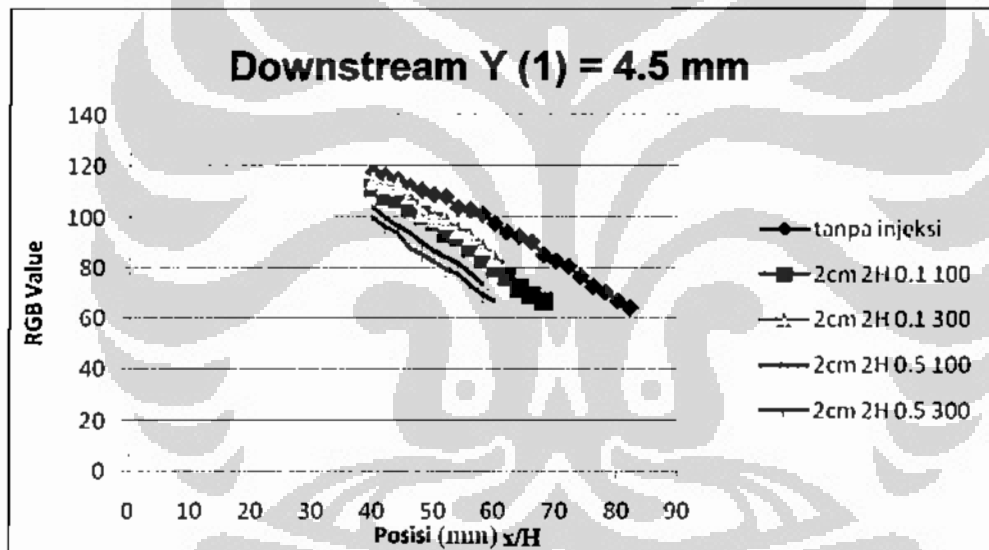


Gambar 4.56 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* baris kelima dengan tinggi *step* H

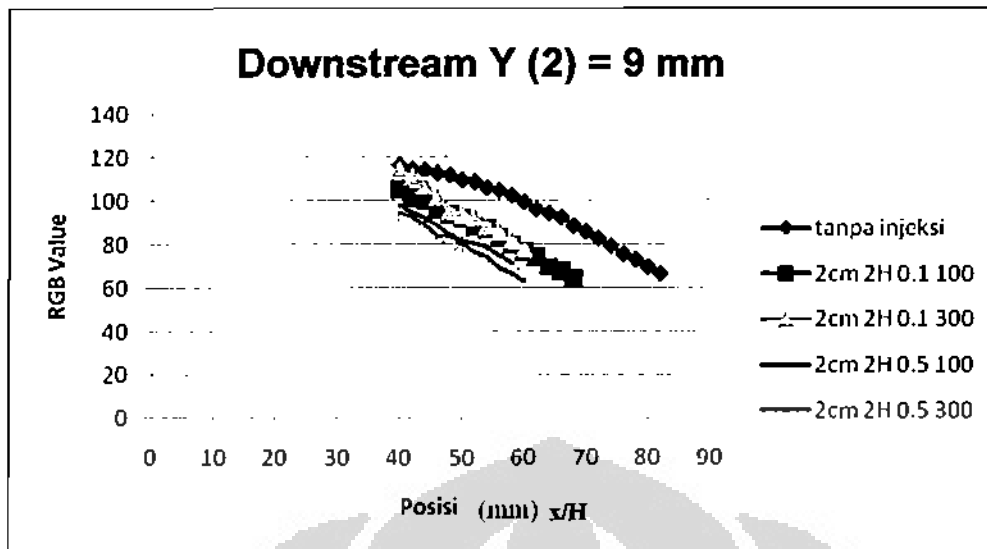
Grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 4.56 menjelaskan penjelasan yang dijelaskan pada kelima urutan gambar diatas yang menjelaskan mengenai grafik nilai RGB pada daerah *upstream*, dimulai pada baris pertama dimana dari titik 1 hingga 39 menunjukkan pola meningkat untuk semua kondisi baik dengan ataupun tanpa injeksi. Hal ini menunjukkan bahwa konsentrasi partikel seiring berjalannya sesuai arah sumbu x positif akan mengalami peningkatan. Pada baris 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 baris pertama 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 baris 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. Baris berikutnya membuat penjelasan diatas makin jelas, dimana kondisi tanpa injeksi mempunyai nilai yang cenderung stabil, sedangkan kondisi 0.1 menurun nilai konsentrasi

partikelnya setelah *shear layer* terbelah oleh injeksi. Pada baris ketiga terdapat peningkatan nilai RGB pada jarak kurang lebih 9 mm, hal ini menunjukkan adanya kepekatan partikel yang lebih tinggi kemudian menurun kembali yang kemungkinan menunjukkan adanya resirkulasi pada daerah tersebut. Pada grafik ketiga pada Gambar 4.47 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.

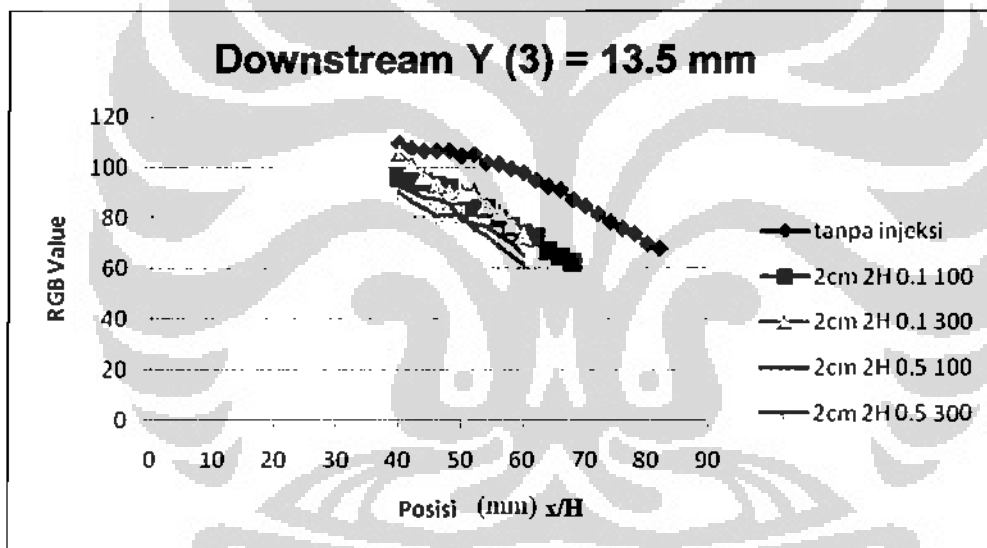
Baris 4 lebih menunjukkan bahwa sebaran pada daerah *upstream* lebih rata dimana 2 kondisi dengan rasio 0.5 mempunyai nilai umum RGB yang lebih tinggi dibanding salah satu kondisi rasio injeksi 0.1. Baris berikutnya menunjukkan sebaran yang lebih fluktuatif, namun kondisi rasio 0.1 mempunyai nilai tertinggi dikarenakan sebaran yang terjadi akibat pemisahan *shear layer* lebih merata menuju *upstream* dan *downstream*.



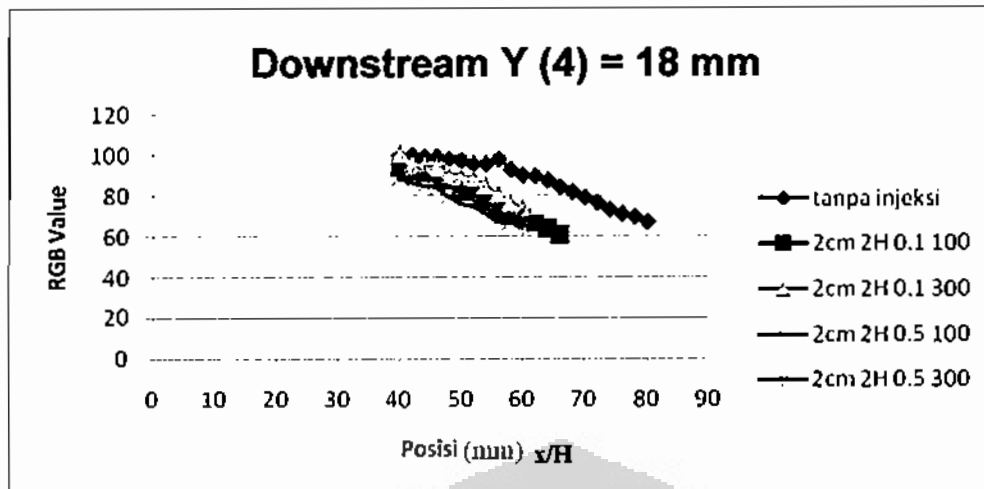
Gambar 4.57 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* baris pertama



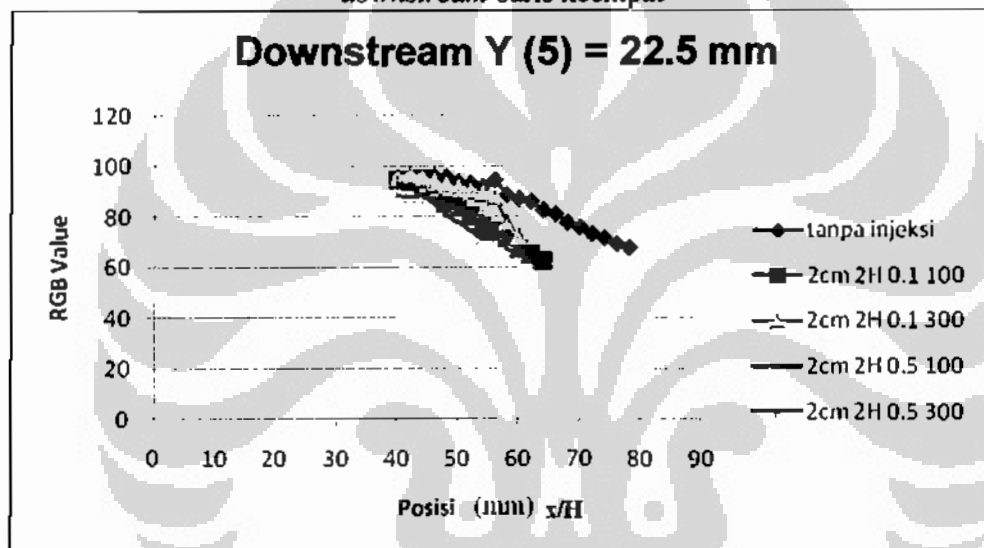
Gambar 4.58 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* baris kedua



Gambar 4.59 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* baris ketiga



Gambar 4.60 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* baris keempat



Gambar 4.61 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* baris kelima

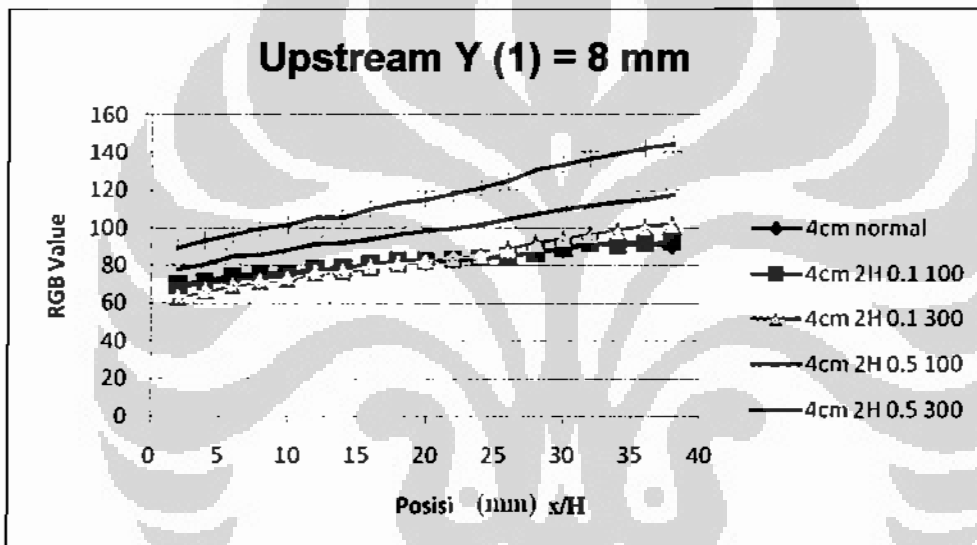
Sedangkan untuk grafik *downstream* yang ditunjukkan oleh Gambar 4.57 hingga 4.61 mempunyai karakteristik yang berbeda, dimana untuk semua grafik ini kondisi tanpa injeksi mempunyai nilai RGB / kepekatan partikel yang paling tinggi. Hal ini dikarenakan tidak adanya halangan dari luar sehingga *shear 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 baris yang ada.

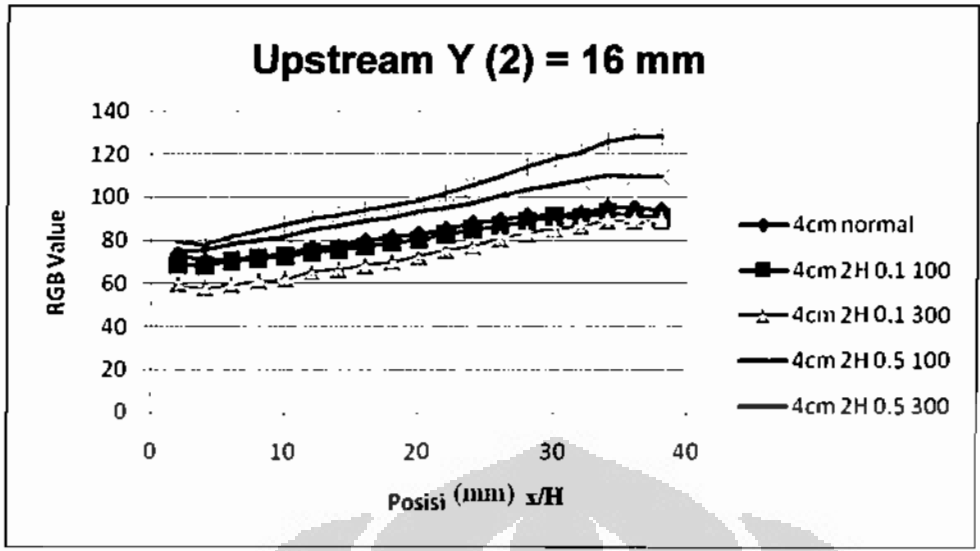
Untuk injeksi dengan rasio 0.1, nilai RGB yang mengalami penurunan menunjukkan bahwa pada daerah *downstream* kepekatannya tidak konstan seperti rasio 0.5 namun memiliki konsentrasi partikel yang lebih besar. Namun karena partikelnya sudah tersebar menuju berbagai macam arah, nilai kepekatan ini tidak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

4.5.5 Ketinggian *step* 2H

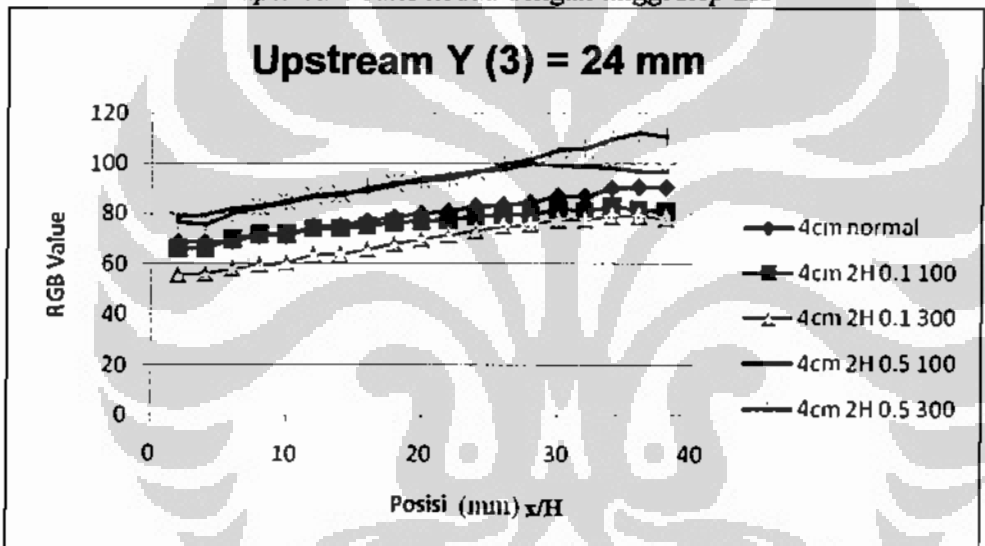
Analisa pada sub-bab ini menitik beratkan pada aliran dengan ketinggian *step* sebesar 2H, sama seperti analisa kuantitatif. Berikut adalah rentetan grafik *upstream* dan *downstream* untuk kondisi tersebut.



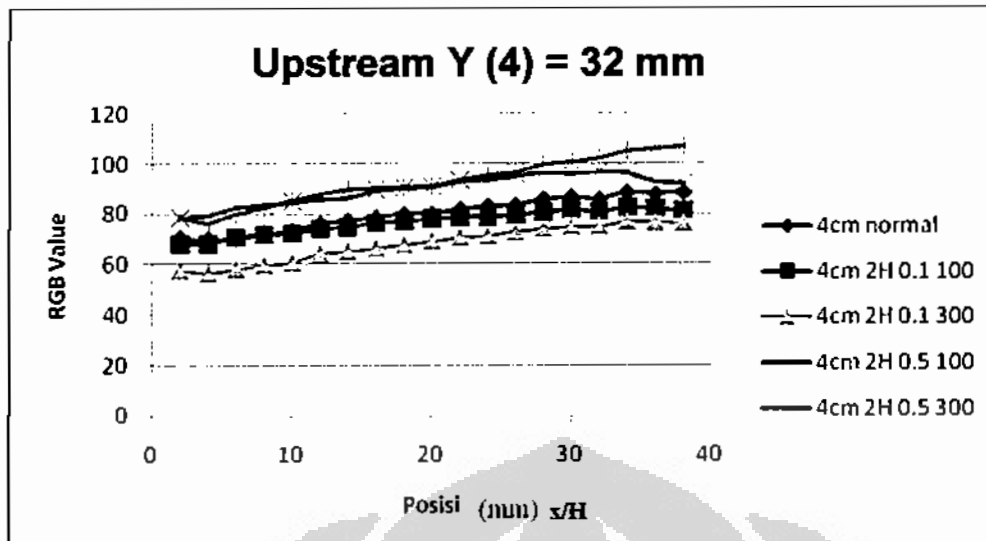
Gambar 4.62 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* baris pertama dengan tinggi *step* 2H



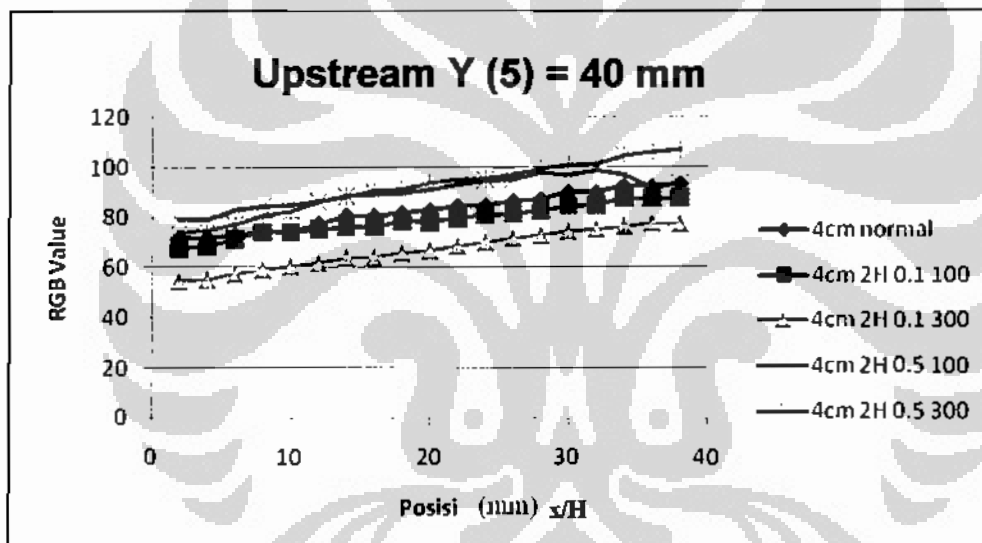
Gambar 4.63 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* baris kedua dengan tinggi *step* 2H



Gambar 4.64 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* baris ketiga dengan tinggi *step* 2H



Gambar 4.65 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* baris keempat dengan tinggi *step* 2H

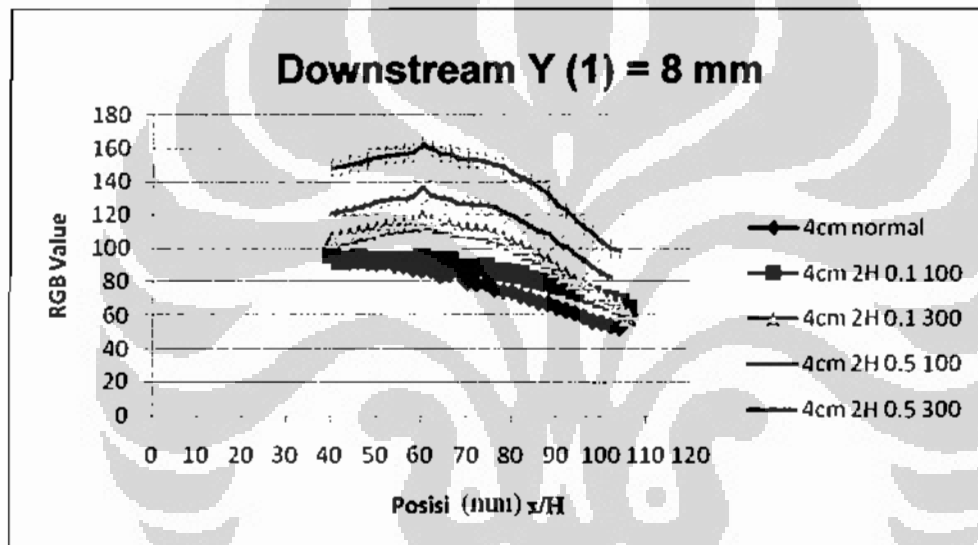


Gambar 4.66 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *upstream* baris kelima dengan tinggi *step* 2H

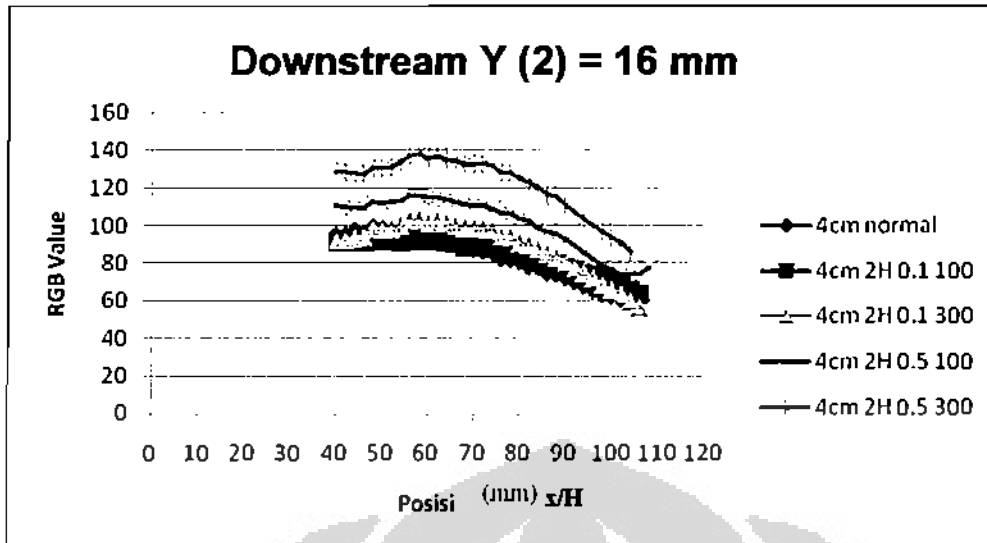
Pada grafik yang ditunjukkan pada Gambar 4.62 dapat dilihat bahwa terjadi fenomena yang berlawanan dengan apa yang terjadi pada tinggi *step* sebesar H dimana kondisi dengan rasio injeksi 0.5 mempunyai nilai konsentrasi partikel / kepekatan yang tertinggi dan rasio injeksi 0.1 mempunyai nilai terendah. Nilai untuk tanpa injeksi tidak berubah banyak dibandingkan tinggi *step* H. Hal ini dikarenakan gabungan variasi parameter antara rasio injeksi 0.5 dengan tinggi *step* 2H 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 H.

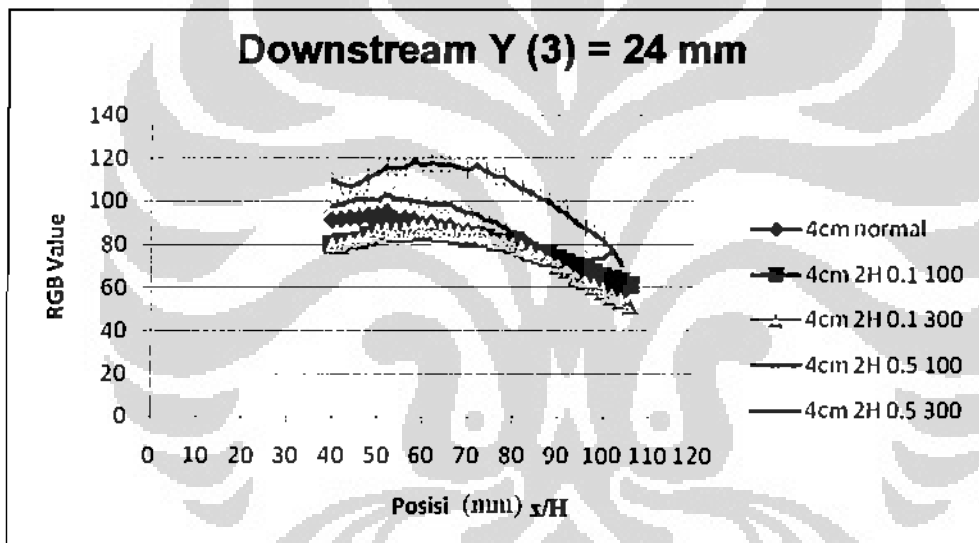
Pada Gambar 4.63 hingga 4.66 terjadi perubahan kepekatan partikel pada titik yang mendekati titik injeksi, menuju pengurangan partikel, hal ini dikarenakan persebaran partikel menuju daerah lain akibat kontak dengan dinding injeksi atau bisa disebut dengan *block effect*. Mengenai persebaran dari partikel untuk masing-masing kondisi mempunyai gradien peningkatan yang konstan.



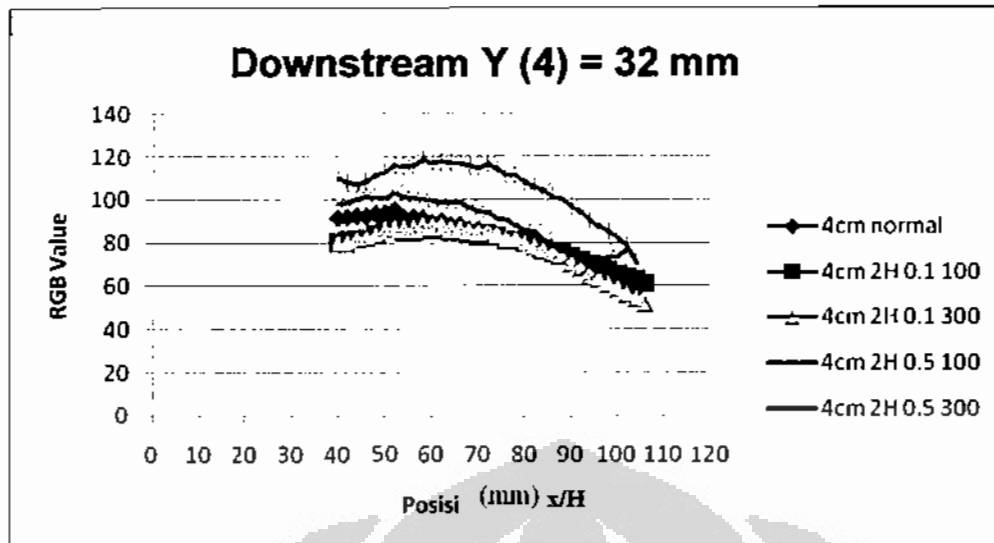
Gambar 4.67 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* baris pertama dengan tinggi *step* 2H



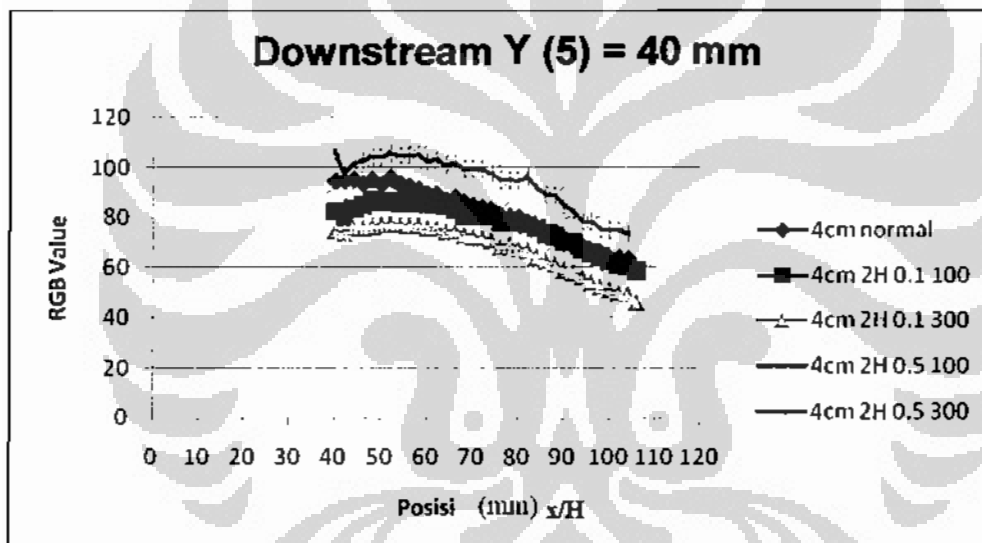
Gambar 4.68 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* baris kedua dengan tinggi *step* 2H



Gambar 4.69 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* baris ketiga dengan tinggi *step* 2H



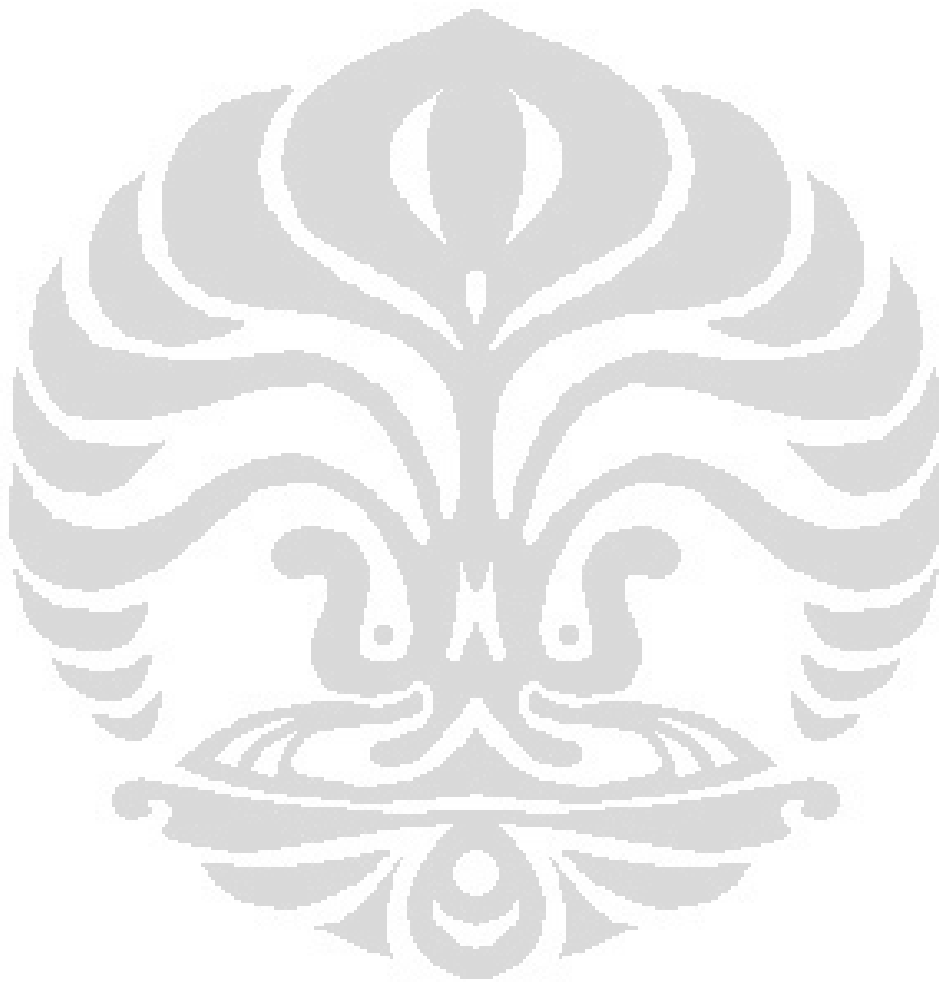
Gambar 4.70 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* baris keempat dengan tinggi *step* 2H



Gambar 4.71 Grafik perbandingan kondisi injeksi dan tanpa injeksi bagian *downstream* baris kelima dengan tinggi *step* 2H

Bagian terakhir dari analisa ini adalah pembahasan mengenai daerah *downstream* untuk ketinggian *step* sebesar 2H. Dari Gambar 4.67 hingga Gambar 4.71 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* 2H

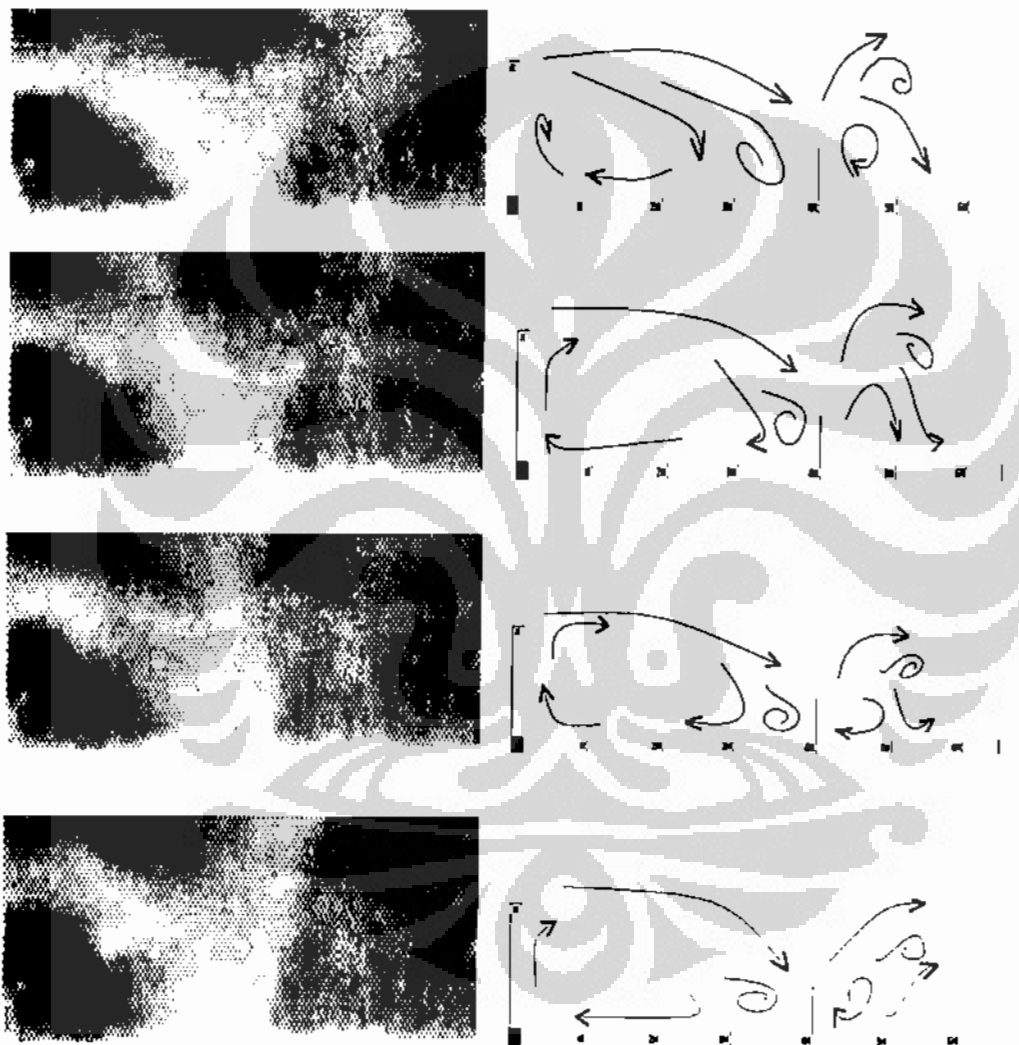
dikarenakan luasan penyebaran yang lebih besar. Namun kondisi rasio 0.1 masih mempunyai kepekatan yang lebih besar dibandingkan kondisi tanpa injeksi dikarenakan injeksi yang diberikan akan meningkatkan turbulensi dari aliran, sehingga kepekatan dari aliran akan meningkat, tidak seperti aliran tanpa injeksi yang akan mengalir namun mempunyai medan resirkulasi yang rendah. Fenomena yang dapat dilihat dari kelima grafik diatas adalah merapatnya kelima grafik pada ujung titik baris kelima, hal ini dikarenakan pada titik ujung tersebut aliran sudah mulai mengalami proses *reattachment* sehingga kembali menjadi aliran laminar.



4.6 Hasil Visualisasi Aliran Resirkulasi Dengan Menggunakan Metode Light Sheet

4.6.1 Ketinggian Step 1H Jarak Injeksi 4H

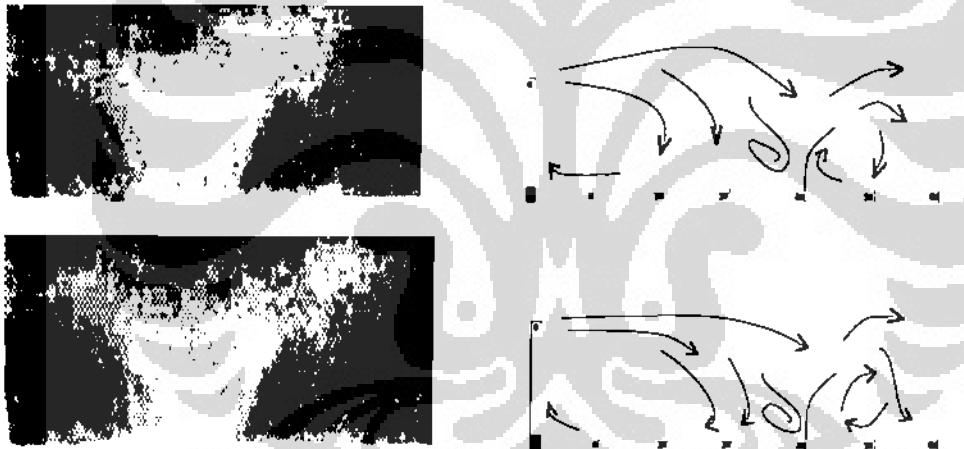
Metode yang dilakukan dalam kegiatan eksperimen ini menggunakan lembar cahaya (*light sheet*) untuk melihat visualisasi aliran yang terjadi akibat dari pengaruh injeksi udara panas yang diberikan. Dari gambar tersebut di dapat aliran resirkulasi terbelah menjadi beberapa bagian yang disebabkan oleh injeksi aliran.

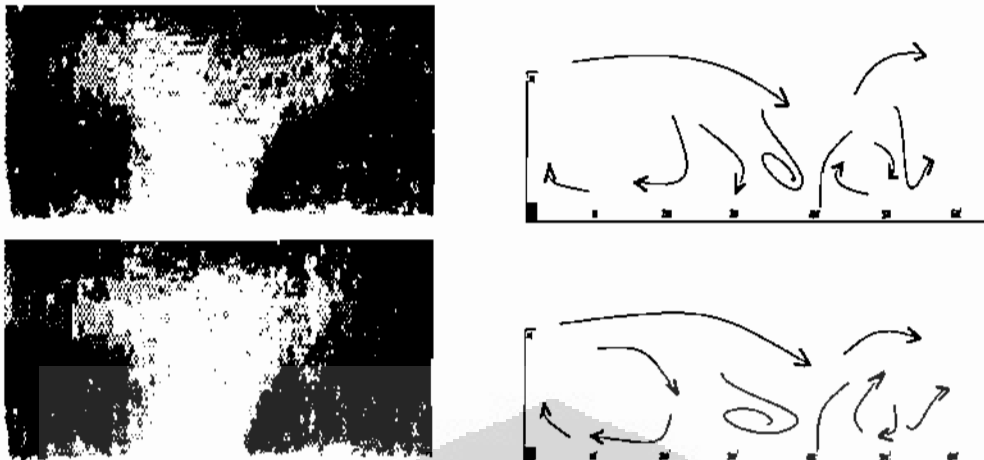


Gambar 4.72 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 100 °C

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

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

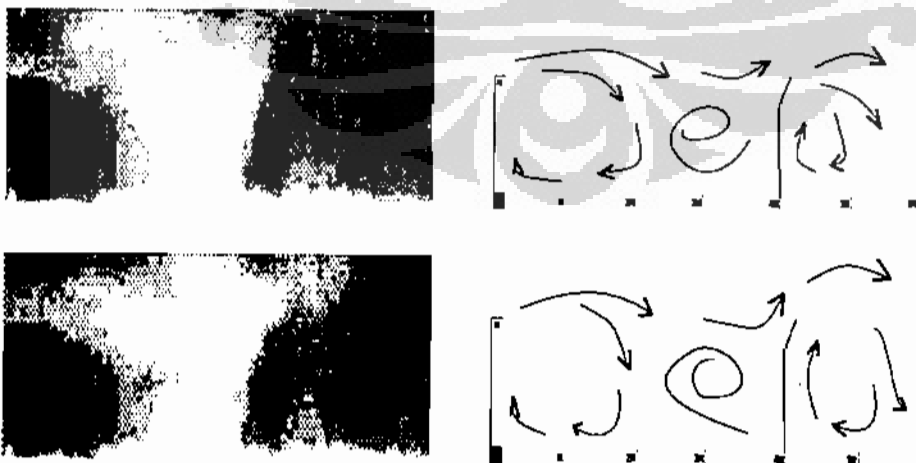


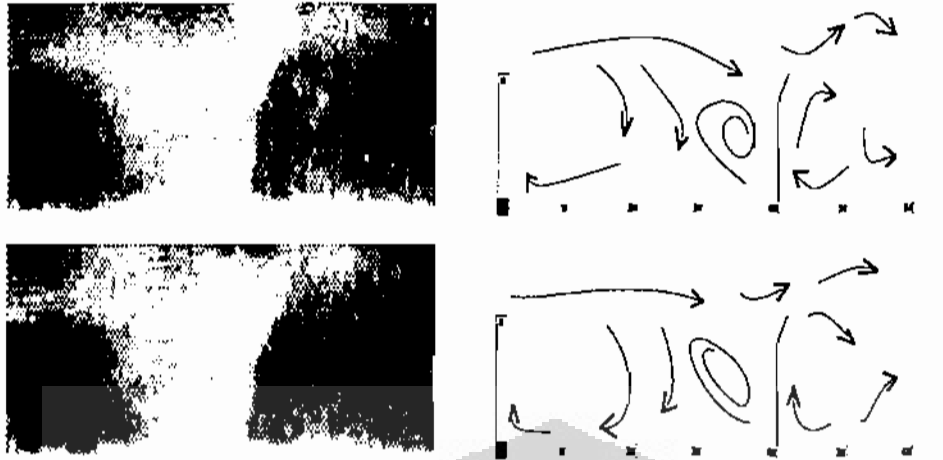


Gambar 4.73 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 300 °C

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

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

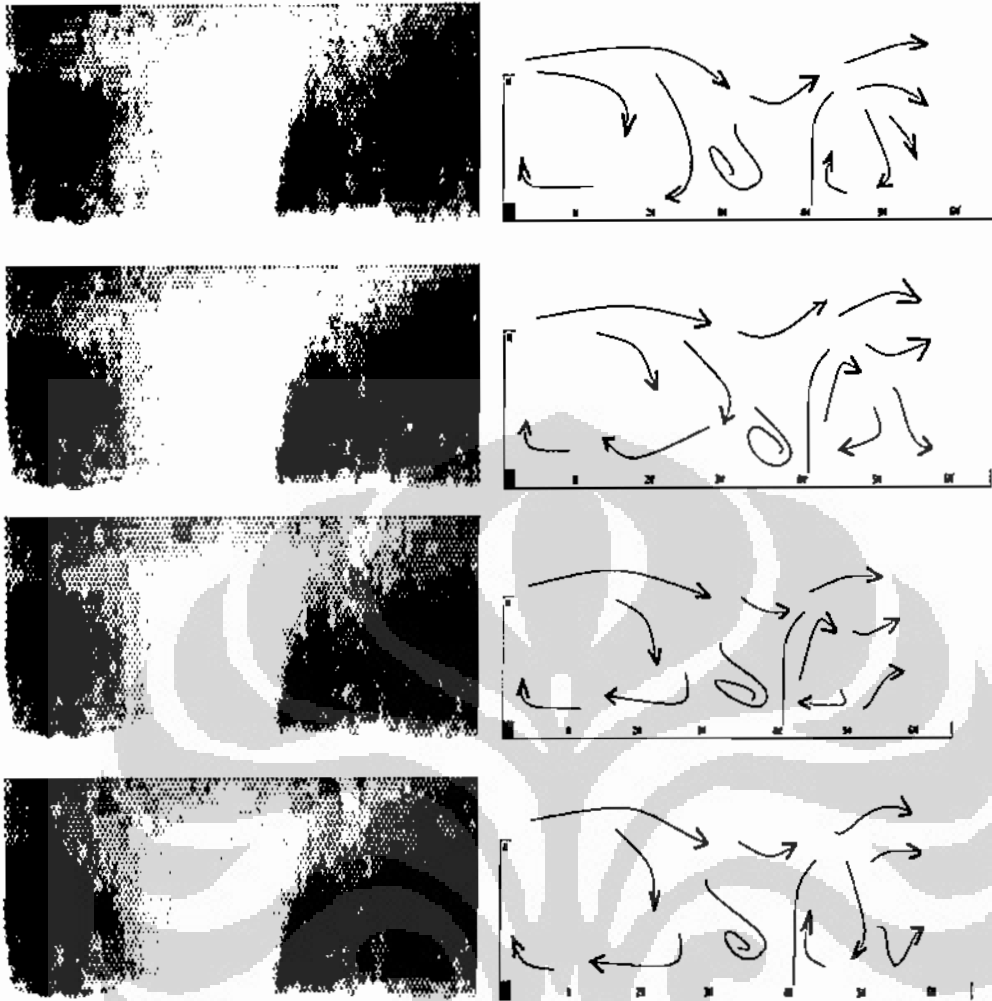




Gambar 4.74 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 100 °C

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

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



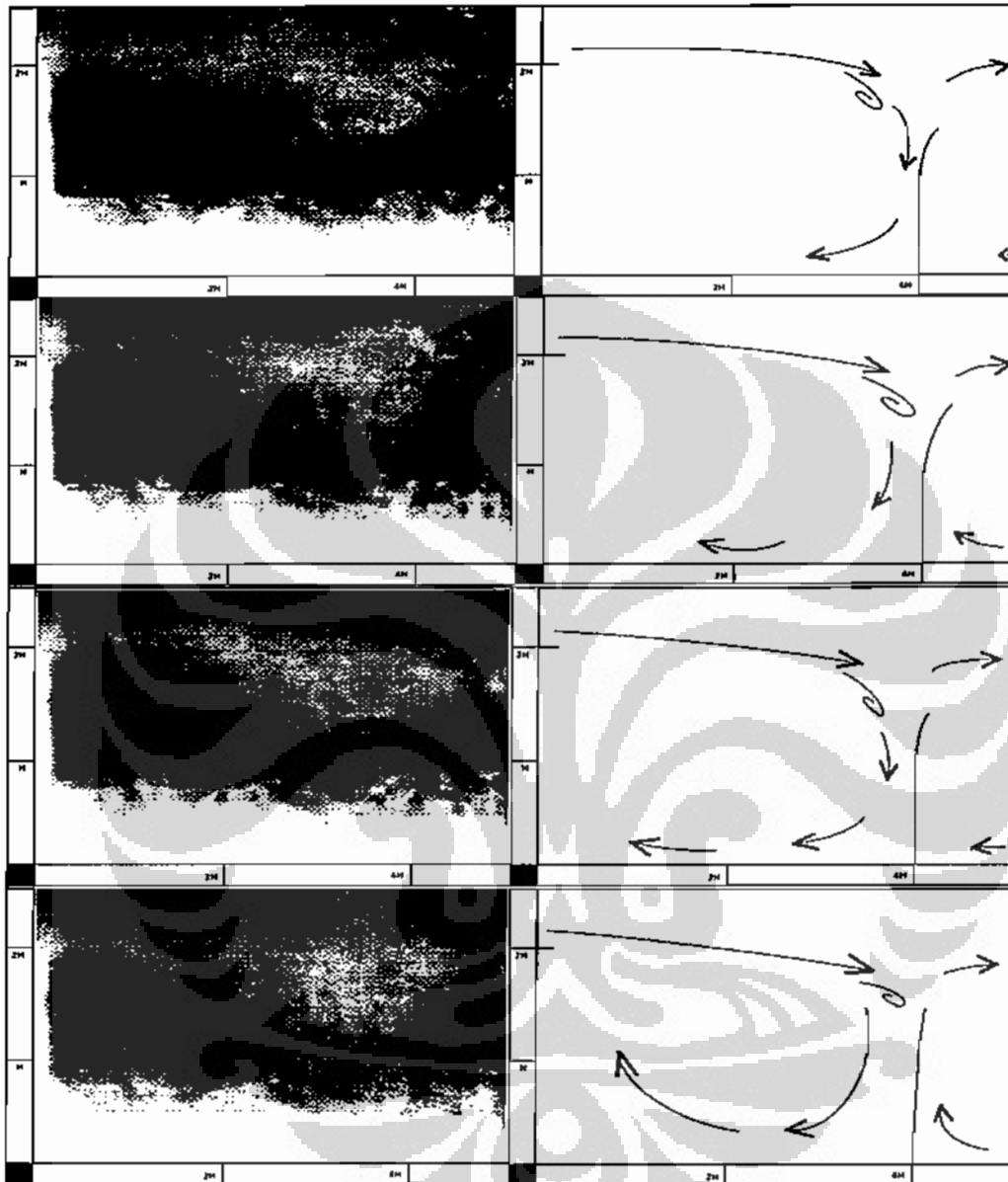
Gambar 4.75 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 300 °C

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

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

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

4.6.2 Ketinggian Step 2H Injeksi 4H

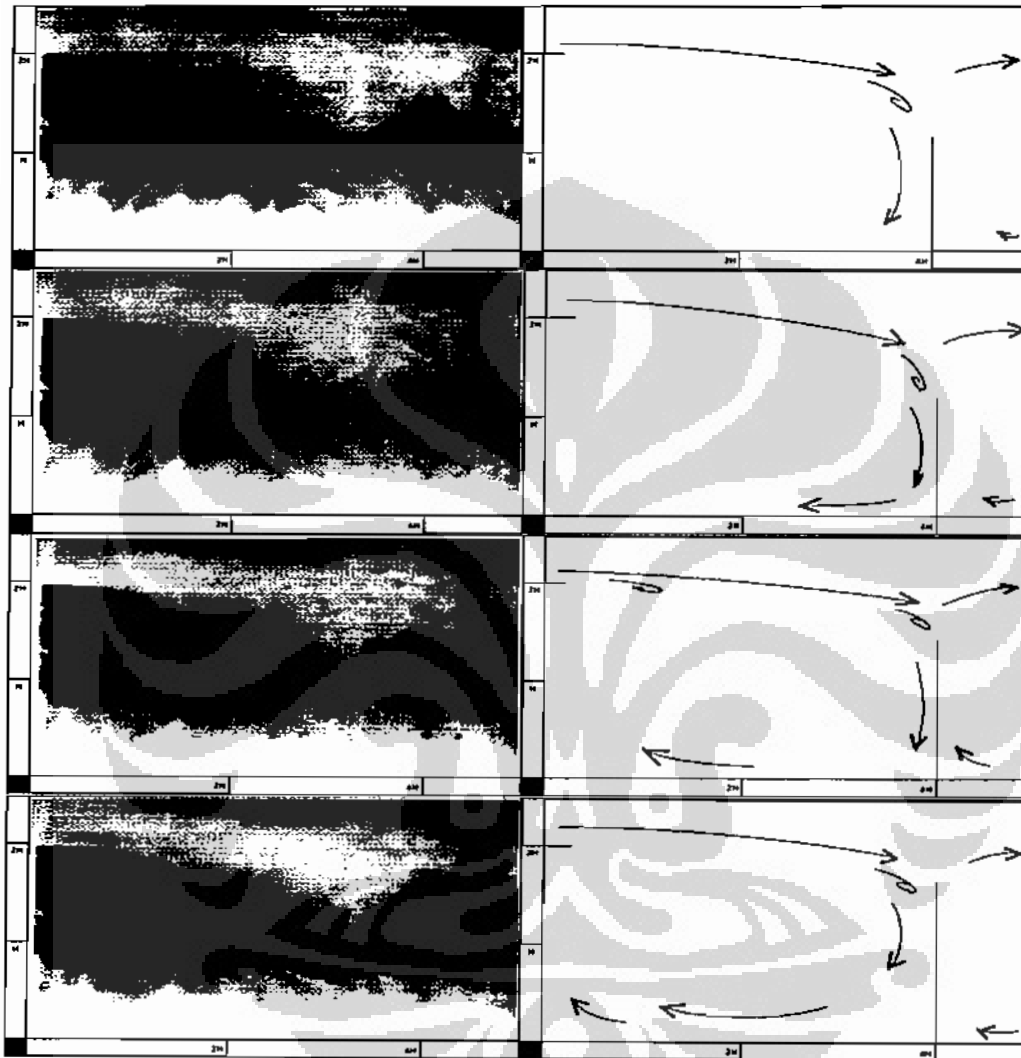


Gambar 4.76 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 100 °C

Aliran resirkulasi yang terbentuk pada wilayah upstream dapat dikatakan lemah sebab wilayah palung yang terbentuk relatif luas. Selain itu, wilayah aliran

separated - reattaching yang terbentuk memiliki tingkat intensitas turbulen yang relatif rendah hampir pada setiap bagian struktur aliran.

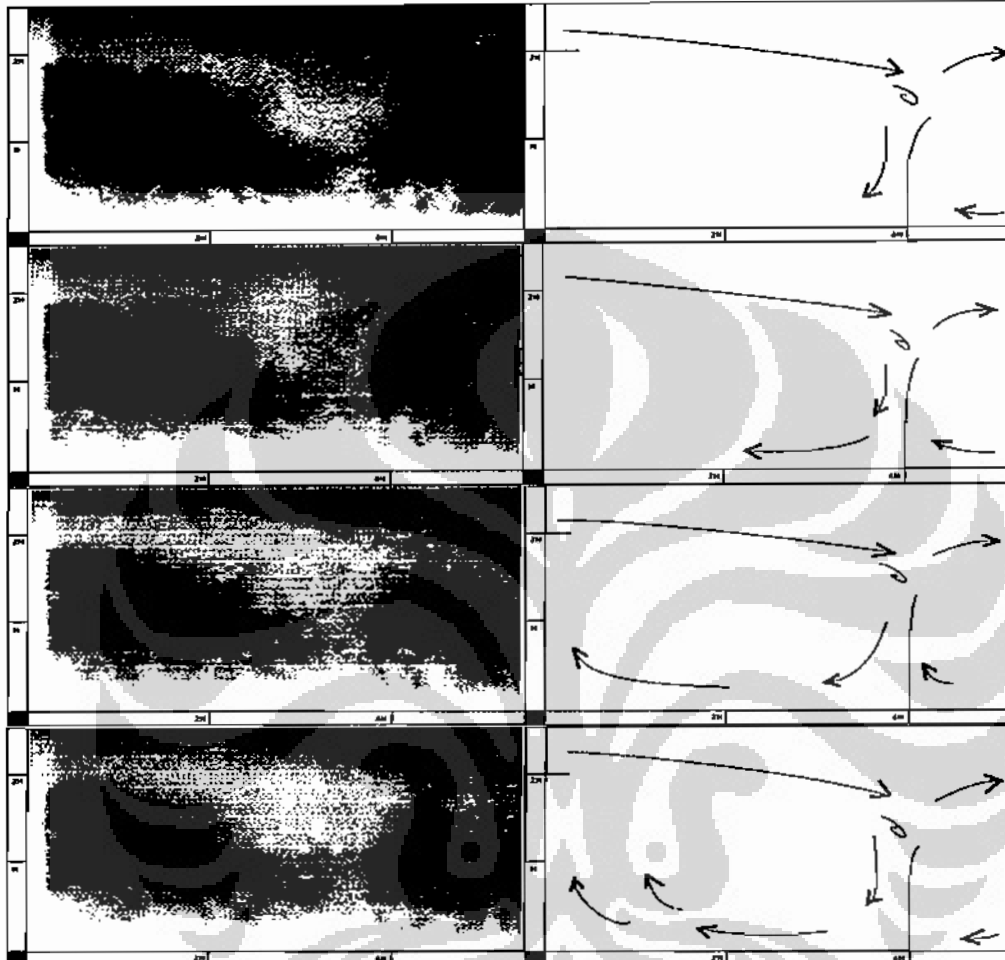
Pada wilayah downstream, terbentuk palung yang disebabkan oleh aliran resirkulasi yang tidak begitu kuat dan tidak merata. Pola dari aliran injeksi yang terbentuk cukup melengkung (bow effect).



Gambar 4.77 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,1 dan Temperatur Injeksi 300 °C

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

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

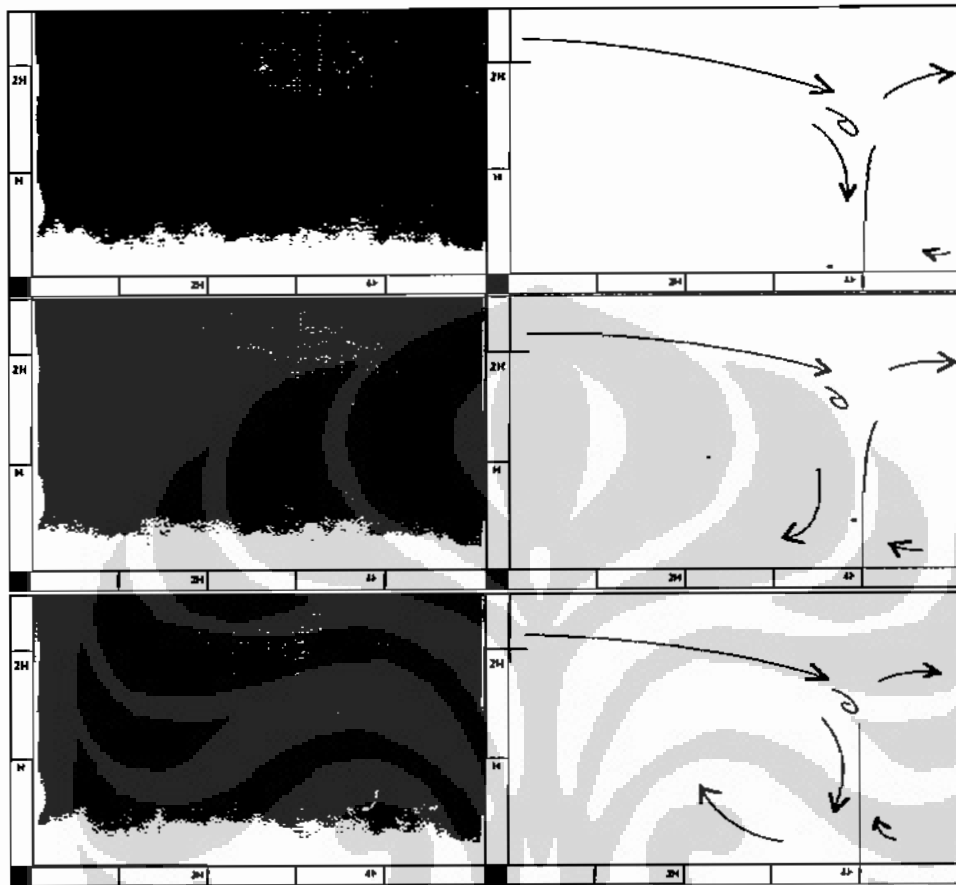


Gambar 4.78 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 100 °C

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

Tingkat intensitas turbulen yang relatif paling tinggi, terdapat pada wilayah shear layer. Hal ini mungkin terjadi karena semakin banyak partikel aliran yang terhalan oleh injeksi, kemudian bergerak menuju ke arah upstream

membentuk aliran resirkulasi. Aliran resirkulasi yang terbentuk pada wilayah downstream menjadi semakin kuat sehingga wilayah palung yang terbentuk semakin mengecil.



Gambar 4.79 Rangkaian Ilustrasi Pola Aliran Kondisi Rasio Momentum Injeksi 0,5 dan Temperatur Injeksi 300 °C

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

Wilayah palung yang dihasilkan pun juga demikian, kondisi percobaan dengan rasio momentum injeksi 0,5 dan temperatur injeksi 300 °C semakin jelas dan relatif luas. Hal ini dapat terjadi karena terjadinya peningkatan block effect dan barrel effect pada aliran injeksi. Bentuk aliran injeksi menjadi lebih tegak

karena aliran injeksi semakin mampu menembus shear layer, dan barrel effect mengakibatkan wilayah kosong yang terbentuk tepat setelah injeksi menjadi semakin luas.

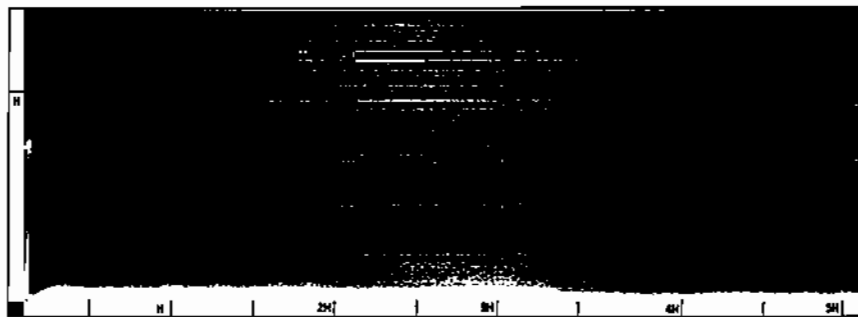
4.6.3 Analisa Kualitatif

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

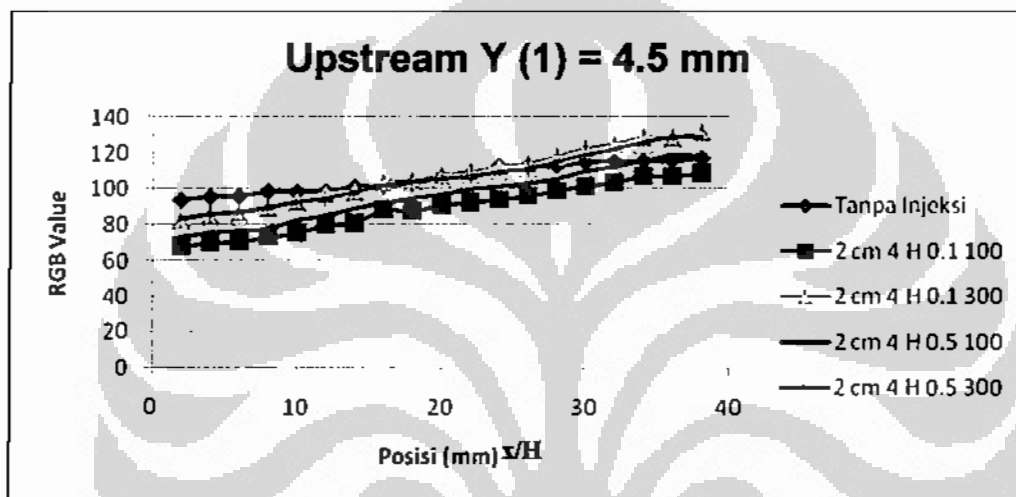
Yang akan menjadi acuan dasar perbandingan nilai RGB value adalah kondisi percobaan dimana tidak memanfaatkan injeksi gas panas. RGB value diperoleh melalui pengukuran pada titik - titik yang telah ditentukan terlebih dahulu ditentukan jarak dan jumlah barisnya (*scaling*). Jarak antar titik pengukuran adalah 2 mm secara horizontal dengan jumlah baris secara vertikal yaitu lima buah baris (jarak menyesuaikan dengan besarnya gambar hasil pemrosesan. Jumlah data yang digunakan dari masing - masing kondisi percobaan adalah 100 buah sampel data dari keseluruhan 1000 buah data. Dari 100 sampel data yang telah ditentukan, kemudian akan dilakukan *averaging*. Dengan menggunakan cara pengukuran dan *averaging* seperti yang telah disebutkan sebelumnya, hasil yang diperoleh telah dapat dianggap cukup representatif untuk kemudian dianalisa secara kualitatif.

Seperti halnya pada analisa kualitatif, pembahasan pada analisa kuantitatif juga akan dibedakan berdasarkan ketinggian step yang digunakan. Nilai RGB hasil pengukuran kemudian diplot ke dalam grafik untuk dianalisa. Lima jumlah baris diurutkan menjadi baris pertama, kedua, ketiga, keempat, dan kelima dengan baris pertama merupakan baris dengan posisi ketinggian yang paling atas. Baris berikutnya berada di bawahnya secara berurutan.

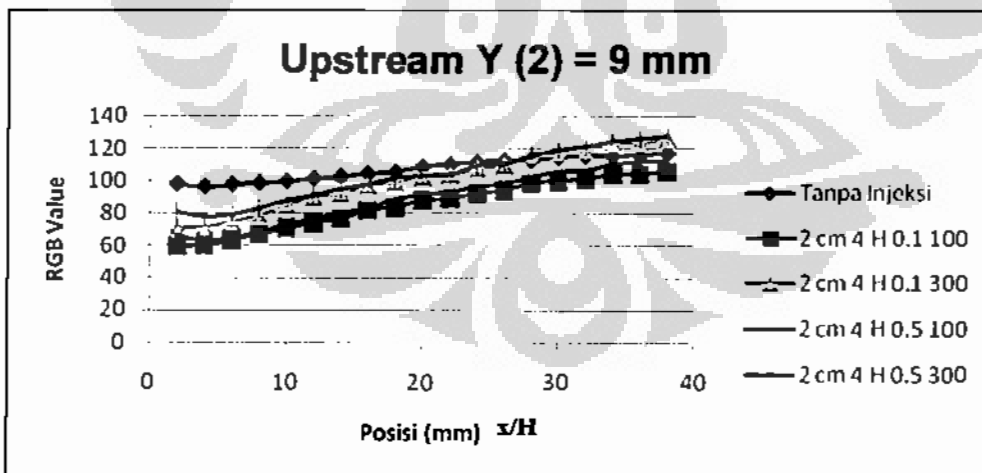
4.6.4 Ketinggian Step H Jarak Injeksi 4H



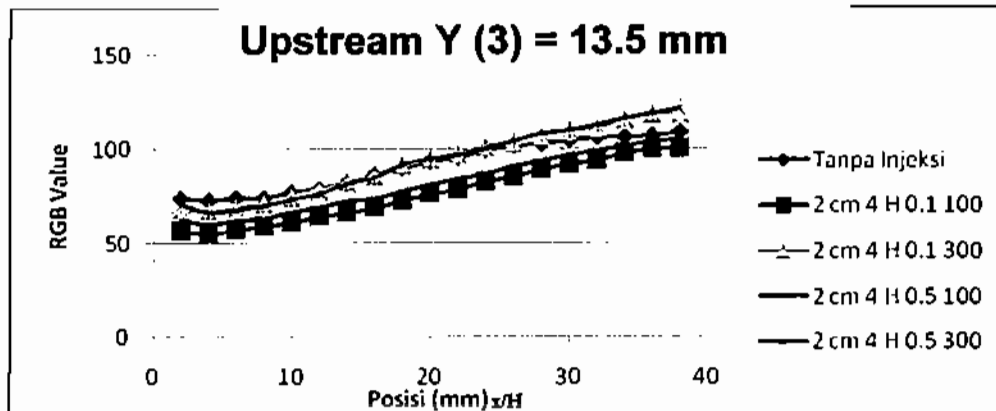
Gambar 4.80 Scaling Pengukuran RGB Value Ketinggian Step H



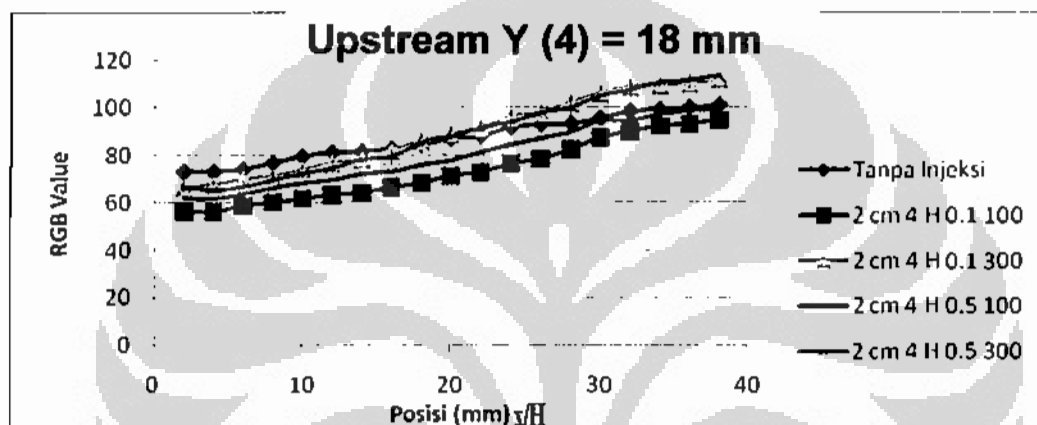
Gambar 4. 81 Grafik RGB Value vs Posisi Upstream Baris 1



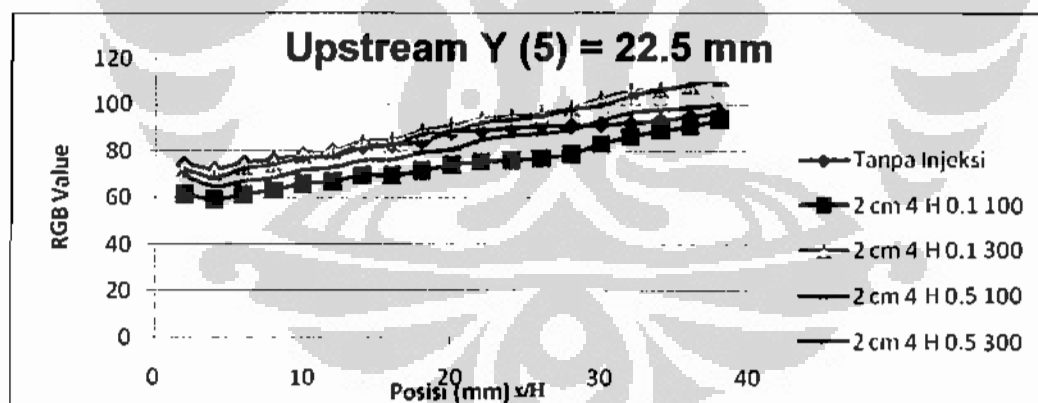
Gambar 4. 82 Grafik RGB Value vs Posisi Upstream Baris 2



Gambar 4. 83 Grafik RGB Value vs Posisi Upstream Baris 3



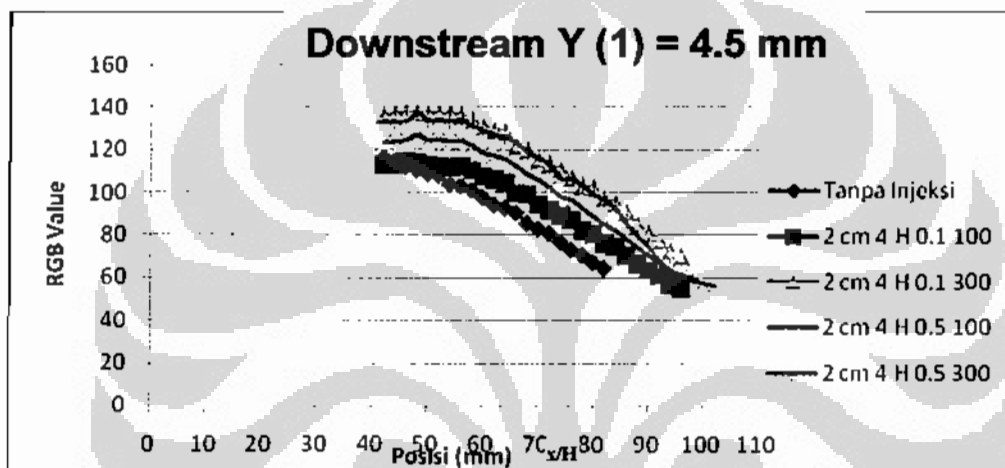
Gambar 4. 84 Grafik RGB Value vs Posisi Upstream Baris 4



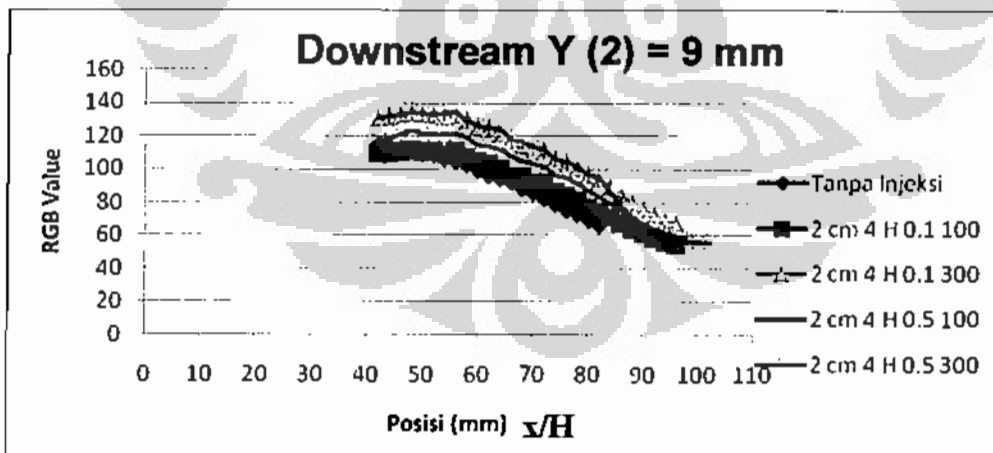
Gambar 4. 85 Grafik RGB Value vs Posisi Upstream Baris 5

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.81, pada baris paling atas, yaitu baris 1, dapat dilihat bahwa nilai yang diperoleh pada wilayah upstream untuk kondisi dengan temperatur injeksi 300 °C memiliki persebaran nilai yang relatif lebih tinggi bila dibandingkan dengan kondisi yang lain. Meskipun pada titik - titik awal terlihat bahwa kondisi tanpa injeksi memiliki persebaran nilai yang

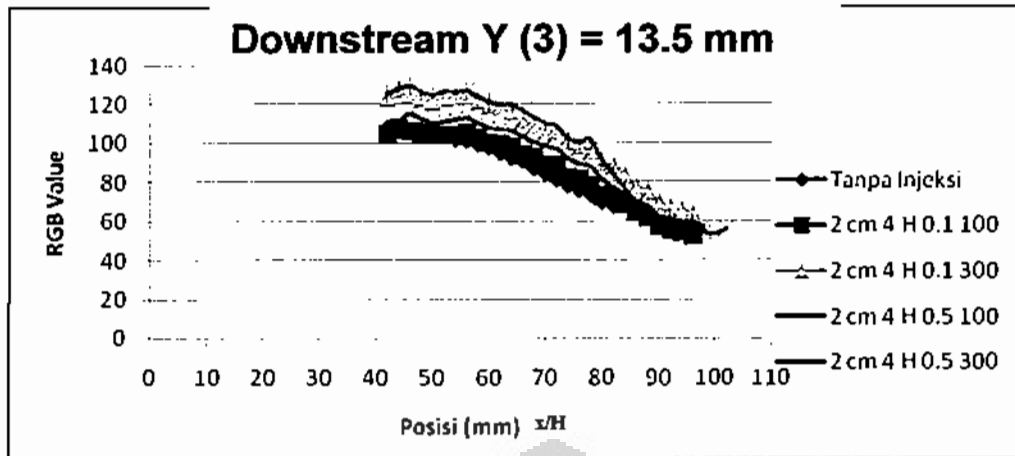
lebih tinggi, namun kondisi dengan adanya injeksi gas panas lambat laun akan semakin meningkat seiring dengan semakin dekatnya titik pengukuran dengan dasar step. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.82, 4.83, dan 4.84. Dengan kata lain, adanya injeksi gas panas akan menyebabkan kemampuan injeksi untuk menembus shear layer meningkat sehingga akan semakin banyak partikel aliran shear layer yang tertahan kemudian bergerak mengarah ke dasar step. Pada Gambar 4.85, terlihat bahwa nilai pada titik - titik awal pada kondisi dengan temperatur yang tadinya berada di bawah kondisi tanpa injeksi, mulai melampaui nilai kondisi tanpa injeksi. Hal ini berarti konsentrasi partikel aliran bergerak menuju ke dinding step bagian bawah akibat adanya injeksi gas panas.



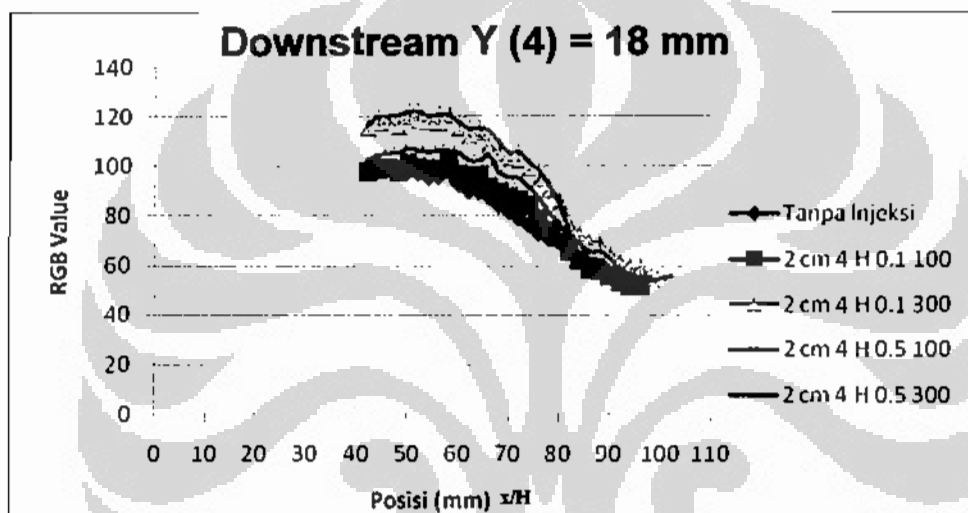
Gambar 4. 86 Grafik RGB Value vs Posisi Downstream Baris 1



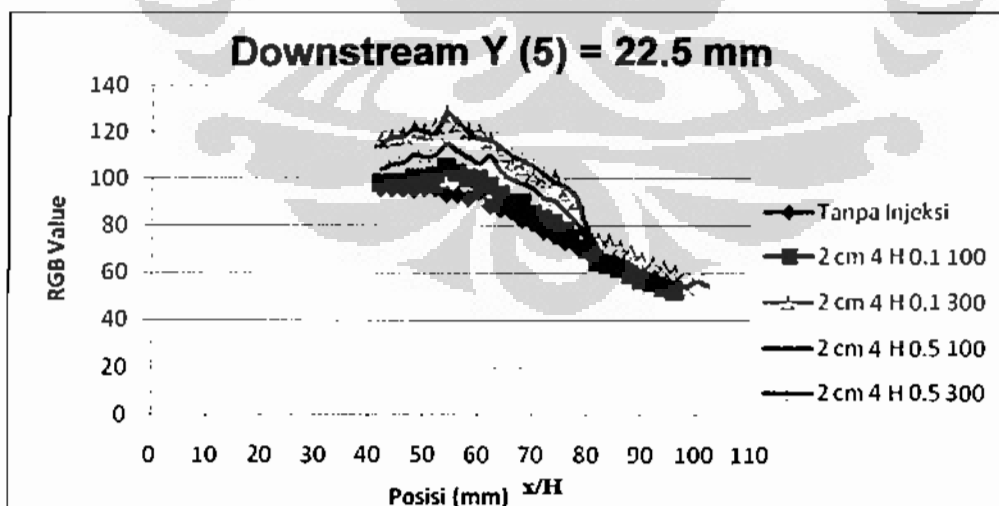
Gambar 4. 87 Grafik RGB Value vs Posisi Downstream Baris 2



Gambar 4. 88 Grafik RGB Value vs Posisi Downstream Baris 3



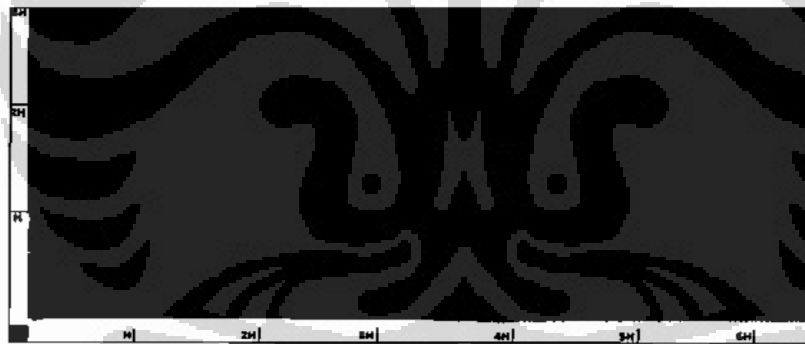
Gambar 4. 89 Grafik RGB Value vs Posisi Downstream Baris 4



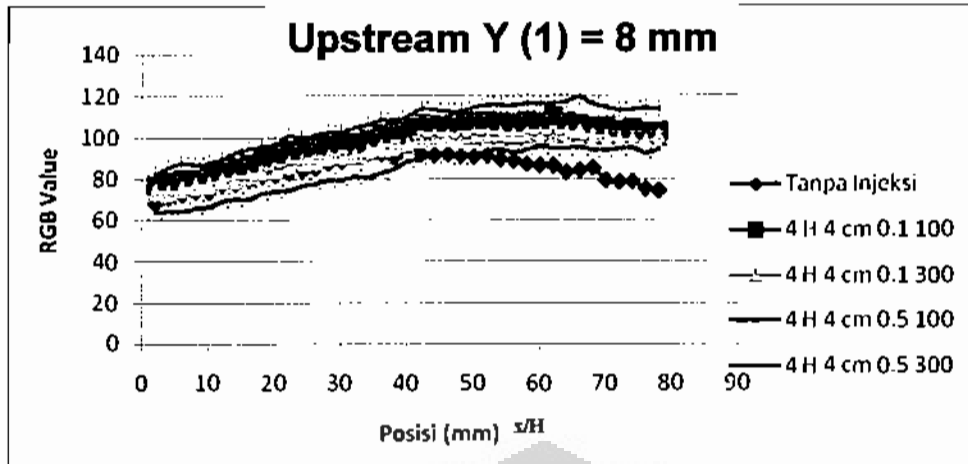
Gambar 4. 90 Grafik RGB Value vs Posisi Downstream Baris 5

Kondisi wilayah downstream untuk posisi yang paling atas, yaitu Baris 1, menunjukkan bahwa persebaran nilai yang terjadi memiliki pola yang relatif seragam. Kondisi tanpa injeksi menunjukkan nilai yang paling rendah, sedangkan untuk kondisi dengan injeksi gas panas cenderung semakin tinggi seiring dengan kenaikan temperatur. Pada titik - titik akhir, nilai yang ditunjukkan oleh kelima buah grafik relatif hampir sama, hal ini berarti fenomena bow effect yang terjadi pada kelima kondisi tidak jauh berbeda. Kondisi dengan pemanfaatan injeksi untuk setiap kondisi, menunjukkan bahwa terjadi kenaikan pada titik - titik awal. Hal ini dapat diartikan bahwa dengan adanya injeksi gas panas, maka sebagian partikel aliran shear layer, selain dari yang tertahan dan bergerak menuju dinding, akan terdorong ke atas menuju ke arah downstream. Oleh sebab itu, intensitas partikel aliran pada titik - titik awal untuk kondisi dengan injeksi menunjukkan kenaikan yang cukup signifikan. Untuk semua kondisi percobaan selain yang tanpa injeksi, nilai akhir hampir mengacu pada nilai yang sama. Hal ini berarti pada titik - titik akhir pengukuran pola aliran yang terjadi sudah cenderung menuju laminar, oleh karena itu intensitas partikel aliran sudah sulit untuk ditemui.

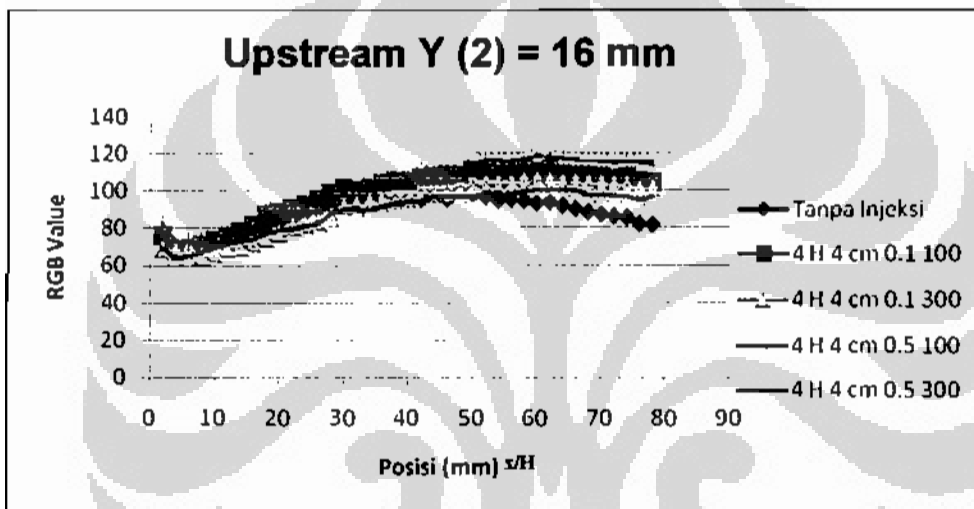
4.6.5 Ketinggian Step 2H Jarak Injeksi 4H



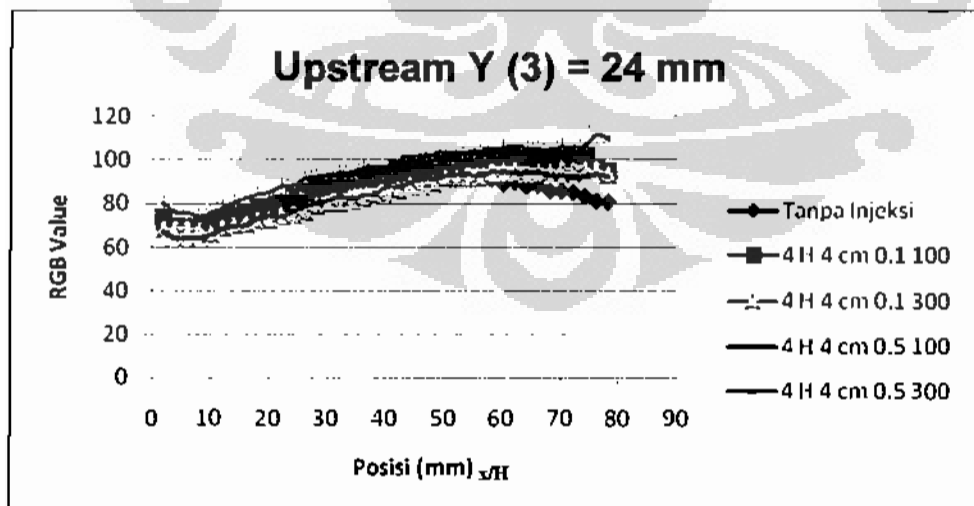
Gambar 4.91 Scaling Pengukuran RGB Value Ketinggian Step 2H



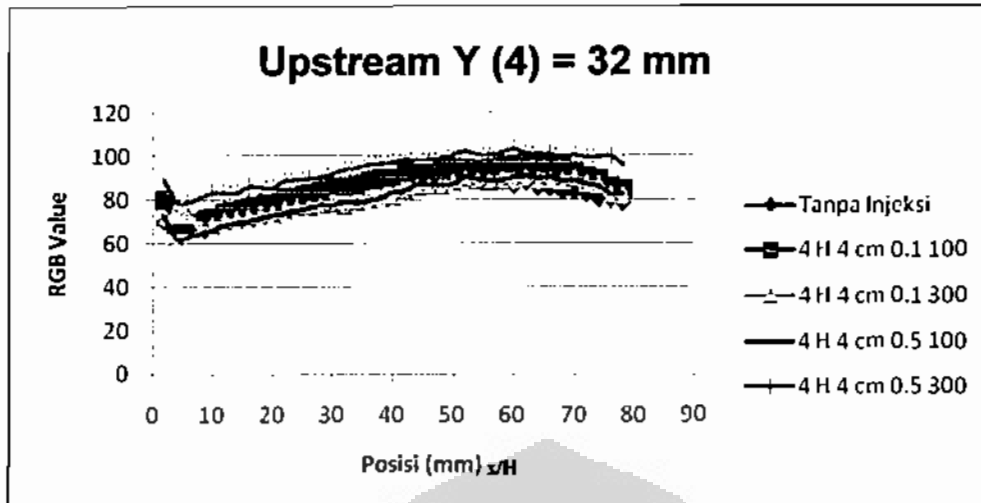
Gambar 4.92 Grafik RGB Value vs Posisi Upstream Baris 1



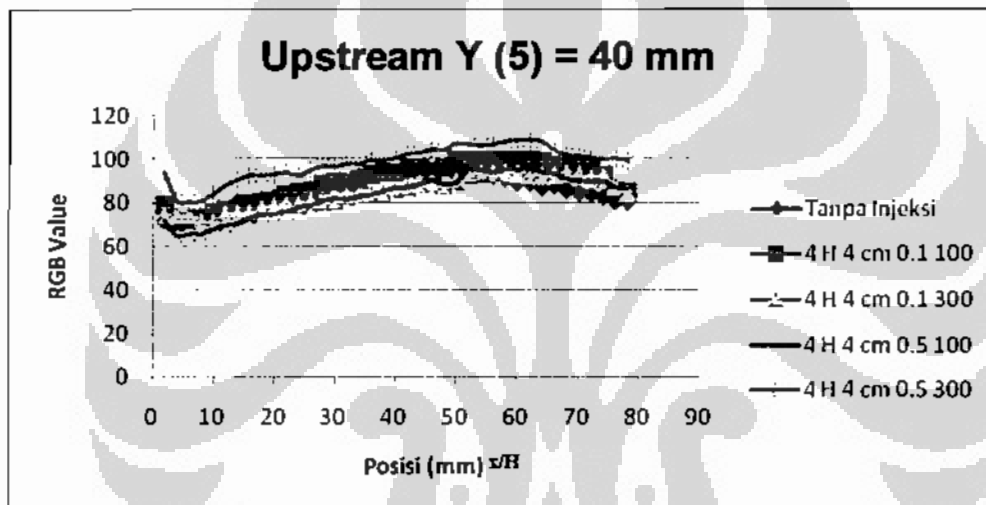
Gambar 4.93 Grafik RGB Value vs Posisi Upstream Baris 2



Gambar 4.94 Grafik RGB Value vs Posisi Upstream Baris 3



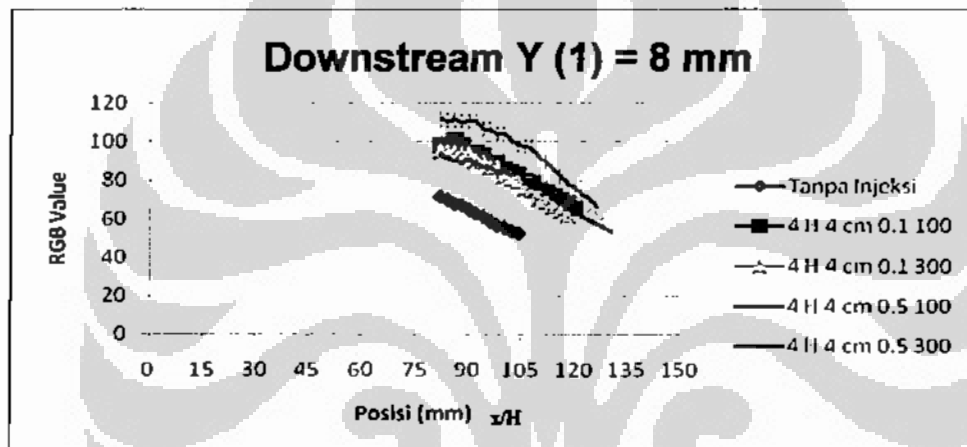
Gambar 4.95 Grafik RGB Value vs Posisi Upstream Baris 4



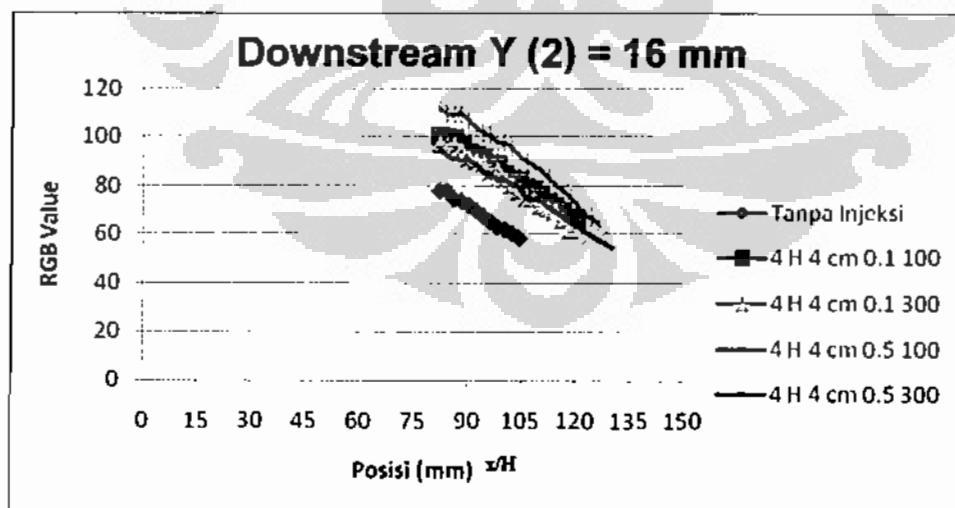
Gambar 4.96 Grafik RGB Value vs Posisi Upstream Baris 5

Berbeda dengan nilai yang diperoleh pada baris - baris setelahnya, baris 1 memiliki nilai yang relatif tinggi pada titik - titik awal, seperti halnya yang ditunjukkan pada grafik 4.92. Hal ini dapat diartikan bahwa intensitas partikel aliran yang terbentuk cenderung lebih stabil karena aliran pada bagian atas belum begitu terpengaruh dengan perubahan pada shear layer. Sedangkan untuk kondisi baris - baris yang lain, pada titik awal akan terjadi penurunan nilai yang cukup signifikan. Hal ini disebabkan oleh mulai terbentuknya shear layer yang nantinya secara lebih jauh akan menghasilkan aliran resirkulasi pada wilayah upstream. Namun dikarenakan oleh ketinggian step yang digunakan, aliran resirkulasi yang terbentuk pada wilayah upstream tidak begitu kuat dan kurang merata, oleh karena

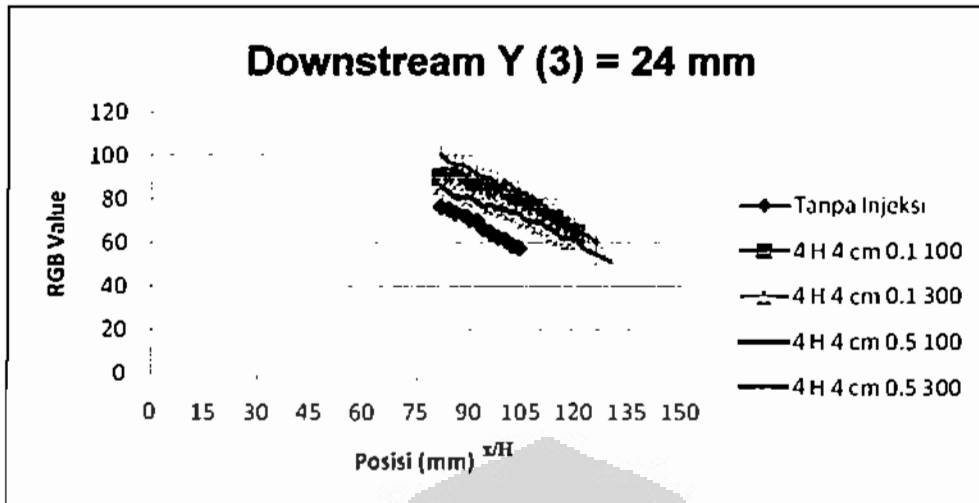
itu terbentuk lah palung. Hal ini lah yang menjelaskan mengapa terjadi penurunan nilai RGB yang cukup signifikan seperti yang ditunjukkan Gambar 4.93, 4.94, 4.95, dan 4.96. Sedangkan untuk persebaran nilai RGB dengan titik pengukuran yang semakin mendekati injeksi, untuk kelima buah baris memiliki pola dan nilai yang hampir serupa, hal ini berarti aliran shear layer yang terbentuk merata. Khusus untuk kondisi dengan rasio momentum injeksi 0,5 temperatur injeksi 300 °C pada baris 5, memiliki range nilai yang cukup renggang dengan kondisi - kondisi yang lain dibandingkan dengan baris 1, 2, 3, dan 4. Hal ini mungkin terjadi karena aliran resirkulasi pada wilayah upstream yang terbentuk dengan perpaduan variasi rasio momentum injeksi tinggi dan temperatur injeksi yang juga tinggi relatif kuat dan merata.



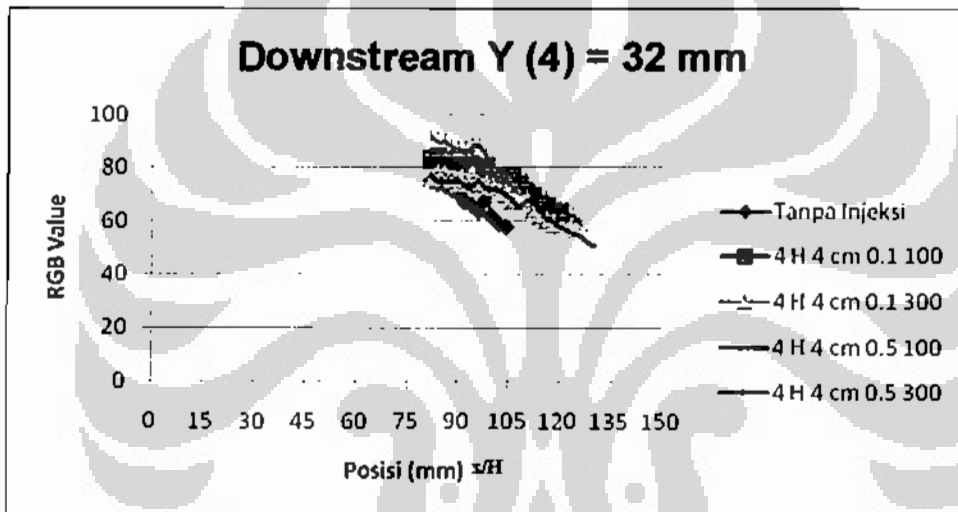
Gambar 4.97 Grafik RGB Value vs Posisi Downstream Baris 1



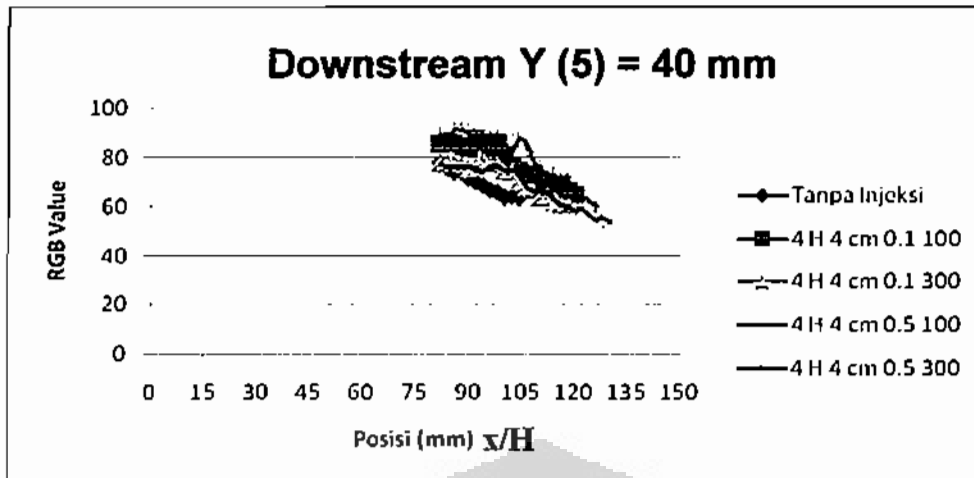
Gambar 4.98 Grafik RGB Value vs Posisi Downstream Baris 2



Gambar 4.99 Grafik RGB Value vs Posisi Downstream Baris 3



Gambar 4.10 Grafik RGB Value vs Posisi Downstream Baris 4



Gambar 4.101 Grafik RGB Value vs Posisi Downstream Baris 5

Pola persebaran data pada wilayah downstream tidak jauh berbeda dengan pola persebaran data pada wilayah upstream. Seiring dengan titik pengukuran semakin mendekati alas step, persebaran data untuk kelima kondisi semakin rapat, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.101 meskipun terjadi beberapa fluktuasi data pada beberapa titik. Dengan kata lain, fenomena ini terjadi karena adanya block effect dalam wilayah downstream akibat adanya injeksi gas panas. Pada kondisi rasio momentum injeksi 0,5 dan temperatur injeksi 300 °C, akan terjadi fenomena barrel effect yang paling kuat. Kondisi tanpa injeksi menunjukkan nilai yang paling rendah karena pada wilayah downstream-nya, tidak lagi terbentuk aliran resirkulasi. Hal ini terjadi karena tidak adanya eksitasi eksternal berupa injeksi gas panas sebagai alat kontrol aktif. Pada semua kondisi percobaan yang menggunakan injeksi gas panas, cenderung mengacu pada nilai yang relatif hampir sama. Hal ini disebabkan karena pada titik - titik akhir pengukuran, intensitas partikel aliran sudah tidak terbentuk lagi. Dengan kata lain, pola aliran yang terbentuk sudah cenderung laminar.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Summary Mass Transfer

Dari hasil penelitian yang dilakukan dengan pendekatan komputasional melalui kajian CFD dan pendekatan eksperimental dengan pengukuran laju perpindahan massa konvektif dengan metode *limiting diffusion current* pada proses elektrokimia di bawah kontrol turbulensi aktif secara hidrodinamik dan akustik-mekanik pada aliran elektrolitnya, dapat disimpulkan hal-hal berikut ini:

1. Pada perpindahan massa konvektif dengan kontrol turbulensi secara hidrodinamik:

- ❖ Meningkatnya transport rate ion sehingga terjadi perbaikan laju perpindahan massa, namun menghasilkan deposisi granular
- ❖ Peningkatan Re mendukung peningkatan laju perpindahan massa maksimum.
- ❖ Sementara itu, peningkatan rasio kecepatan jet pengontrol terhadap kecepatan aliran utama menghambat laju perpindahan massa maksimum
- ❖ Pada rentang $1500 < Re < 4800$ dan $0.7 < Vr < 2.6$ relasi perpindahan massa yang dihasilkan $Sh=0.033Re^{0.5983}Sc^{0.33}$

2. Pada perpindahan massa konvektif dengan kontrol turbulensi secara akustik-mekanik

- ❖ Meningkatnya transport rate ion sehingga terjadi perbaikan laju perpindahan massa, namun menghasilkan deposisi yang agak kasar
- ❖ Pada Re yang lebih tinggi, pengaruh eksitasi akustik semakin lemah dan terjadi penurunan K_m max
- ❖ Terdapat bilangan Strouhal, St optimum yang memberikan nilai K_m max untuk setiap Re
- ❖ Pada rentang $550 < Re < 2150$ dan $10 < St < 150$ relasi perpindahan massa yang dihasilkan $Sh=17.678Re^{-0.2111}Sc^{0.33}$

Hasil-hasil di atas memberikan dasar yang cukup lengkap untuk pengembangan selanjutnya aplikasi turbulensi pada proses elektrokimia yang bisa dilengkapi dengan mekanisme umpan balik sehingga dapat diterapkan secara praktis di industri.

5.2 Summary Heat Transfer

1. Peningkatan rasio momentum spesifik (I) pada jarak injeksi $L_f=2H$ (slot jet) menyebabkan medan aliran kecepatan yang terjadi pada kanal tersebut menjadi menurun.
2. Pada jarak injeksi $L_f= 4H$ proses pencampuran antara saluran utama dan injeksi yang diberikan, terjadi kurang optimum hal ini disebabkan oleh letak jarak injeksi berada di daerah reattachment.
3. Turbulence intensity dapat dikurangi dengan menaikkan kecepatan injeksi yang diberikan pada kanal aliran tersebut.
4. Kenaikan rasio momentum injeksi memberikan dampak terhadap saluran utama (*free stream*), sehingga menyebabkan terjadinya *block efek* di daerah sekitar injeksi.
5. Pengaruh temperatur yang diberikan menyebabkan density dari fluida udara menjadi lebih renggang sehingga efek aliran yang timbul menyebabkan aliran resirkulasi terbelah menjadi beberapa bagian.

5.3 Kesimpulan Akhir

1. Pemberian injeksi yang dilakukan memberikan efek terhadap aliran utama (*free stream*) sehingga menjadikan aliran resirkulasi terbelah menjadi beberapa bagian di daerah sekitar injeksi dan step.
2. Dengan meningkatnya bilangan Reynold pada saluran utama (*free stream*) tidak terlalu memberikan efek yang berpengaruh terhadap injeksi aliran yang di berikan.
3. Proses pencampuran fluida saluran utama dengan injeksi yang di berikan lebih optimum pada jarak injeksi $L_f=2H$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Harinaldi, "Flow Structure and Mixing Behind a Backward Facing Step With The Existence of a Non-Reactive Gas Injection", 2000, Doctoral Dissertation, Japan : Keio University.
- [2] Narayanan, M.A.B., Khadgi, Y.N., Viswanath, P.R., *Similarities in Pressure Distribution in Separated Flow Behind Backward-Facing Steps*, **Aeronautical Quarterly**, Vol.25, pp 283-288, 1974.
- [3] Hasan, M.A.Z., The flow over a backward-facing step under controlled perturbation : laminar separation, **Journal Fluid Mechanics**, Vol 238, 1992, pp 73-96.
- [4] Harinaldi, Ueda, T., Mizomoto, M., *Laser Sheet Imaging of Recirculation Zone of Backward-Facing Step Flow with Gas Injection*, **Journal of Chemical Engineering of Japan**, Vol. 34, No.3, 2001, pp.351-359.
- [5] Yang, J.T., B.B. Tsai and G.L. Tsai, *Separated-Reattaching Flow over a Backstep with Uniform Normal Mass Bleed*, Trans. ASME, **J.Fluid Eng.**, Vol 116, 1994, pp 29-35.
- [6] Harinaldi, Erma, "Efek Geometri Injektor Jet Udara Panas Terhadap Struktur Thermal Medan Aliran Resirkulasi Pada Kanal Berkontur Tangga", *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin IV (SNTTM-2005) Udayana Bali, 21-22 Nopember 2005*.
- [7] M. Shafer Daniel., "Active and Passive Flow Control Over The Flight Deck of Small Naval Vessels" 27 April 2005.
- [8] Ben-Yakar Adela and K Hanson Ronald., "Cavity Flame-Holders for Ignition and Flame Stabilization in Scramjets: An Overview" **Journal of Propulsion and Power** Vol.17 No.4, July-August 2001.
- [9] Sundararaj K and Dhandapani S., "Numerical Simulation of Staged Transverse Injection of H₂ Fuel in a Ducted Supersonic Air Stream with SST k- ω Turbulence Model" **International Journal of Dynamics of Fluids of India** ISSN 0973-1784 Vol.2, No.2 (2006), pp. 245-262.
- [10] Takahashi Fumiaki, John Schmoll W, and A Strader Edward "Suppression of a Nonpremixed Flame Stabilized by a Backward-Facing Step" **Combustion and Flame** 122:105-116 (2000) Published by Elsevier Science Inc.
- [11] Tsai Go-Long, Lin Y.C, Ma W.J, Wang H.W and Yang J.T "Transitional flow patterns behind a backstep with porous-based fluid injection" **International Journal of Heat and Mass Transfer** 24 May 2008.
- [12] Johnson Michael Bernard "Aerodynamic Control and Mixing with Ramp Injection" 25 May 2005.

- [13] Alam M.R, Liu W and Haller G "Closed-loop Separation Control An Analytic Approach" 3 April 2006 American Institute of Physics.
- [14] Flohr P and Pitsch H "A Turbulent Flame Speed Closure Model for LES of Industrial Burner Flows" Proceedings of the summer program 2000.
- [15] Gabler W, Haibel M, Mayinger F "Dynamic Structures and Mixing Processes In Sub-And Supersonic Hydrogen Air Flames In Combustion Chambers With Cascades Of Rear Ward Facing Step.1994.
- [16] Chakraborty D, Roychowdhury A.P, Ashok V, and Kumar P " Numerical Investigation of Staged Transverse Sonic Injection In Mach 2 Stream in Confined Environment" The Aeronautical Journal December 2003.
- [17] Manna P and Chakraborty D " Numerical Simulation of Transverse H₂ Combustion in Supersonic Airstream in a Constant Area Duct" Vol 86, November 2005.
- [18] Grosshandler William and Donnelly Michelle "Suppressant Performance Evaluation In A Baffle Stabilized Pool Fire" Proceedings Hotwc April 27-29 1999.
- [19] Chakravarthy SR, Sivakumar R and Shreenivasan OJ " Vortex Acoustic Lock On In Bluff Body and Backward Facing Step Combustors" Vol.32, Parts 1 & 2, February-April 2007, pp. 145-154 India.
- [20] Goldschmit Marcela B and Principe R Javier " Applications of A (k-ε) Model For The Analysis Of SteelMaking Processes" Computational Mechanics – Barcelona, Spain 1998.
- [21] Kraus Tobias, Verpoorte Elisabeth, and Koster Sander "Characterization of a Microfluidic Dispensing System for Localized Stimulation of Cellular Networks" Advance Article on the web 4th January 2006.
- [22] Snarheim Dagfinn " Impact of Microjet Actuation on Stability of a Backward Facing Step Combustor" Proceedings of 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit (2007).
- [23] 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 November by ASME 2007.**
- [24] Schuchkin V, Osipov M, Shyy W and Thakur S " Mixing and Film Cooling in Supersonic Duct Flows " **International Journal of Heat and Mass Transfer 45 (2002) 4451-4461.**
- [25] Derksen J.J, Sundaresan S, and van den Akker H.E.A " Simulation of Mass Loading Effects in Gas Solid Cyclone Separators" Journal Elsevier 10 March 2006.

- [26] Hewson J.C, Tieszen S.R, Sundberg W.D “ CFD Modelling Of Fire Suppression And ITS Role In Optimizing Suppressant Distribution” Department of Mechanical and Aerospace Engineering University at Buffalo.
- [27] Berne P “ Simulation of A Radiotracer Experiment By Flow And Detection Chain Modelling : A First Step Towards Better Interpretation” International Atomic Energy Agency (IAEA) November 2004.
- [28] Kauzlaric D, Greiner A, Korvink J.G “ Modelling Micro-Rheological Effects in Micro Injection Moulding With Dissipative Particle Dynamics” ISBN 0-9728422-8-4 Vol.2, 2004.
- [29] Zong Nan, Yang Vigor “ Near-fiel Flow and Flame Dynamics Of LOX/methane Shear-Coaxial Injector Under Supercritical Conditions” ELSEVIER Proceedings of the Combustion Institute 31 (2007) 2309-2317.
- [30] Wachsman A, A.M Park, Annaswamy and Ghoniem A.F “ Sensors and Actuators for Combustion Control” Proceeding of the 2004 American Control Conference Boston, Massachusetts June 30-July 2, 2004.
- [31] Munson Bruce R, Young Donald F, Okiishi Theodore H “ Fundamentals of Fluid Mechanics”, **John Wiley & Son Inc.** Fourth Edition, Canada 1998.
- [32] Fluent 6.2 User’s Guide January 2005.
- [33] Eaton J.K. and Johnston J.P, AIAA Journal 19 (1981) pp 1093-1099.
- [34] Armaly B.F, Durst F, Pereira J.C.F and Schonung B “ *Journal of Fluid Mechanics*, 127(1983), pp.473-496.
- [35] H.K. Versteeg and W.Malalasekera, “*An introduction to computational fluid dynamics The finite volume method*”1995.