

## PENGARUH UKURAN ZONA RESIRKULASI TERHADAP SIFAT TRANSPORT *SEPARATED - REATTACHED FLOW* DENGAN EKSITASI EKSTERNAL

<sup>1</sup>Harinaldi, <sup>2</sup>Damora Rhakasywi

<sup>1,2</sup> Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia

<sup>1</sup>Email : harinald@eng.ui.ac.id

<sup>2</sup>Email : damora\_plg@yahoo.co.id

### ABSTRAK

*Geometri kanal aliran yang memiliki pembesaran saluran mendadak di bagian hilir dapat menghasilkan aliran yang terpisah dan bertaut kembali (separated-reattached flow). Model geometri seperti ini salah satunya berbentuk backward facing-step yang merupakan bentuk yang sederhana dan banyak digunakan untuk melakukan simulasi berbagai macam fenomena pada peralatan keteknikan seperti reaktor kimia, sistem kendali aerodinamik kendaraan, sistem pembakaran pada dump combustor dan lain-lain. Pada aplikasinya, dinamika aliran di zona resirkulasi yang terbentuk sangat mempengaruhi kinerja operasional peralatan-peralatan tersebut. Pada penelitian ini dilakukan upaya memodifikasi ukuran zona aliran resirkulasi dengan merubah ketinggian step serta memberikan eksitasi eksternal berupa injeksi slot jet dari fluida panas dengan variasi temperatur 100<sup>0</sup> C dan 300<sup>0</sup> C. Kajian komprehensif dilakukan dengan pendekatan komputasional dan eksperimental. Model k- $\epsilon$  digunakan dalam kajian komputasi sementara medan aliran resirkulasi divisualisasi dengan menggunakan high speed camera yang kemudian diolah menggunakan image processing software sehingga dapat dianalisis lebih lanjut untuk mendapatkan informasi mengenai berbagai fitur struktur aliran yang termodifikasi akibat pemberian eksitasi jet pada medan aliran resirkulasi tersebut. Hasil dari eksperimen dan komputasi kemudian digunakan untuk menjelaskan efek dari pengaruh ketinggian step dengan jarak injeksi yang diberikan terhadap bentuk dari zona aliran resirkulasi pada model geometri backward facing step.*

**Kata kunci :** Backward facing step, zona resirkulasi, eksitasi slot jet

### 1. Pendahuluan

Pemanfaatan aliran resirkulasi yang ditimbulkan oleh kanal saluran dengan pembesaran mendadak di bagian hilir dalam dunia engineering banyak dilakukan untuk memberikan efek pencampuran antara dua fluida. Prinsip ini banyak diterapkan dalam beberapa aplikasi keteknikan seperti pencampuran bahan bakar dengan udara pada ruang bakar (*combustion chamber*), pencampuran zat kimia untuk mempercepat proses reaksi kimia, peleburan logam cair dengan menambahkan zat aditif untuk mempercepat pembekuan logam, pelapisan pelat logam datar untuk mempercepat proses mass transfer yang di timbulkan oleh aliran resirkulasi, dan lain-lain.

Pada kebanyakan aplikasi tersebut medan aliran resirkulasi yang terbentuk memiliki karakteristik aliran berkecepatan rendah. Hal inilah yang dipergunakan untuk memberikan injeksi di bawah zona aliran resirkulasi dengan harapan terjadinya *mixing* antara dua fluida. Kondisi ukuran zona aliran resirkulasi

dipengaruhi oleh beberapa parameter seperti besarnya bilangan Reynolds, perbandingan rasio ekspansi antara saluran masuk dengan saluran keluar, tingkat viskositas dari fluida. Pemberian injeksi yang dilakukan di bawah zona aliran resirkulasi dapat menghasilkan pencampuran yang cukup homogen. Hal ini dipengaruhi oleh pusaran-pusaran kecil yang terbentuk di area zona resirkulasi.

Beberapa penelitian terdahulu telah dilakukan untuk memodifikasi zona resirkulasi dengan tujuan yang tergantung aplikasinya antara lain yang terkait proses percampuran fluida, kontrol turbulensi, dan lain-lainnya. Penelitian-penelitian yang dilakukan baik secara komputasional maupun eksperimental tersebut telah memberikan beberapa hasil yang menunjukkan karakteristik dari medan aliran resirkulasi yang termodifikasi yang terjadi di bagian belakang step karena adanya eksitasi eksternal. Penelitian yang dilakukan dengan menggunakan injeksi udara memakai injektor berbentuk slot telah dilakukan guna mengetahui fenomena pencampuran yang terjadi antara saluran utama dan fluida yang diinjeksikan [1,2]. Efek geometri



dari injektor berbentuk round jet dengan injeksi udara panas terhadap struktur termal medan aliran resirkulasi pada kanal berkontur tangga yang dilakukan untuk mengetahui proses pencampuran udara panas injeksi dengan saluran utama (*free stream*) [3]. Penelitian yang dilakukan dengan menggunakan kajian komputasi CFD untuk mengetahui medan aliran yang terjadi akibat pengaruh eksitasi eksternal berupa injeksi gas panas [4] serta penelitian yang dilakukan dengan kegiatan eksperimental untuk memvalidasi model-model persamaan turbulensi  $k$ -epsilon dan RNG [5]. Pada aplikasi lainnya, kontrol aktif aliran resirkulasi pada permukaan sayap pesawat menggunakan injeksi berbentuk bulat dengan tujuan untuk melihat profil aliran resirkulasi di bagian belakang step [6]. Kajian komputasi dengan menggunakan injeksi bahan bakar hydrogen pada kecepatan aliran udara supersonic dengan menggunakan model turbulen SST  $k - \omega$  untuk memprediksi pencampuran injeksi dengan saluran utama (*free stream*) [7]. Stabilisasi nyala api dengan injeksi bahan bakar non premixe pada aliran resirkulasi dengan model *backward facing step* [8]. Pola aliran yang terjadi pada aliran resirkulasi dengan memberikan injeksi yang dilakukan dengan mengambil gambar medan aliran menggunakan kamera kecepatan tinggi [9]. Kontrol aerodinamis kendaraan pada aliran resirkulasi dengan memberikan injeksi jet untuk mengurangi pusaran aliran yang terjadi [10].

Berdasarkan dari pertimbangan tersebut, maka penelitian yang memanfaatkan aliran resirkulasi cukup memainkan peranan penting dalam berbagai bidang keteknikan. Dalam penelitian ini kajian difokuskan untuk mempelajari lebih dalam pengaruh dari ukuran zona resirkulasi terhadap sifat transport yang terjadi pada *separated-reattached flow* dengan memodifikasi pola aliran menggunakan eksitasi eksternal. Hal ini dapat dilakukan dengan mensimulasikan kondisi-kondisi tersebut dengan model geometri back ward facing step.

## 2. Metodologi Penelitian

Penelitian karakteristik sifat transport dan struktur aliran resirkulasi di bawah pengaruh eksitasi eksternal injeksi gas panas dengan model geometri *backward facing step* ini dilakukan dengan kajian komputasi menggunakan (*Computational Fluid Dynamics*) CFD dan eksperimental menggunakan metode visualisasi kecepatan tinggi berbasis lembar cahaya (*light sheet based high speed flow visualization*).

## 2.1 Kajian Komputasi

### 2.1 Model Turbulensi

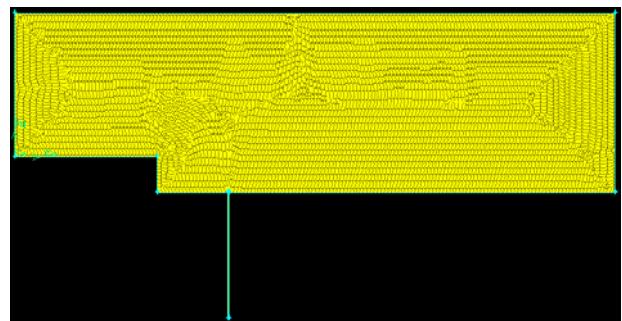
Kajian komputasi dilakukan dengan menggunakan model turbulensi  $k-\epsilon$  yang ditunjukkan pada Pers. (1) dan (2), sehingga memungkinkan kecepatan

turbulen (*turbulent velocity*) dan skala panjang (*length scales*) ditentukan secara independen. Model ini digunakan karena kestabilan dan ekonomis dari sisi komputasi, serta akurasi yang memadai untuk berbagai jenis aliran turbulen. Berikut ini beberapa konstanta model  $k$ -epsilon yang digunakan yang divalidasi dari hasil-hasil kajian sebelumnya:  $C_{1\epsilon}=2$ ,  $C_{2\epsilon}=2.5$ ,  $C_\mu=0.00001$ ,  $\sigma k=1.2$ ,  $\sigma \epsilon=1.5$ .

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

### 2.1.2 Jenis Meshing

Meshing yang digunakan dalam mendiskritisasikan model menggunakan jenis meshing *tri pave*, pemilihan jenis ini dilakukan dengan tujuan untuk mendapatkan hasil yang akurat dengan membagi-bagi domain komputasi dengan bentuk segitiga secara seragam (*uniform*) dari saluran utama sampai menuju kesaluran keluar. Meshing yang dipergunakan pada model ditunjukkan oleh Gambar 1

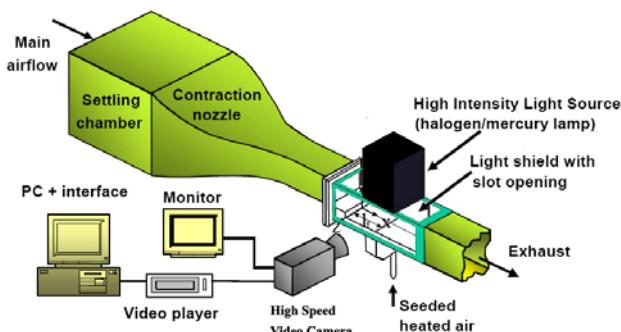


Gambar 1. Jenis meshing tri pave

## 2.2 Set-up Eksperimen

## 2.2 Set up Eksperimen

Eksperimen visualisasi kecepatan tinggi berbasis lembar cahaya dilakukan untuk mendapatkan informasi mengenai berbagai fitur struktur aliran yang termodifikasi akibat eksitasi jet pada medan aliran resirkulasi. Gambar 2 dibawah menunjukkan susunan peralatan yang dipergunakan untuk mendapatkan pencitraan aliran resirkulasi dengan model *backward facing step*.



Gambar 2. Skema Set up visualisasi berkecepatan tinggi berbasis lembar cahaya

### 2.2.2 Sistem Kamera Kecepatan Tinggi

Untuk merekam dinamika struktur aliran pada seksi uji kanal aliran dengan geometri *back ward facing step* digunakan sistem kamera kecepatan tinggi (*high speed camera system*). Parameter visualisasi yang dipergunakan ditunjukkan secara rinci dalam Tabel 1.

Tabel 1. Parameter visualisasi kecepatan tinggi

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

### 2.2.3 Lembar Cahaya

Lembar cahaya yang digunakan untuk memendarkan partikel-partikel yang dihasilkan oleh alat penghasil partikel pendar (*Nebulizer*) secara rinci ditunjukkan pada Tabel 2 di bawah ini

Tabel 2. Lembar Cahaya

<b>Sumber Cahaya</b>	Halogen Lamp (1000 Watt) or Mercury Lamp (400 Watt)
<b>Tebal lembar cahaya</b>	Ketebalan, $t = 2$ mm
<b>Intensitas lembar cahaya</b>	Bervariasi kurang dari 3% dari nilai puncak di bagian pusat

### 2.2.4 Sistem Penghasil Partikel Pendar

Partikel pendar dari minyak zaitun (*olive oil*) dihasilkan oleh sistem nebulizer yang ditunjukkan pada Gambar 3 dan spesifikasi rincinya ditunjukkan pada Tabel 3 di bawah ini.



Gambar 3. Sistem Nebulizer

Tabel 3. Spesifikasi nebulizer penghasil partikel pendar

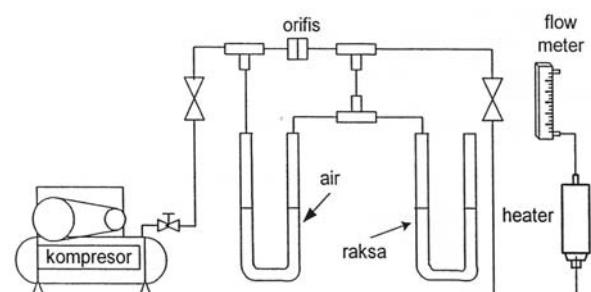
<b>Model</b>	NE-C28
<b>Type</b>	Non-heating compressor nebulizer
<b>Electrical</b>	230V, 50Hz
<b>Power Consumption</b>	138 VA
<b>Particle Size</b>	5 $\mu$ m
<b>Cup Capacity</b>	7 ml (cc) max
<b>Operating Temperature / Humidity</b>	+10°C to +40°C, 30% to 85% RH
<b>Storage Temperature / Humidity</b>	-20°C to + 60°C, 10% to 95% RH
<b>Weight</b>	Approx. 1.9kg (compressor only)
<b>Dimensions</b>	Approx. 170 (W) x 103 (H) x 182 (D) mm

### 2.3 Peralatan Pengukuran

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

#### 2.3.1 Sistem Manometer Kapiler

Alat ini berguna untuk mengukur debit udara yang akan dialirkan menuju *heater*, piranti ini telah dikalibrasi dengan sebuah *flow meter* yang berkapasitas 30 scfh (*standard cubic feet per hour*). Gambar 4 di bawah menjelaskan skema sistem manometer kapiler yang digunakan.



Gambar 4 Sistem Manometer Kapiler

#### 2.3.2 Termometer Digital

Digital Thermometer ini digunakan untuk mengukur temperatur yang terjadi di lubang injeksi, dengan ketelitian pengukuran 0.1°C yang terhubung dengan termokopel tipe k.

2.4 Kondisi Eksperimen  
Sejumlah parameter di variasikan guna



mendapatkan variasi struktur aliran yang terjadi di resirkulasi, yang terdiri tinggi step,  $H = 20 - 40$  mm, letak injeksi,  $L_f = 40 - 80$  mm, temperatur injeksi,  $T = 100$  dan  $300^\circ\text{C}$ , pada rasio spesifik momentum injeksi  $I = 0.1$ . Untuk mendapatkan nilai spesifik momentum injeksi yang diinginkan, sebelum melakukan pengambilan data terlebih dahulu dilakukan pengaturan kecepatan blower, serta temperatur injeksi untuk mendapatkan perbandingan rasio spesifik momentum injeksi menurut persamaan berikut :

$$I = \frac{\rho_i v_i^2}{\rho_0 v_0^2} \quad (3)$$

dimana :

$I$  = Rasio Spesifik Momentum  
 $V_i$  = Kecepatan Injeksi (m/s)  
 $V_0$  = Kecepatan Aliran Udara Utama (m/s)  
 $\rho_i$  = Density Fluida Injeksi ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $\rho_0$  = Density Fluida Aliran Utama ( $\text{kg/m}^3$ )

Rincian kombinasi nilai parameter yang dipergunakan pada penelitian ini di tunjukkan pada Tabel 4 dan 5 untuk masing-masing kondisi percobaan.

Tabel 4. 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	0,1	1,2 m/s dan $30^\circ\text{C}$	0,42 m/s dan $100^\circ\text{C}$
4H		1,8 m/s dan $30^\circ\text{C}$	0,78 m/s dan $300^\circ\text{C}$

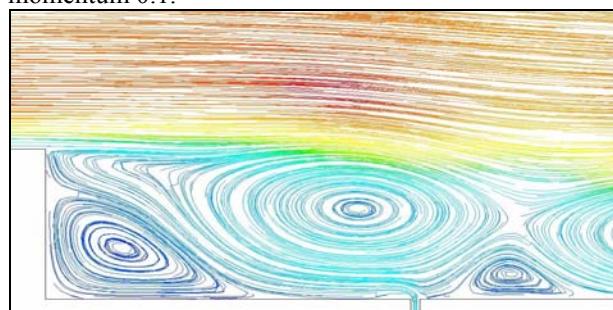
Tabel 5. Density Fluida Udara

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

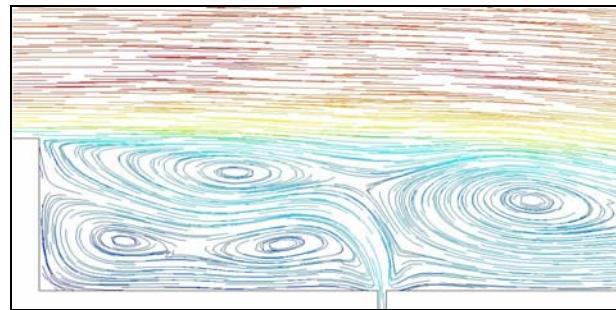
### 3. Hasil dan Pembahasan

#### 3.1 Pola Aliran Resirkulasi Berdasarkan hasil simulasi dari CFD (Computational Fluid Dynamics)

Gambar 5 (a-b) menunjukkan pola aliran yang terjadi dengan ketinggian step 20 mm di bawah pengaruh eksitasi eksternal dengan jarak injeksi 40 mm, temperatur injeksi  $100^\circ\text{C}$  dan  $300^\circ\text{C}$  pada rasio spesifik momentum 0.1.



(a)  $L_f = 2H$ ;  $T_i = 100^\circ\text{C}$ ;  $I = 0.1$

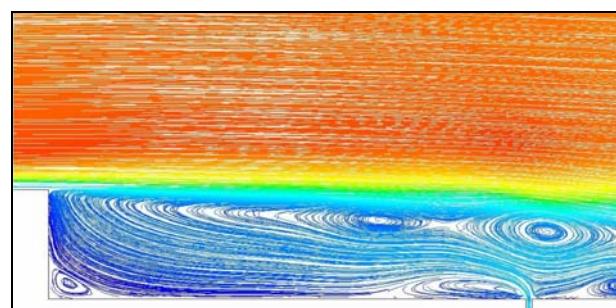


(b)  $L_f = 2H$ ;  $T_i = 300^\circ\text{C}$ ;  $I = 0.1$

Gambar 5 Pola aliran Resirkulasi dengan injeksi udara panas temperatur  $100^\circ\text{C}$  dan  $300^\circ\text{C}$  dengan ketinggian step 20 mm dan injeksi pada jarak 40 mm

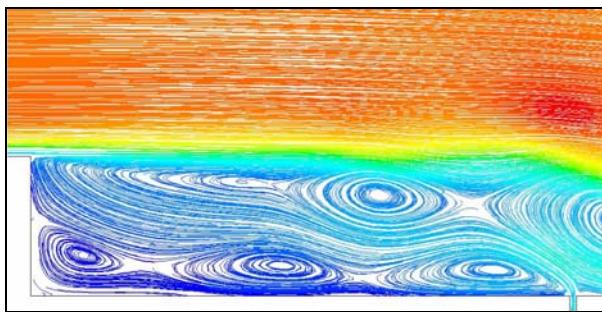
Pada gambar diatas terlihat bahwa zona aliran resirkulasi terbelah menjadi beberapa bagian akibat pengaruh dari injeksi udara panas yang diberikan. Hal lain yang juga secara jelas ditunjukkan pada gambar adalah injeksi aliran dengan jarak 40 mm memberikan pengaruh yang khas terhadap zona aliran resirkulasi yang terjadi di bagian belakang kontur tangga (*step*). Seiring dengan peningkatan temperatur injeksi yang diberikan pola pencampuran aliran yang terjadi di bagian belakang tangga (*step*) terjadi lebih intensif yang terlihat dengan semakin banyaknya struktur pusaran yang terbentuk. Hal ini mungkin juga di pengaruh oleh besarnya kecepatan injeksi sehingga menyebabkan aliran saluran utama tertahan lebih kuat di daerah sekitar injeksi.

Sementara itu gambar 6 (a-b) menampilkan karakteristik zona aliran resirkulasi dengan ketinggian step 20 mm, di bawah pengaruh eksitasi eksternal dengan jarak injeksi 80 mm, temperatur injeksi  $100^\circ\text{C}$  dan  $300^\circ\text{C}$  pada rasio spesifik momentum 0.1.



(a)  $L_f = 4H$ ;  $T_i = 100^\circ\text{C}$ ;  $I = 0.1$



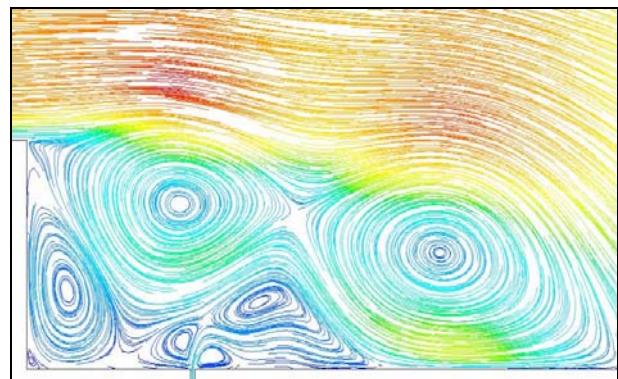


(b)  $L_f = 4H$ ;  $T_i = 300^\circ C$ ;  $I = 0.1$

Gambar 6 Pola aliran Resirkulasi dengan injeksi udara panas temperatur  $100^\circ C$  dan  $300^\circ C$  dengan ketinggian step 20 mm dan injeksi pada jarak 80 mm

Seperti pada kasus injeksi dengan jarak 40 mm, dengan injeksi pada jarak 80 mm yang lebih mendekati daerah *reattachment* terlihat bahwa zona aliran resirkulasi juga terbelah menjadi beberapa bagian. Namun pada temperatur injeksi yang lebih rendah, intensitas pembentukan struktur pusaran tampak lebih rendah yang ditandai dengan skala panjang pusaran yang lebih kecil. Seiring dengan kenaikan temperatur injeksi udara panas yang di berikan terhadap saluran utama (*free stream*) pola pencampuran aliran yang terjadi di bagian belakang tangga (*step*) juga terjadi lebih intensif.

Kemudian Gambar 7 (a-b) menampilkan karakteristik zona aliran resirkulasi dengan ketinggian step 40 mm di bawah pengaruh eksitasi eksternal dengan jarak injeksi 40 mm, temperatur  $100^\circ C$  dan  $300^\circ C$  pada rasio spesifik momentum 0.1. Jika dibandingkan dengan Gambar 5(a-b), dari Gambar 7(a-b) terindikasikan bahwa dengan ketinggian step yang lebih besar (40 mm) pola aliran pada zona resirkulasi berubah cukup signifikan dimana struktur pusaran yang terbentuk jauh lebih kompleks dibandingkan pada saat ketinggian step yang lebih kecil (20 mm) untuk masing-masing parameter injeksi yang sama. Selanjutnya terlihat pula respon yang berlawanan dengan kondisi pada kasus step yang lebih kecil, ketika terjadi kenaikan nilai temperatur injeksi pola aliran yang terjadi menjadi lebih sederhana ditandai dengan berkurangnya jumlah struktur pusaran dengan skala panjang yang lebih besar pada temperatur injeksi yang lebih tinggi.



(a)  $L_f = 2H$ ;  $T_i = 100^\circ C$ ;  $I = 0.1$

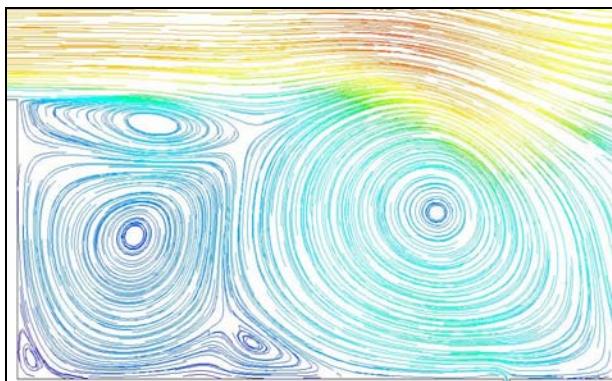


(b)  $L_f = 2H$ ;  $T_i = 300^\circ C$ ;  $I = 0.1$

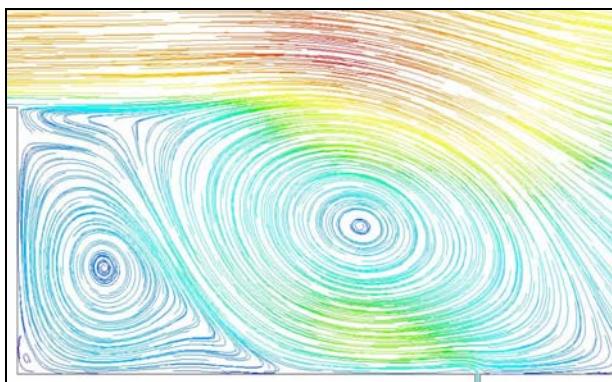
Gambar 7 Pola aliran Resirkulasi dengan injeksi udara panas temperatur  $100^\circ C$  dan  $300^\circ C$  dengan ketinggian step 40 mm dan injeksi pada jarak 40 mm

Selanjutnya Gambar 8 (a-b) menunjukkan karakteristik zona aliran resirkulasi dengan ketinggian step 40 mm di bawah pengaruh eksitasi eksternal dengan jarak injeksi 80 mm, temperatur  $100^\circ C$  dan  $300^\circ C$  pada rasio spesifik momentum 0.1. Pada gambar terlihat karakteristik pola aliran yang terbentuk dengan meletakkan injeksi mendekati zona *reattachment* yang menyebabkan struktur pusaran tidak sekompelks pada saat injeksi di zona resirkulasi. Seperti pada kasus sebelumnya, zona resirkulasi banyak terbentuk di daerah upstream yang menjadikan pencampuran antara saluran utama dan injeksi yang diberikan menjadi lebih baik. Demikian pula respon dari kenaikan temperatur injeksi menyebabkan pusaran yang terjadi menjadi lebih sedikit dengan ukuran skala panjang yang lebih besar.





(a)  $L_f = 4H$ ;  $T_i = 100$  °C;  $I = 0.1$

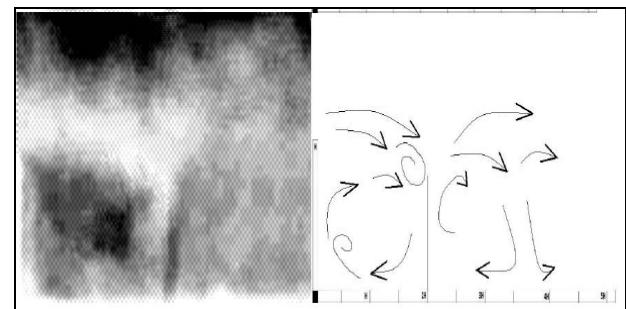


(b)  $L_f = 4H$ ;  $T_i = 300$  °C;  $I = 0.1$

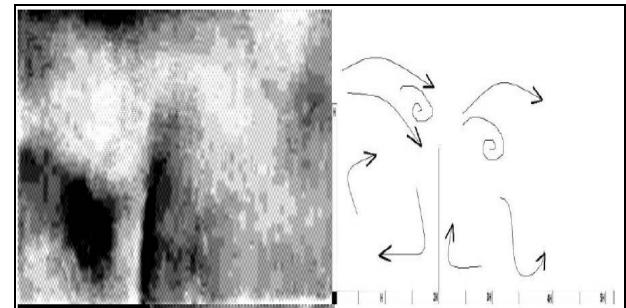
Gambar 8 Pola aliran Resirkulasi dengan injeksi udara panas temperatur  $100^0$  C dan  $300^0$ C dengan ketinggian step 40 mm dan injeksi pada jarak 80 mm

### 3.2 Visualisasi Aliran Resirkulasi Menggunakan Metode Light Sheet

Gambar 9 (a-b) menampilkan hasil eksperimen visualisasi medan aliran yang terjadi dibawah pengaruh injeksi udara panas, dengan ketinggian tangga (*step*) 20 mm, jarak injeksi 40 mm dan temperatur  $100^0$ C dan  $300^0$ C pada rasio spesifik momentum 0.1. Pada gambar terlihat bahwa kenaikan temperatur injeksi udara panas ke medan aliran resirkulasi yang terbentuk memberikan block efek yang lebih tinggi ke arah vertikal yang menyebabkan laluan fluida saluran utama terhalang lebih kuat sehingga membentuk pusaran-pusaran kecil yang terbentuk di daerah *upstream*.



(a)  $L_f = 2H$   $T_i = 100$  Celcius  $I = 0.1$



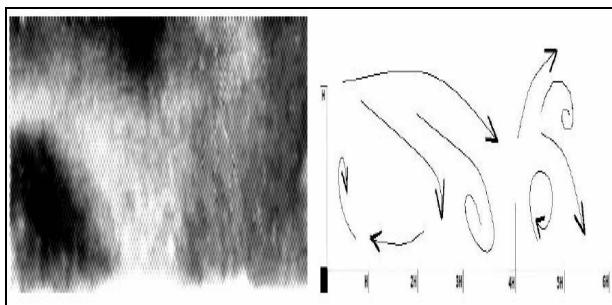
(b)  $L_f = 2H$   $T_i = 300$  Celcius  $I = 0.1$

Gambar 9 Visualisasi Aliran Resirkulasi dengan injeksi udara panas temperatur  $100^0$  C dan  $300^0$ C dengan ketinggian step 20 mm dan injeksi pada jarak 40 mm

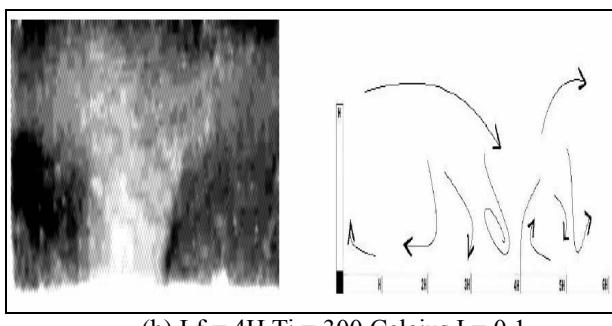
Sementara itu Gambar 10 (a-b) menampilkan hasil eksperimen visualisasi medan aliran yang terjadi dibawah pengaruh injeksi udara panas, dengan ketinggian tangga (*step*) 20 mm, jarak injeksi 80 mm dan temperatur  $100^0$ C dan  $300^0$ C pada rasio spesifik momentum 0.1. Pada gambar tersebut terlihat bahwa medan aliran yang terbentuk mengalami perubahan ketika jarak injeksi dirubah menjauhi zona aliran resirkulasi dan mendekati zona *reattachment*. Hasil visualisasi ini mengindikasikan bahwa pusaran-pusaran yang terbentuk menjadi lebih panjang dengan bentuk hampir menyerupai elips dengan pemberian kenaikan temperatur injeksi.

Kemudian gambar 11 (a-b) menampilkan hasil eksperimen visualisasi medan aliran yang terjadi dibawah pengaruh injeksi udara panas, dengan ketinggian tangga (*step*) 40 mm, jarak injeksi 40 mm dan temperatur  $100^0$ C dan  $300^0$ C pada rasio spesifik momentum 0.1. Gambar mengindikasikan tingkat turbulensi yang lebih besar dibandingkan dengan kondisi ketinggian step 20 mm yang ditandai dari besarnya zona aliran resirkulasi yang terbentuk. Kenaikan temperatur injeksi memberikan efek pusaran yang lebih dominan menjadi lebih banyak di bagian upstream.



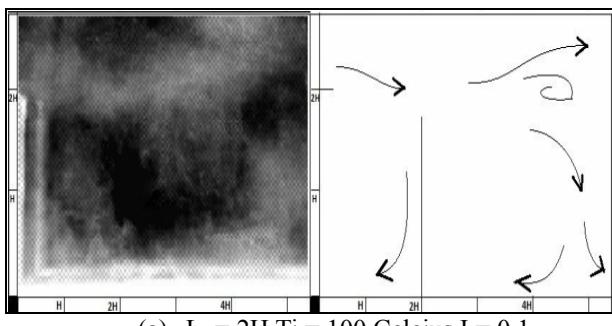


(a)  $L_f = 4H$   $T_i = 100$  Celcius  $I = 0.1$

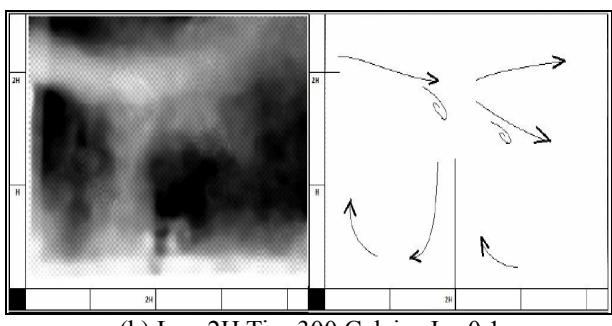


(b)  $L_f = 4H$   $T_i = 300$  Celcius  $I = 0.1$

Gambar 10 Visualisasi Aliran Resirkulasi dengan injeksi udara panas temperatur  $100^{\circ}\text{C}$  dan  $300^{\circ}\text{C}$  dengan ketinggian step 20 mm dan injeksi pada jarak 80 mm



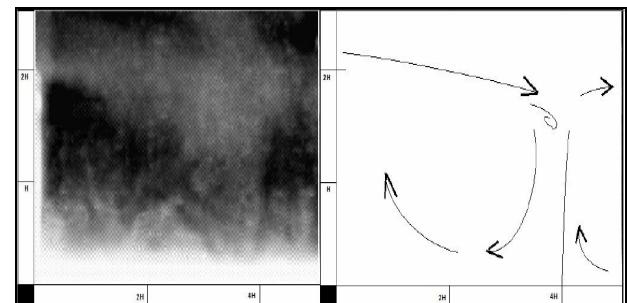
(a)  $L_f = 2H$   $T_i = 100$  Celcius  $I = 0.1$



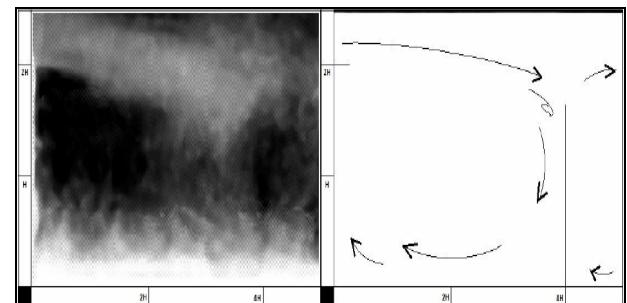
(b)  $L_f = 2H$   $T_i = 300$  Celcius  $I = 0.1$

Gambar 11 Visualisasi Aliran Resirkulasi dengan injeksi udara panas temperatur  $100^{\circ}\text{C}$  dan  $300^{\circ}\text{C}$  dengan ketinggian step 40 mm dan injeksi pada jarak 40 mm

Selanjutnya gambar 12 (a-b) menampilkan hasil eksperimen visualisasi medan aliran yang terjadi dibawah pengaruh injeksi udara panas, dengan ketinggian tangga (step) 40 mm, jarak injeksi 40 mm dan temperatur  $100^{\circ}\text{C}$  dan  $300^{\circ}\text{C}$  pada rasio spesifik momentum 0.1.



(a)  $L_f = 4H$   $T_i = 100$  Celcius  $I = 0.1$



(b)  $L_f = 4H$   $T_i = 300$  Celcius  $I = 0.1$

Gambar 12 Visualisasi Aliran Resirkulasi dengan injeksi udara panas temperatur  $100^{\circ}\text{C}$  dan  $300^{\circ}\text{C}$  dengan ketinggian step 40 mm dan injeksi pada jarak 80 mm

Dari gambar terlihat dengan menjauhnya jarak injeksi membuat zona resirkulasi yang terbentuk menjadi lebih panjang yang menyerupai elips disertai dengan kecepatan aliran yang berkurang dibandingkan dengan letak jarak injeksi 40 mm. Kenaikan temperatur injeksi berdampak terhadap pola zona resirkulasi menjadi didominasi oleh pusaran dengan skala panjang yang lebih besar di bagian daerah dekat injeksi.

### Kesimpulan

1. Perubahan ukuran zona resirkulasi akibat perubahan ketinggian tangga (step) menyebabkan tingkat turbulensi aliran semakin membesar
2. Injeksi jet panas ke zona resirkulasi mempengaruhi pola aliran yang terjadi, sehingga memberikan efek pembentukan struktur pusaran aliran yang lebih banyak didaerah sekitar injeksi.
3. Penempatan posisi injeksi di *reattachment region* menyebabkan trend yang berlawanan pada ukuran



zona resirkulasi akibat ketinggian step yang berbeda terhadap sifat transport aliran turbulen (*turbulent transport properties*) yang ditunjukkan dari jumlah dan skala panjang struktur pusaran yang terbentuk.

### Penghargaan

Penelitian ini dibiayai oleh program DRPM UI dengan no kontrak S2/2009/I/3435

### Daftar Pustaka

- [1]. 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.
- [2]. 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.
- [3]. 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.
- [4]. Harinaldi., Damora Rhakasywi., " Kajian Komputasi Medan Aliran Resirkulasi Di Bawah Pengaruh Eksitasi Eksternal Berupa Injeksi Jet", Prosiding Seminar Nasional Teknologi Industri (SNTI-2010) Jakarta 24 Maret 2010.
- [5]. Harinaldi., Damora Rhakasywi., " Experimental and Computational Study on Thermal Structure of A Separated Reattachement Flow Under Heated Gas Injection", International Meeting on Advances in Thermo-Fluids (IMAT 2009) Taman Safari 16-17 November 2009.
- [6]. M. Shafer Daniel., "Active and Passive Flow Control Over The Flight Deck of Small Naval Vessels" Thesis 27 April 2005.
- [7]. Sundararaj K and Dhandapani S., "Numerical Simulation of Staged Transverse Injection of H<sub>2</sub> Fuel in a Ducted Supersonic Air Stream with SST  $k - \omega$  Turbulence Model" *International Journal of Dynamics of Fluids of India* ISSN 0973-1784 Vol.2, No.2 (2006), pp. 245-262.
- [8]. 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.
- [9]. 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.

[10].Johnson Michael Bernard "Aerodynamic Control and Mixing With Ramp Injection" Thesis 25 May 2005.

