

**PENGARUH SUDUT SWIRL VANES TERHADAP VISUALISASI  
DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI**

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Ditujukan untuk persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**



**ANNISA RAKHMA RAMADHANI**

**NIM. 125060207111014**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**MALANG**

**2016**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGARUH SUDUT SWIRL VANES TERHADAP VISUALISASI  
DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI**

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**ANNISA RAKHMA RAMADHANI**  
**NIM. 125060207111014**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
Pada tanggal 16 Agustus 2016

Dosen Pembimbing I

Dr.Eng., Widya Wijayanti, ST.,MT.,  
NIP. 19750802 199903 2 002

Dosen Pembimbing II

Purnami, ST.,MT.,  
NIP. 19770707200812 1 005

Mengetahui

Ketua Jurusan/Ketua Program Studi

Dr.Eng., Widya Wijayanti, ST.,MT.,  
NIP. 19750802 199903 2 002

## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

Saya menyatakan dengan sebenar – benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi/Tesis/Disertasi ini adalah asli dari pemikiran saya. Tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi/Tesis/Disertasi ini dapat dibuktikan terdapat unsur – unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi/Tesis/ Disertasi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang – undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 14 Juli 2016

Penulis,

Annisa Rakhma Ramadhani

125060207111014



**JUDUL SKRIPSI:**

Pengaruh Sudut *Swirl Vane* terhadap Visualisasi dan Distribusi Temperatur Api Difusi

Nama Mahasiswa : Annisa Rakhma Ramadhani

NIM : 125060207111014

Program Studi : Teknik Mesin

Minat : Konversi Energi

**KOMISI PEMBIMBING**

Pembimbing I : Dr. Eng. Widya Wijayanti ST., MT.

Pembimbing II : Purnami ST., MT.

**TIM DOSEN PENGUJI**

Dosen Penguji I : Dr. Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST.

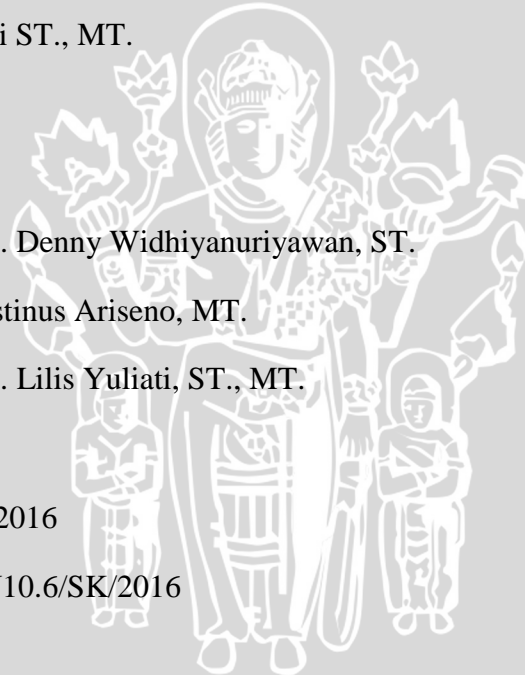
Dosen Penguji II : Ir. Agustinus Ariseno, MT.

Dosen Penguji III : Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT.

Tanggal Ujian : 26 Juli 2016

SK Penguji : 889/UN10.6/SK/2016

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

*Teriring Ucapan Terimakasih Kepada:*

*Ayahanda dan Ibunda Tercinta*







## KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji Syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT. karena hanya dengan limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **“Pengaruh Sudut *Swirl Vanes* terhadap Visualisasi dan Distribusi Temperatur Api Difusi”**.

Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat bagi mahasiswa jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik. Penulis juga tidak lupa mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua penulis, yaitu Drs.Eddy Purnomo B.Sc, M.si dan Dra. Emi Nurlaili yang tak henti-hentinya memberikan segala pengorbanan baik do'a, semangat, nasihat maupun material yang telah diberikan kepada penulis hingga sampai saat ini. Juga beserta saudara-saudara penulis, yaitu 'Ipun dan Jack' Ilham Dzulfian Annas dan Akbar Muzakki Rahmat yang selalu memberikan doa serta menjadi motivasi bagi penulis karena telah menghibur disaat penat.
2. Dr. Eng. Nurkholis Hamidi ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin dan Bapak Purnami ST., MT. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin yang tekah memberikan motivasi.
3. Dr. Eng. Widya Wijayanti ST., MT. selaku dosen pembimbing I skripsi atas semua ilmu dan saran yang telah diberikan selama penyusunan skripsi.
4. Purnami ST., MT. selaku dosen pembimbing II skripsi atas semua ilmu dan saran yang telah diberikan selama penyusunan skripsi.
5. Dr. Eng. Denny Widhiyanuriyawan, Ir. Agustinus Ariseno, MT., dan Dr. Eng. Lilis Yuliati ST., MT. , selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan masukan dalam penyusunan skripsi.
6. Seluruh Dosen pengajar dan Staf administrasi Jurusan Teknik Mesin.
7. Fajar Wasis Satrio Utomo, Rayvandi Ardiansyah dan Radissa Dzaky Issafira yang telah bersama sama menyelesaikan skripsi ini, serta memberikan nuansa ramai dan meriah saat penelitian berlangsung.
8. Seluruh Asisten Mesin Fluida yang telah membantu, memberi masukan dan juga memberikan motivasi pada kami.



9. Seluruh Keluarga Besar yang selalu memberikan do'a dan semangat serta menjadi tempat sharing dan kerjasama yang baik sehingga menjadi motivasi bagi penulis untuk segera menjadi sarjana serta motivasi untuk segera sukses semuda mungkin.
10. ASPI QTZ MALANG '14 yang telah memotivasi dan mendoakan untuk menjadi yang terbaik.
11. Saudara-saudara Mesin 2012, yang telah memberikan doa, dukungan, bantuan, canda tawa, pengalaman dan pelajaran kehidupan mulai dari mahasiswa baru hingga sampai saat ini dan juga Oktavianus, Dimas Abdillah, Rayvandi, dll telah membantu dalam pengerjaan sebagian alat skripsi ini.
12. Rizki E., Izum, Tripus, Endang, Dissa, Tamtam, Nurul yang telah memberikan canda tawa serta berbagi cerita.
13. Putri Mesin angkatan 2012 yang telah memberikan dukungan semangat serta motivasi.
14. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Universitas Brawijaya
15. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah banyak membantu penulis baik selama proses penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini dan ilmu yang dimiliki masih butuh penyempurnaan. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kebaikan di kemudian hari. Semoga skripsi ini bisa bermanfaat bagi semua pihak. Amiin

Malang, Juli 2016

Penulis



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	ii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	iv
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	v
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	viii
<b>RINGKASAN</b> .....	ix
<b>SUMMARY</b> .....	x
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	2
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	3
1.5 Manfaat Penelitian .....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Studi Pustaka .....	5
2.2 Definisi Pembakaran .....	6
2.3 Pembakaran Stoikiometri .....	7
2.4 Pembakaran Difusi .....	8
2.5 <i>Swirl Vanes</i> .....	13
2.6 <i>Transport Phenomena</i> .....	18
2.7 Persamaan Navier-Stokes .....	20
2.8 Karakteristik CH <sub>4</sub> .....	21
2.9 Nitrogen .....	22
2.10 <i>Originlab</i> .....	23
2.9 Hipotesa .....	24
<b>BAB III METODE PENELITIAN</b>	
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian .....	25
3.2 Variabel Penelitian .....	25
3.3 Instrumen Penelitian .....	26



3.4 Diagram Alir Rancangan Penelitian.....	29
3.5 Instalasi Penelitian.....	30
3.6 Prosedur Penelitian.....	31
3.6.1 Teknik Pengambilan Data .....	31

**BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Hasil Penelitian .....	33
4.1.1 Data Penelitian .....	33
4.1.2 Perhitungan Data.....	33
4.1.3 Visualisasi Api Difusi .....	34
4.2 Pembahasan.....	35
4.2.1 Visualisasi Api Difusi .....	35
4.2.1.1 Pengaruh Variasi Kecepatan Udara terhadap Visualisasi Api Difusi.....	35
4.2.1.2 Pengaruh Variasi Kecepatan Bahan Bakar terhadap Visualisasi Api Difusi .....	38
4.2.2 Distribusi Temperatur Api Difusi .....	43
4.2.2.1 Distribusi Temperatur Api Difusi pada Variasi Kecepatan Bahan Bakar .....	43
4.2.2.2 Distribusi Temperatur Api Difusi pada Variasi <i>Swirl</i> .....	43
4.2.3 Pengaruh Variasi Kecepatan Bahan Bakar terhadap Kontur Distribusi Temperatur .....	46

**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran.....	51

**DAFTAR PUSTAKA**



## DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Angka <i>Reynolds</i> Transisi Bahan Bakar	12
Tabel 2.2	Properti Kimia Nitrogen	22





## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Skema Proses Pembakaran	6
Gambar 2.2	Api Difusi pada Lilin	8
Gambar 2.3	Struktur Api Difusi	9
Gambar 2.4	Transisi Api Difusi <i>Jet</i> Laminar Menuju ke Api Difusi <i>Jet</i> Turbulen	9
Gambar 2.5	Ilustrasi <i>Over Ventilated Flame</i> dan <i>Under Ventilated Flame</i>	10
Gambar 2.6	Skema Interaksi <i>Vortex-Flame</i> pada Aliran Api Difusi	11
Gambar 2.7	Skema <i>Lift Off</i> pada Aliran Api Difusi	13
Gambar 2.8	Skema Pemasangan <i>Swirl</i>	13
Gambar 2.9	Aliran Resirkulasi yang Disebabkan oleh Pusaran yang Kuat	14
Gambar 2.10	Zona Resirkulasi pada <i>Swirl</i>	15
Gambar 2.11	Profil Karakteristik Aksial dan Kecepatan Pusaran	15
Gambar 2.12	Campuran Bahan Bakar, Udara, dan Hasil Pembakaran pada Api Difusi	16
Gambar 2.13	Distribuai dari Total Panas yang Dibebeaskan Sepanjang <i>Furnace</i> dengan Derajat yang Berbeda dari <i>Swirl</i>	17
Gambar 2.14	Distribusi Suhu pada <i>Burner</i> dengan Diameter $d_0 = 12,65 \text{ mm}$ dan $Rc = 12130$	18
Gambar 2.15	<i>Origin Pro 8.0</i>	23
Gambar 3.1	Diagram Alir Penelitian	26
Gambar 3.2	Instalasi Penelitian	27

Gambar 3.3	Titik – titik Pengukuran Pengambilan Data	29
Gambar 4.1	Visualisasi Api pada Berbagai Variasi Kecepatan Udara dengan Kecepatan Bahan Bakar 5.30 m/s pada Pemasangan sudut <i>swirl</i> 10° (a) 0,08 m/s (b) 0,10 m/s (c) 0,14 m/s	33
Gambar 4.2	Visualisasi Api pada Berbagai Variasi Kecepatan Udara dengan Kecepatan Bahan Bakar 5.30 m/s pada Pemasangan sudut swirler 20° (a) 0,08 m/s (b) 0,10 m/s (c) 0,14 m/s	33
Gambar 4.3	Visualisasi Api pada Berbagai Variasi Kecepatan Udara dengan Kecepatan Bahan Bakar 5.30 m/s pada Pemasangan sudut <i>swirl</i> 30° (a) 0,08 m/s (b) 0,10 m/s (c) 0,14 m/s	34
Gambar 4.4	Visualisasi Api pada Berbagai Variasi Kecepatan Bahan Bakar dengan Kecepatan Udara 0,08 m/s pada Pemasangan Sudut Swirl 10°	36
Gambar 4.5	Visualisasi Api pada Berbagai Variasi Kecepatan Bahan Bakar dengan Kecepatan Udara 0,08 m/s pada Pemasangan Sudut Swirl 20°	37
Gambar 4.6	Visualisasi Api pada Berbagai Variasi Kecepatan Bahan Bakar dengan Kecepatan Udara 0,08 m/s pada Pemasangan Sudut Swirl 30°	38
Gambar 4.7	Grafik Hubungan Temperatur Rata-rata pada Sumbu y terhadap Sumbu x Api Difusi pada <i>swirl</i> (a) Sudut 10° (b) Sudut 20° (c) Sudut 30° dengan Kecepatan Udara 0.08 m/s	41
Gambar 4.8	Grafik Hubungan Temperatur Rata-rata Sumbu y terhadap Sumbu x Api Difusi pada variasi <i>swirl</i> dengan Kecepatan Bahan Bakar 1.32 m/s dan Kecepatan Udara 0.08 m/s.	42
Gambar 4.9	Distribusi Temperatur Sudut Swirl 10° dengan Variasi Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 6,63 m/s (c) 14,60 m/s	44
Gambar 4.9	Distribusi Temperatur Sudut Swirl 20° dengan Variasi Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 6,63 m/s (c) 13,26 m/s	45

Gambar 4.10 Distribusi Temperatur Sudut Swirl  $30^\circ$  dengan Variasi Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 6,63 m/s (c) 14,60 m/s





## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Data Temperatur Api Difusi pada Variasi Sudut <i>Swirl Vanes</i>
Lampiran 2	Perhitungan Bilangan <i>Reynold</i> Kecepatan Bahan Bakar
Lampiran 3	Visualisasi Api Difusi pada Kecepatan Bahan Bakar Sama dan Kecepatan Udara Sama
Lampiran 4	Kontur Distribusi Temperatur dengan Variasi Kecepatan Bahan Bakar dan Variasi sudut <i>Swirl Vanes</i>
Lampiran 5	Gambar <i>Swirl Vanes</i> dengan Variasi Sudut $10^0$ , $20^0$ , dan $30^0$



## RINGKASAN

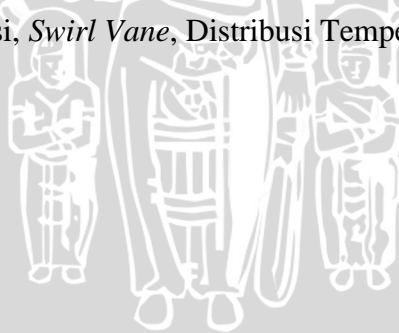
**Annisa Rakhma Ramadhani**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2016, Pengaruh Sudut *Swirl Vanes* terhadap Visualisasi dan Distribusi Temperatur Api Difusi, Dosen Pembimbing: Widya Wijayanti dan Purnami

Dalam perkembangannya *burner* tipe pembakaran dibagi menjadi dua, yaitu *burner* tipe pembakaran premix dan difusi. Dalam pembakaran difusi yang digunakan pada beberapa penelitian menambahkan penggunaan *swirl* pada saluran bahan bakar, fungsi dari *swirl* ini untuk menstabilkan api serta menciptakan api yang turbulen. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah  $\text{CH}_4$  (metana). Penelitian ini bertujuan untuk melihat *transport phenomena* pada pembakaran difusi gas metana ( $\text{CH}_4$ ) di mana *output* dari penelitian ini terbagi menjadi dua, yaitu visualisasi api dan distribusi temperatur api difusi.

Karakteristik api difusi dapat dilihat melalui visualisasi dari api difusi, di mana pengambilan data visualisasi menggunakan kamera. Pemasangan *swirl* mempengaruhi distribusi temperatur api difusi. *Swirl* dipasang pada saluran udara dengan variasi sudut *swirl*  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ , dan  $30^\circ$ . Pengukuran distribusi temperatur menggunakan *thermocouple* tipe K yang sudah dihubungkan dengan *data logger* untuk mengukur temperatur api difusi.

Hasil dari visualisasi api dengan kecepatan bahan bakar sama dan variasi kecepatan udara, seiring dengan penambahan kecepatan udara tinggi api akan semakin menurun dan begitu juga sebaliknya. Sedangkan untuk kecepatan udara sama dengan variasi kecepatan bahan bakar sama menunjukkan bahwa seiring dengan penambahan kecepatan bahan bakar maka api akan terus bertambah ketinggiannya. Adapun pada data distribusi temperatur menunjukkan semakin besar sudut yang dipakai maka distribusi temperatur semakin merata. Hal ini ditandai dengan *plotting* distribusi temperatur dengan besar sudut  $30^\circ$  pada kecepatan bahan bakar 5,30 m/s yang menunjukkan luasan warna merah yang semakin besar di mana temperatur juga semakin meningkat.

**Kata kunci:** Pembakaran, Api Difusi, *Swirl Vane*, Distribusi Temperatur





## SUMMARY

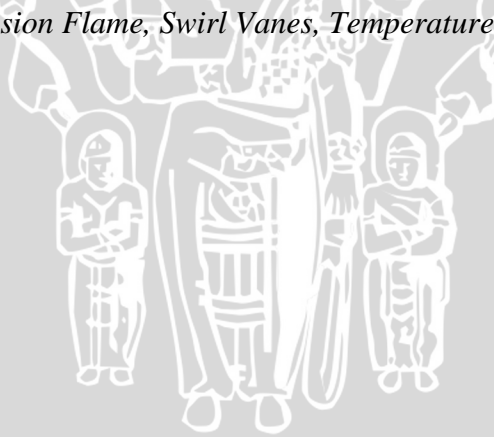
**Annisa Rakhma Ramadhani**, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, July 2016, *The Effect of Swirl Vane's Angle towards Visualization and Distribution Temperatur*, Academic Supervisor : Widya Wijayanti and Purnami.

*In the development of the combustion burner is divided into two types, that is the type burner premixed combustion and diffusion. In the diffusion combustion is used in several studies they add swirl on the pipeline of fuel, the function of this swirl to stabilize the flame and create turbulent flame. In this study we use CH<sub>4</sub> (methane) fuel. This study aims to look at the transport phenomena in the diffusion combustion of methane (CH<sub>4</sub>) fuel in which output of this research is divided into two, that is visualization and temperature distribution of diffusion flame.*

*Characteristics of diffusion flame can be seen from the visualization, in this study we take visualization data with cameras. Setting-up swirl affects the temperature distribution of diffusion flame. Swirl mounted on the air duct with variation of swirl angle 10<sup>0</sup>, 20<sup>0</sup>, and 30<sup>0</sup>. To take data of temperature distribution we use thermocouple(type K) which is connected with data logger for measuring diffusion flame.*

*The result of visualization with the same fuel rate and different air rate, along with addition of air rate the high of flame will decrease and the otherwise. At the same time in the same air rate with fuel rate is different, then the high of flame will be increase. In the temperature distribution data show that the greater angle of swirl is used then temperature distribution is prevail. This is indicated on the plotting of temperature distribution with swirl angle 30<sup>0</sup> with fuel rate at 5,30 m/s that show in extents of red colours increases which is temperature will be increase too.*

**Keywords:** *Combustion, Diffusion Flame, Swirl Vanes, Temperature Distribution*







## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pembakaran merupakan aspek yang sangat dominan dalam penyediaan energi di dunia. Pabrik baja pembakaran diperlukan untuk proses peleburan bijih besi, proses pemotongan, proses pembentukan dan sebagainya. Penerapan pada teknologi yang canggih sekalipun pembakaran diperlukan untuk *flame synthesis* dari material – material nano dan untuk pembuatan *carbon black*. *Carbon black* dipakai sebagai partikel – partikel yang dapat membuat serat gelas atau plastik menjadi konduktor listrik yang bagus untuk tujuan transfer informasi Wardana (2008).

Adapun pembakaran terbagi menjadi dua, yaitu pembakaran *premixed* dan pembakaran difusi. Pembakaran *premixed* terjadi jika bahan bakar dan pengoksidasi tercampur sebelum masuk ke dalam zona reaksi, sedangkan pembakaran difusi merupakan proses pembakaran di mana bahan bakar dan pengoksidasi tidak bercampur secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara difusi.

Dalam perkembangannya pembakaran difusi banyak digunakan dalam berbagai industri besar seperti pada *industrial heater*, turbin gas, dan *boiler*. Selain itu, pembakaran difusi banyak digunakan karena dari segi keselamatan, pembakaran difusi ini tidak akan menimbulkan bahaya *flashback* seperti pada pembakaran *premixed*. Namun, dalam pembakaran difusi memiliki kelemahan dalam memperoleh pencampuran antara bahan bakar dan udara yang baik Rohmat (2010).

Beberapa penelitian yang telah dilakukan, untuk meningkatkan kualitas campuran antara bahan bakar dan udara menjadi semakin baik dengan memberikan gangguan pada aliran rekatan. Gangguan atau hambatan dapat berupa, *swirl vanes*, *fractal grid*, *flame holder*, dan lainnya. Hambatan yang diberikan dapat menyebabkan munculnya aliran turbulen, fungsi dari aliran turbulen adalah untuk mempercepat proses difusi yang terjadi pada reaktan. Adapun aliran turbulen disebabkan karena kecepatan aliran yang tinggi, adanya gesekan antar partikel fluida, dan adanya hambatan pada aliran fluida. Pada penelitian ini penulisan memberikan hambatan, yaitu *swirl vanes* pada saluran udara primer untuk mendapatkan campuran antara bahan bakar dan udara yang semakin baik.

Penelitian yang dilakukan oleh Rohmat *et al* (2010) dengan menggunakan variasi sudut *swirl vanes* pada saluran udara sekunder di mana semakin besar sudut *swirl vanes* tingkat kestabilan api semakin meningkat pula, dilihat dari visualisasi api yang dihasilkan keseluruhan api menunjukkan warna api kuning kemerah – merahan yang terlihat jernih dengan warna biru di pangkal api. Hal ini menunjukkan bahwa pencampuran antara bahan bakar dan udara semakin baik dalam pembakaran. Selain itu, penelitian yang dilakukan oleh Nishimura *et al* (2013) dengan menggunakan *bluff body* dan memvariasikan besar sudut didapatkan kestabilan api yang semakin meningkat.

Dari beberapa penelitian yang telah dilakukan mengenai *swirl vanes*, peletakkan *swirl vanes* diletakkan pada saluran udara sekunder dan juga dalam beberapa penelitian dengan menggunakan *swirl vanes* hanya melihat visualisasi dan titik *lift off* serta *blowout* saja. Tujuan utama dari pemasangan *swirl vanes* sendiri adalah untuk memaksimalkan pencampuran antara bahan bakar dan udara menjadi semakin baik. Maka dari itu, penulis memilih untuk meneliti pengaruh dari sudut *swirl vanes* terhadap visualisasi dan distribusi temperatur dengan peletakkan *swirl vanes* pada saluran udara primer dan melihat visualisasi serta kontur dari distribusi temperatur api difusi. Variasi sudut yang dipilih adalah  $10^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$  hal ini dikarenakan pada sudut kurang dari  $10^{\circ}$  ataupun sudut yang melebihi  $30^{\circ}$  diasumsikan sudah dapat terlihat perbedaan dari visualisasi api serta distribusi temperaturnya. Selain itu, pada penelitian ini juga menggunakan gas *inert*, yaitu nitrogen ( $N_2$ ). Penggunaan nitrogen sebagai gas *inert* agar reaksi pembakaran antara bahan bakar dan udara menjadi semakin baik sehingga udara dari luar tidak ikut bereaksi dengan pembakaran. Adapun bahan bakar yang digunakan dalam penelitian ini adalah  $CH_4$  atau metana, karena dapat mengurangi pebuangan gas metana ke lingkungan yang dapat menyebabkan efek rumah kaca. Selain itu, metana memiliki struktur atom yang sederhana sehingga lebih mudah untuk diteliti.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah dijabarkan di atas dapat dirumuskan bagaimana pengaruh besar sudut *swirl vanes* terhadap visualisasi dan distribusi temperatur pada api difusi pembakaran gas metana ( $CH_4$ ) dengan variasi kecepatan bahan bakar dan variasi kecepatan udara yang telah ditentukan.



### 1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian yang kami lakukan lebih fokus dan terarah sesuai dengan tujuan yang telah dituliskan oleh penulis, maka ada beberapa batasan masalah yang perlu diketahui, yaitu sebagai berikut:

1. Kondisi ruangan pada temperatur ruangan  $25^{\circ}\text{C}$ .
2. Kondisi udara pada lingkungan *burner* dianggap stabil.
3. Bahan bakar yang digunakan adalah  $\text{CH}_4$  atau metana.

### 1.4 Tujuan

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melihat *transport phenomena* pada pembakaran difusi gas metana ( $\text{CH}_4$ ).

### 1.5 Manfaat

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Sebagai aktualisasi ilmu perkuliahan khususnya bidang pembakaran.
2. Dapat digunakan sebagai referensi tambahan mengenai karakteristik pembakaran dengan menggunakan *swirl vanes* pada jenis pembakaran difusi.
3. Dapat mengetahui pengaruh besar sudut *swirl vanes* pada pembakaran difusi dengan bahan bakar  $\text{CH}_4$  terhadap visualisasi api dan distribusi temperatur api.



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Studi Pustaka

Takahashi (1996) juga melakukan penelitian pada *double concentric jet flow*, yaitu pada bentuk *burner* yang terdiri dari *fuel tube*, *concentric annulus tube*, dan *external air pipe*. Dalam penelitian ini dilakukan penelitian terhadap api difusi turbulen yang berbahan bakar hidrogen untuk mengetahui struktur turbulensi dari api. selain itu, Pengaruh penggunaan *swirler* terhadap struktur apinya. *Swirl* diletakkan di dalam *concentric annulus tube* dengan diameter 26,9 mm.

Pengaruh *swirl vanes* pada aliran udara sekunder terhadap api difusi yang terbentuk di aliran sembur *double concentric* yang diteliti oleh Rohmat, *et al* (2010). Di mana alat yang digunakan pada penelitian yang ia lakukan terdiri dari ruang bakar (*combustion chamber*), terowongan angin yang terdiri dari sambungan beberapa pipa PVC, dan *blower*. *Burner* dengan jenis *double concentric jet flow* yang terdiri dari pipa bahan bakar, pipa udara primer dan pipa udara sekunder diletakkan pada bagian masuk ruang bakar. Pipa bahan bakar terbuat dari tembaga dengan ukuran diameter dalam 4 mm dan diameter luar 5 mm. Pipa udara primer terbuat dari *stainless steel* dengan diameter 1 inch. Pipa udara sekunder terbuat dari besi dengan diameter 4 inch. Sedangkan ruang bakar adalah *chamber* dengan ukuran 30 x 10,1 x 10,16 cm<sup>3</sup> yang dilengkapi kaca pengamatan dengan ukuran 20 x 10 cm<sup>2</sup>. Sebagai hasil dari penelitiannya adalah pengaruh posisi aksial *swirl vanes* pada aliran udara sekunder tidak terlalu signifikan terhadap luasan api stabil. Di sisi lain, penempatan *swirling vanes* semakin ke dalam membuat api menjadi lebih mudah *blowout*.

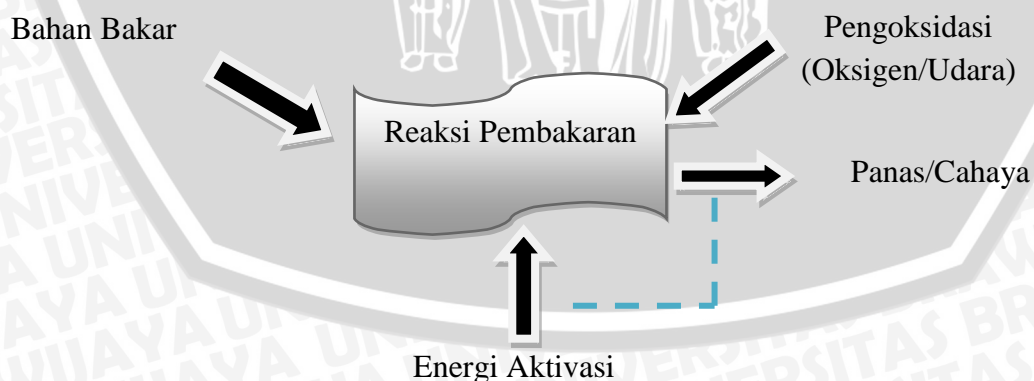
Nishimura *et al* (2012) dalam penelitiannya tentang perubahan api pada *bluff-body* di bawah rezim transisional oleh aliran udara yang berputar. Pada penelitian ini gas propana digunakan sebagai bahan bakar dalam proses pembakarannya, kemudian *swirl* yang digunakan memiliki variasi sudut sebesar 0°, 22,5°, 33,75°, 45°, 60° dengan variasi laju aliran bahan bakar sebesar 18,86 m/s dan 37,73 m/s. Sehingga didapatkan hasil bahwa komponen *swirl* dapat meningkatkan stabilitas api dan menunjukkan angka geometrinya lebih besar dari 0.6 dan menyebabkan kecepatan aliran udara meningkat. Hasil dari



visualisasi api menyatakan bahwa penyebaran aliran udara dikarenakan adanya gaya sentrifugal, yang mana tidak terjadi pencampuran bahan bakar, dan juga pada saat keadaan api stabil.

## 2.2 Definisi Pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi kinetika kimia yang meliputi reaksi antara bahan bakar dan pengoksidasi (udara) sehingga terjadi perubahan energi dari energi kimia menjadi energi sensibel yang menghasilkan panas dan cahaya. Sedangkan definisi dari bahan bakar adalah sebagai material yang mampu untuk dibakar. Umumnya kandungan utama pada bahan bakar adalah senyawa hidrokarbon yang dinotasikan dengan  $C_nH_m$ . Syarat terjadinya proses pembakaran adalah ketika terdapat bahan bakar, pengoksidasi (oksigen/udara), dan panas atau energi aktivasi. Campuran konsentrasi yang cukup juga menjadi syarat dalam terjadinya proses pembakaran dengan batas konsentrasi antara bahan bakar dan udara harus sesuai atau cukup untuk terjadinya proses pembakaran. Jika campuran terlalu banyak bahan bakar maka proses tidak dapat terjadi, begitu juga ketika dalam kondisi miskin bahan bakar. Membutuhkan waktu yang cukup untuk mendapatkan campuran yang mampu bakar. Selain itu temperatur yang tinggi juga mempengaruhi proses pembakaran, campuran bahan bakar dan udara harus dinyalakan terlebih dahulu agar terjadi proses pembakaran. Temperatur penyalaan minimum tiap bahan bakar berbeda – beda pada kondisi udara atmosfer. Untuk gasoline sekitar  $260^\circ\text{C}$ , karbon  $400^\circ\text{C}$ , hidrogen  $580^\circ\text{C}$ , karbon monoksida  $610^\circ\text{C}$ , dan  $630^\circ\text{C}$  untuk metana.



Gambar 2.1 Skema proses pembakaran

Sumber: Wardana (2003,p.1)



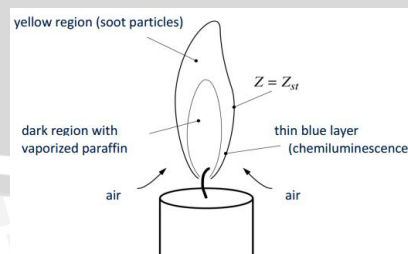


memperhatikan jenis bahan bakar yang dipakai baik dalam bentuk cair, padat, maupun gas. Bahan bakar gas memiliki keuntungan yang lebih besar jika dibandingkan dengan kedua bahan bakar lainnya. Hal ini disebabkan bahan bakar gas mudah untuk bereaksi dengan udara karena sudah berada pada fase gas sehingga gas mudah tercampur dan mempunyai bidang kontak yang besar di mana dapat memudahkan terjadinya reaksi pembakaran. Bahan bakar gas juga memiliki kandungan bahan bakar yang tidak diinginkan yang jumlahnya hampir 0% (seperti nitrogen, sulphur, dan CO) sehingga pembakaran yang dihasilkan bersih untuk ke lingkungan. Sedangkan untuk bahan bakar padat merupakan bahan bakar yang kurang efisien, hal ini disebabkan karena akan menghasilkan pembakaran yang tidak bersih dengan terbentuknya arang dan abu. Akan tetapi, bahan bakar padat seperti batu bara mempunyai keunggulan, yaitu tersedia dalam jumlah besar sehingga dapat dipakai sebagai bahan bakar. Untuk bahan bakar cair dibutuhkan suatu *nozzle* yang bertekanan tinggi untuk membentuk droplet. Bahan bakar cair bila dipanaskan akan menguap dan kemudian terbakar dalam bentuk gas.

Meningkatkan kecepatan reaksi pembakaran sangatlah penting, karena hasil dari proses pembakaran merupakan energi yang cepat dengan adanya reaksi kimia pembakaran yang berlangsung sangat cepat dengan memperluas bidang kontak, meningkatkan temperatur pembakaran, membuat aliran turbulen untuk pengadukan bahan bakar dan udara, serta menggunakan katalis merupakan beberapa cara untuk meningkatkan kecepatan dari reaksi pembakaran itu sendiri.

## 2.4 Pembakaran Difusi

Pembakaran difusi merupakan proses pembakaran yang berlangsung di mana bahan bakar dan pengoksidasi (udara) tidak bercampur langsung secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi.

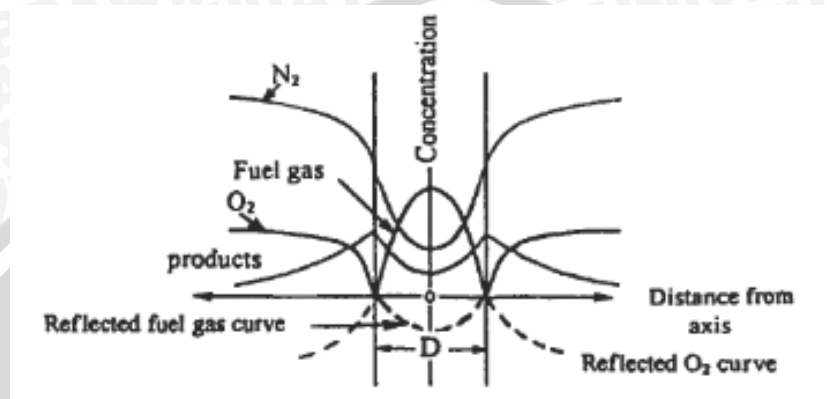


Gambar 2.2 Api difusi pada lilin

Sumber: Pitsch H.(2014,p.4)



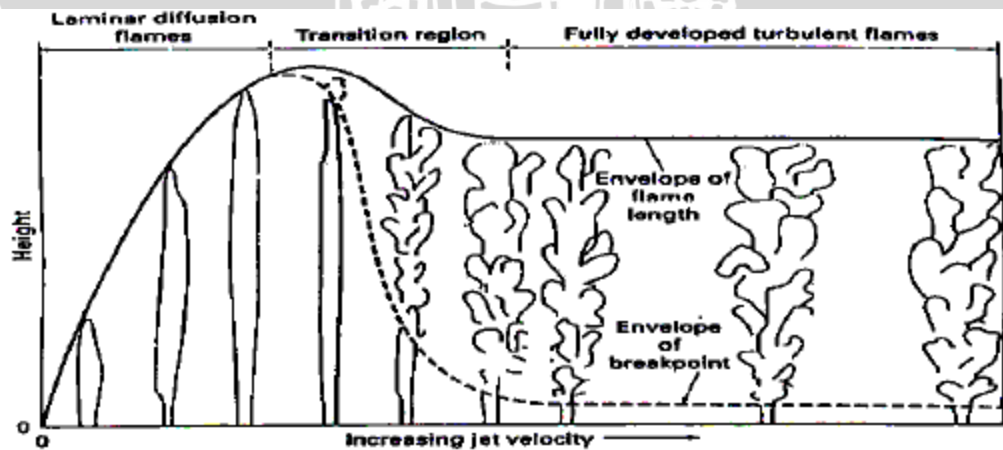
Gambar 2.2 menunjukkan contoh api difusi yang terjadi pada pembakaran lilin. Pembakaran difusi lebih didominasi dengan pengadukan (*mixing*) reaktannya dan reaksi terjadi pada jarak antara bahan bakar dan oksidator. Proses pembakaran difusi dapat dilihat pada berbagai proses pembakaran seperti nyala api lilin, pembakaran di industri, api korek api, pembakaran di turbin gas, pembakaran mesin diesel, dan masih banyak lainnya.



Gambar 2.3 Struktur api difusi

Sumber: Mahallawy (2002,p.263)

Proses pembakaran menggunakan pembakaran difusi memiliki keuntungan, yaitu dapat mengontrol api hasil pembakarannya sehingga pembakaran difusi banyak diterapkan pada pembakaran di industri. Pada api difusi terdapat api difusi laminar dan api difusi turbulen, dengan ilustrasi yang dapat dilihat pada gambar 2.4.

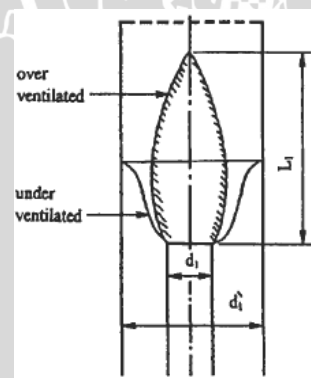


Gambar 2.4 Transisi api difusi *jet* laminar menuju ke api difusi *jet* turbulen

Sumber: Wijayanti (2003,p.55)

Gambar 2.2 menjelaskan tentang perubahan api difusi *jet* laminar menuju ke api difusi *jet* turbulen. Perubahan karakter api tersebut disebabkan karena meningkatnya kecepatan aliran (*jet*) dan juga oleh pemanjangan api. Pada kecepatan aliran yang rendah akan membentuk struktur aliran api yang laminar. Panjang aliran api laminar akan semakin meningkat seiring dengan peningkatan dari kecepatan alirannya, di mana sampai pada waktu tertentu aliran akan berubah menjadi aliran turbulen. Semakin tinggi kecepatan *jet* panjang api laminar akan menurun sedangkan panjang api turbulen akan mengalami kenaikan seiring dengan kecepatan *jet* yang semakin bertambah. Kecepatan pengadukan api sangat berpengaruh pada panjang api total, di mana kecepatan pengadukan api yang turbulen akan menyebabkan penurunan panjang total api. Kecepatan *jet* yang menjadi salah satu faktor untuk menentukan panjang api tidak akan berpengaruh ketika api pada kondisi turbulen yang sangat stabil.

Untuk menentukan temperatur pada zona reaksi dapat dengan kesetimbangan panas yang dimunculkan di zona reaksi dengan panas yang didifusikan di luar zona reaksi. Temperatur pada zona reaksi akan menurun dan pembakaran tidak berlangsung dengan sempurna jika panas yang dimunculkan oleh reaksi rendah yang mana sebagai akibatnya adalah api akan mati. Api tidak akan terbentuk ketika konsentrasi di daerah bahan bakar rendah dan konsentrasi udara di daerah pengoksidasi juga rendah.



Gambar 2.5 Ilustrasi *over ventilated flame* dan *under ventilated flame*

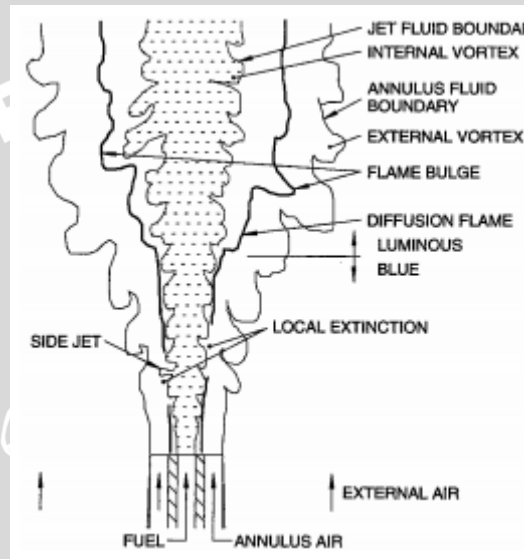
Sumber: Mahallawy (2002,p.262)

Gambar 2.5 menunjukkan ilustrasi dari *over ventilated flame* dan *under ventilated flame*. Pada api difusi laminar transfer bahan bakar dan pengoksidasi menuju ke daerah reaksi adalah karena difusi molekuler. Nyala aliran api laminar akan terbentuk menjadi dua, yaitu api yang memiliki kelebihan ventilasi (*overventilated flame*) dan api yang kekurangan ventilasi (*underventilated flame*). Terbentuknya salah satu dari api ini bergantung pada kondisi relatif kecepatan aliran dan tentunya konsentrasi bahan bakar. Api



yang memiliki kelebihan ventilasi (*overventilated flame*) pembakaran berlangsung sempurna sehingga hanya produk yang teroksidasi sempurna. Sedangkan pada api yang kekurangan ventilasi (*underventilated flame*), pengoksidasi akan habis bereaksi sedangkan sebagian bahan bakar akan terbuang dari daerah pembakaran. Adapun skema dari api yang memiliki kelebihan ventilasi (*overventilated flame*) dan juga api yang kekurangan ventilasi (*underventilated flame*) dapat dilihat pada gambar 2.5.

Pada api difusi turbulen, *vortex* menyebabkan terjadinya gerakan reaktan atau olakan yang terjadi pada aliran. Skema dari api difusi turbulen yang disebabkan oleh *vortex* dapat dilihat pada gambar 2.6 berikut ini.



Gambar 2.6 Skema interaksi *vortex-flame* pada aliran api difusi

Sumber: Schmoll (1996,p.150)

Pada gambar 2.6 bisa dilihat bahwa zona api dapat keluar, yang disebabkan karena gerakan vertikal dari internal maupun eksternal. Kecepatan fluida annulus yang melewati zona api sangatlah besar. Oleh karena itu, zona api bergeser ke kiri, yaitu untuk batas fluida *jet*-annulus, di mana gradien radial dari kecepatan axial, konsentrasi bahan bakar, dan pada akhirnya fluks difusi pada bahan bakar lebih besar, seiring dengan peningkatan fluks oksigen. Hasilnya, ketebalan lapisan difusi antara batas *jet* dan zona api menjadi tipis. Dengan demikian, api menjadi tegang dan kehilangan mobilitas radial.

Pada panjang api saat terjadinya ketidakstabilan ditentukan berdasarkan bilangan Reynolds. Umumnya bilangan Reynolds yang dimiliki oleh bahan bakar adalah sebesar 3000. Adapun pada tabel 2.1 dicantumkan beberapa angka Reynolds transisi bahan bakar.



Tabel 2.1  
Angka *reynolds* transisi bahan bakar

<i>Fuel into air</i>	<i>Transition Reynolds number</i>
<i>Hydrogen</i>	2000
<i>City gas</i>	3400
<i>Carbon monoxide</i>	4800
<i>Propane</i>	9000-10.000
<i>Acetylene</i>	9000-10.000

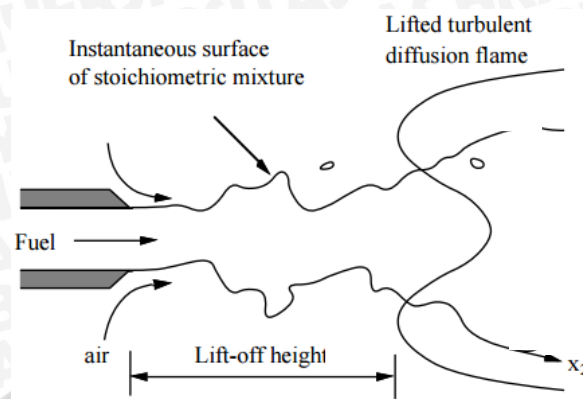
Sumber: Wijayanti (2003,p.56)

Ketika ketidakstabilan api terjadi maka api akan memendek sampai api menjadi stabil dan berada pada level tetap (tidak bergantung pada kecepatan pancaran bahan bakar). Panjang api pada daerah transisi dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut.

$$l = \frac{L_1}{C_1 + \frac{C_2}{v}} \dots\dots\dots (2-1)$$

Di mana  $C_1$  dan  $C_2$  merupakan konstanta dan  $v$  adalah kecepatan bahan bakar sedangkan  $L_1$  adalah jari – jari nosel.

Kestabilan api merupakan salah satu karakteristik api difusi yang paling penting. Batas kestabilan api umumnya menjelaskan batas operasional sistem pembakaran. Dalam penelitian yang dilakukan ini, terdapat dua kondisi aliran batas yang berhubungan dengan kestabilan api difusi, yaitu kondisi *lift off* dan kondisi *blow out*. Konfigurasi aliran sangat berpengaruh pada kestabilan api saat di mana api berada pada kondisi kritis. Kondisi *lift off* pada penelitian ini terjadi pada saat api sudah mulai menjauhi mulut nosel atau tidak menempel pada mulut nosel. Hal ini disebabkan oleh kecepatan gas reaktan lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan api. Kondisi *blow out* terjadi bila kecepatan nyala api turbulen lebih besar dibandingkan kecepatan api maksimum, yang artinya kondisi *blow out* terjadi ketika api difusi telah melewati batas kritis *lift off*, meskipun campuran masih dalam batas mampu nyala pada pangkal api. Adapun ilustrasi dari skema api *lift off* dapat dilihat pada gambar 2.7.



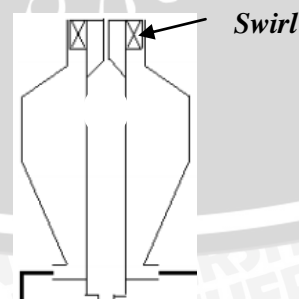
Gambar 2.7 Skema *lift off* pada aliran api difusi

Sumber: Peters (1997,p.95)

Jarak antara mulut nosel dan pangkal api merupakan panjang *lift off*, di mana panjang *lift off* akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan aliran bahan bakar sampai api mengalami kondisi *blow out*. Pada saat api mengalami *lift off*, pangkal api berada pada kondisi aliran laminar. Saat api berada pada kondisi turbulen, pangkal api akan tetap berada pada kondisi laminar, hal ini disebabkan karena adanya pengaruh penurunan densitas api dan adanya pengaruh peningkatan viskositas.

## 2.5 Swirl Vanes

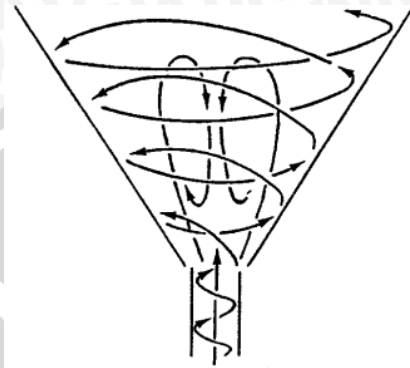
*Swirl vanes* merupakan sebuah alat yang digunakan untuk menstabilkan api pada proses pembakaran yang diletakkan di daerah aliran udara, di mana udara yang dialirkan berasal dari *blower*. Adapun pemasangan *swirling vanes* yang diletakkan di daerah saluran udara dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Skema pemasangan *swirl*

Sumber: Kunitsugu (2013,p.13)

Pada gambar 2.8 dapat dilihat skema pemasangan dari *swirl vanes* pada daerah aliran udara, yang di mana aliran udara akan membentuk zona resirkulasi (Gambar 2.9 dan gambar 2.10) yang akan mengakibatkan proses pencampuran bahan bakar dan udara semakin baik.



Gambar 2.9 Aliran resirkulasi yang disebabkan oleh pusaran yang kuat

Sumber: Lilley (2011,p.12)

Pada gambar 2.9 dapat dilihat bahwa aliran resirkulasi disebabkan oleh aliran pusaran udara yang kuat. Ketika angka aliran udara *swirl* melebihi 0.6 (Persamaan 2.1) , maka akan menyebabkan terjadinya vortex hal ini berarti bahwa kecepatan aliran semakin meningkat. Resirkulasi menyebabkan terjadinya pencampuran yang lebih baik, karena komponen dari *swirl vanes* sendiri mengakibatkan terjadinya perbedaan kecepatan dan arah gerakan udara yang melewatinya. Jika jumlah pusaran cukup tinggi, daerah pusat aliran akan mengalami kenaikan tekanan, sehingga lebih lambat dalam bergerak, tinggi tekanan gas dari daerah hilir di dorong kembali ke hulu ke arah *burner inlet*. *Phenomena* ini cukup untuk menstabilkan pembakaran, karena menciptakan mekanisme yang baik dengan adanya perbedaan kecepatan dan arah gerakan udara yang melewati *swirl vanes*. Aliran resirkulasi membawa gas panas hasil pembakaran mendekati ujung *burner* sehingga meningkatkan kecepatan reaksi kimia Lilley (1977).

Gupta *et al* (1984) telah membahas tentang arus panjang *swirl*. Untuk nilai – nilai jumlah *swirl* kurang dari sekitar 0,4 tidak didapatkan aliran resirkulasi atau dianggap pusaran lemah. Sedangkan untuk aliran pusaran kuat berkisar  $S_N > 0,6$ . Adapun perhitungan yang digunakan untuk menghitung angka *swirl* untuk berbagai jenis generator *swirl*, untuk *swirl* dengan sudut baling – baling konstan T (persamaan 2-2).

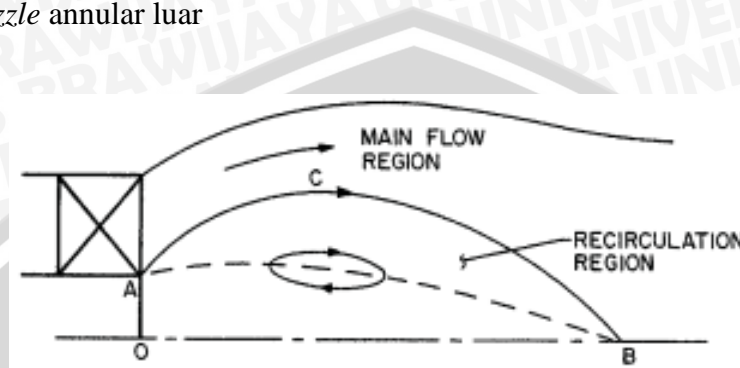


$$Sn = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - \left(\frac{D_{hub}}{D_{sw}}\right)^3}{1 - \left(\frac{D_{hub}}{D_{sw}}\right)^2} \right] \tan \theta \quad \dots\dots\dots (2-2)$$

Di mana:

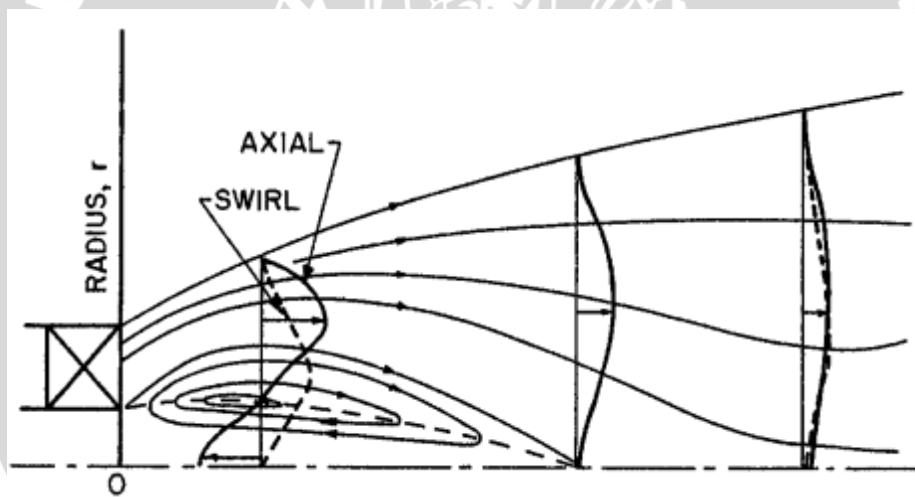
$D_{hub}$ : Diameter *nozzle* annular dalam

$D_{sm}$ : Diameter *nozzle* annular luar



Gambar 2.10 Zona resirkulasi pada swirl

Sumber: Lilley (2011,p.12)



Gambar 2.11 Profil karakteristik aksial dan kecepatan pusaran

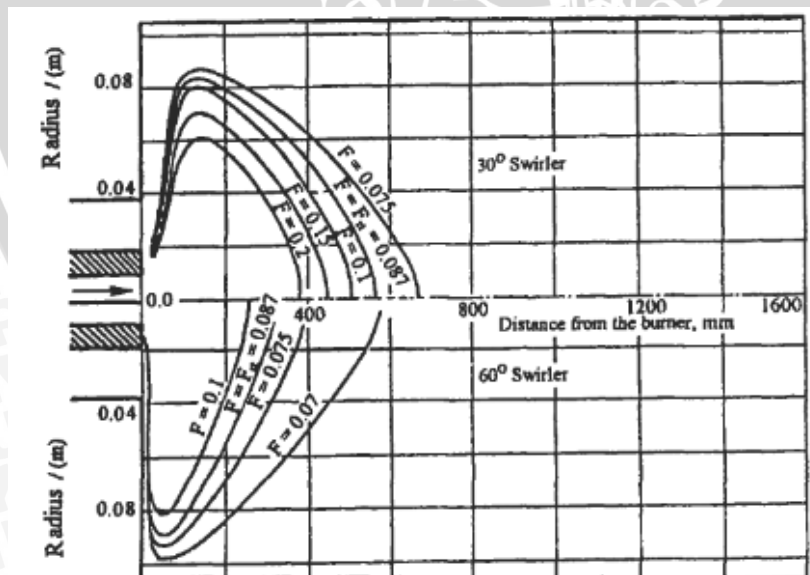
Sumber: Lilley (2011,p.12)

Gambar 2.10 menunjukkan skematis daerah resirkulasi dalam aliran berputar bebas. Karena aliran dianggap *axisymmetric*, hanya setengah pola aliran yang dianggap. Daerah resirkulasi terlihat dalam zona kurva ACB. Titik B disebut dengan titik stagnasi. Aliran luar Aliran ACB adalah aliran utama yang mendorong resirkulasi sepanjang kurva AB. Pada kondisi nol aksial kecepatan diwakili oleh kurva putus – putus AB. Kecepatan aksial yang negatif (zona resirkulasi) hanya terjadi di daerah antara tengah dan garis putus – putus ini. Profil karakteristik aksial dan kecepatan pusaran dapat dilihat pada gambar 2.11. Semua komponen kecepatan mulai menghilang saat menuju ke arah hilir. Setelah titik

stagnasi, kecepatan aksial menghilang, dan hilir, puncak profil kecepatan aksial menuju ke *centerline* sebagai efek dari berkurangnya pusaran. Karakteristik hilir dari aliran pusaran udara yang sangat kuat dengan resirkulasi menjadi lebih seperti itu dari aliran pusaran udara yang lemah.

Banyak hal yang mempengaruhi ukuran dan bentuk zona resirkulasi. Ada beberapa variasi yang terbukti sangat efektif dalam proses pembakaran seperti, jenis *vane* (datar atau melengkung), sudut *vane*, dan aspek rasio *vane*. Data eksperimental menunjukkan ukuran zona resirkulasi meningkat oleh: peningkatan sudut *vane*, peningkatan jumlah *vane*, penurunan rasio aspek *vane*, dan perubahan jenis *vane* dari bentuk datar menjadi melengkung. Semakin besar sudut *swirl vanes* maka kecepatan tangensial udara akan semakin besar sehingga meningkatkan *shear flow*. Intensitas turbulensi dipicu oleh meningkatnya *shear flow*, sehingga semakin besar intensitas *shear flow* mengakibatkan kecepatan aksial menurun pada zona resirkulasi dan hal ini sangat menungkhkan kecepatan reaksi dan kecepatan aliran dapat seimbang atau bahkan kecepatan reaksinya justru menjadi lebih besar Lilley *et al* (2011).

Penelitian yang dilakukan oleh Habik *et al* adalah melihat pengaruh angka *swirl* terhadap visualisasi api. Gambar 2.12 menunjukkan bahwa perbedaan sudut *swirl* akan menghasilkan visualisasi api yang berbeda pula. Semakin besar angka *swirl* maka akan meningkatkan pemanjangan api ke arah radial dan pemendekan ke arah aksial.

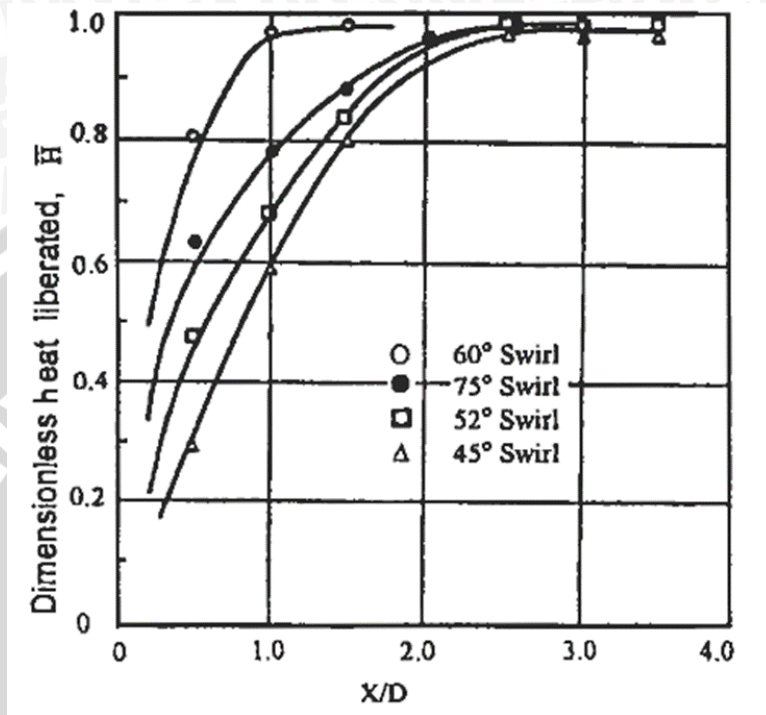


Gambar 2.12 Campuran bahan bakar, udara, dan hasil pembakaran pada api difusi

Sumber: Habik (2002,p.449)



Gambar 2.13 menunjukkan bahwa sudut dari *swirl* memberikan pengaruh yang sangat signifikan. Untuk berbagai sudut *swirl* dengan rentang nilai 40° - 60° meningkatkan laju *swirl* ke tingkat yang lebih tinggi dari pelepasan panas di bagian hulu. Hasilnya dalam gambar di bawah ini dapat di korelasikan sebagai berikut.



Gambar 2.13 Distribusi dari total panas yang dibebaskan sepanjang *furnace* dengan derajat yang berbeda dari *swirl*

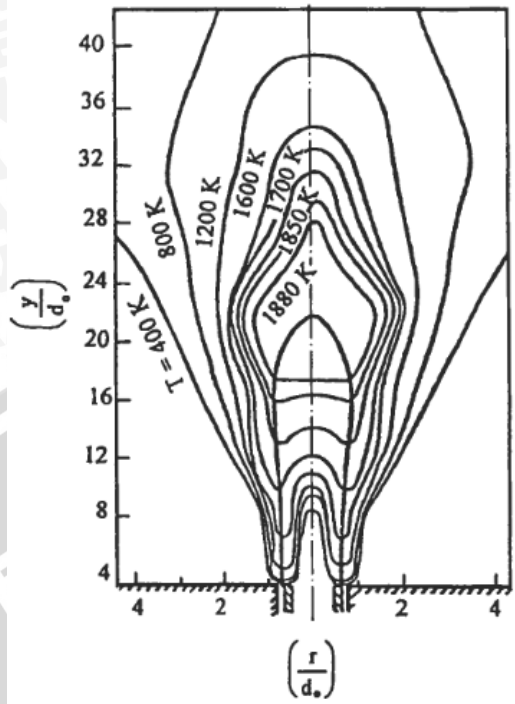
Sumber: Habik (2002,p.454)

Gambar 2.13 menunjukkan hubungan bilangan non dimensional antara X/D dan H. Bilangan non dimensional H sendiri ditentukan berdasarkan rumus di bawah ini. H adalah Pelepasan panas yang dinyatakan dengan fraksi dari energi kimia bahan bakar, X adalah jarak aksial dari penampang I yang dihitung dari sisi masuk dan D adalah diameter pipa.

$$\bar{H}_i = 1 - \exp\left(-2.3 \frac{X_i}{D}\right) \dots\dots\dots (2-3)$$

Pengaruh variasi sudut *swirl* yang digunakan adalah terjadinya olakan pada aliran. Olakan olakan pada aliran turbulen pembakaran akan meningkatkan proses *transport* dalam gelombang pembakaran sehingga meningkatkan difusivitas dan meningkatkan kecepatan pembakaran.





Gambar 2.14 Distribusi suhu pada burner dengan diameter  $d_0 = 12.65$  mm dan  $Re = 12130$

Sumber: Habik (2002,p.356)

Sudut *swirl vanes* akan mempengaruhi aliran fluida menjadi skala yang lebih kecil sehingga berpengaruh pada permukaan nyala. Olakan - olakan pada aliran turbulen pembakaran akan meningkatkan proses *transport* dalam gelombang pembakaran sehingga meningkatkan difusivitas dan meningkatkan kecepatan pembakaran.

## 2.6 Transport Phenomena

*Transport phenomena* merupakan ilmu rekayasa yang terdiri dari tiga komponen utama, yaitu dinamika fluida (*momentum transport*), *transport energi (heat transfer)*, dan transfer massa. Di dalam *transport phenomena* terdapat sebuah persamaan yang menyatakan prediksi suatu fluida dengan perbedaan gradien konsentrasi, kecepatan, atau temperatur. *Fluid dynamics* merupakan transfer dari momentum di dalam suatu fluida. Pada skala molekular yang berarti bahwa molekul membenturkan satu sama lain dengan tujuan untuk mentransfer momentum mereka untuk molekul lainnya. Pada skala yang besar, molekul ini membenturkan satu sama lain menentukan bagaimana aliran mengalir ke fluida tersebut, jika itu hanya aliran yang halus (*laminar*), atau jika itu hanya aliran yang

kasar (turbulen). *Heat transfer* merupakan *transfer* dari panas. Panas hanya merupakan kata lain dari energi.

Adapun metode dari *heat transfer* adalah konduksi, konveksi, dan radiasi. Konveksi merupakan perpindahan panas dari energi dari partikel yang lebih energik dari substansi berdekatan dengan partikel yang kurang energik sebagai akibat dari interaksi antara partikel. Konveksi merupakan modedari transfer energi antara permukaan padat dan cair yang berdekatan atau gas yang bergerak dan melibatkan efek gabungan dari konduksi dan gerakan fluida. Kemudian, radiasi merupakan merupakan energi yang dipancarkan oleh materi dalam bentuk gelombang elektromagnetik atau foton sebagai akibat dari konfigurasi elektronik dari atom atau molekul.

*Mass transfer* merupakan transfer dari massa. Salah satu contohnya adalah jika mengambil satu gelas air dan menempatkan satu tetes pewarna merah di dalamnya, bahkan jika air tersebut tidak diaduk, pada akhirnya air menunjukkan warna merah muda yang sama. Warna merah yang menyebar pada satu gelas air merupakan perpindahan massa dari pewarna tersebut.

Pada kondisi tersebut, *transport* massa, *transport* momentum atau *transport* energi akan terjadi dan perbandingan konstan yang berhubungan dengan kuantitas yang berpindah pada gradien tersebut disebut koefisien viskositas, koefisien difusi, dan koefisien thermal konduktivitas.

Pada umumnya untuk menentukan persamaan pada proses pembakaran dinyatakan dengan persamaan *transport phenomena* yang menyangkut persamaan kontinuitas dan persamaan momentum. Beberapa *phenomena transport* yang terjadi pada pembakaran difusi, yaitu perpindahan gerak fluida, massa, dan temperatur.

Adapun rumus matematika dari *transport phenomena* didasarkan pada laju perpindahan dari fluida sebanding dengan *driving force* yang diberikan pada saat fluida dan massa dan energi tidak dapat dimusnahkan. Adapun beberapa hukum yang terapat pada *transport phenomena* adalah sebagai berikut.

- Hukum Newton, Mekanika Fluida:

$$\mu \frac{du_x}{dx} = \tau \quad \dots\dots\dots (2-4)$$

Di mana:

$\mu$  : viskositas dari fluida

$du_x$  : kecepatan dari fluida

$d_x$  : tegangan geser fluida



- Hukum Fourier's, Perpindahan Panas

$$-kA \left( \frac{dT}{dx} \right) = q \dots\dots\dots (2-5)$$

Di mana :

k = konduktivitas termal

A = luasan daerah perpindahan panas

T = temperatur

q = laju perpindahan panas per waktu

- Hukum Fick's, Perpindahan Massa

$$-D_{AB} \left( \frac{dc_A}{dz} \right) = J_A \dots\dots\dots (2-6)$$

Di mana:

$D_{AB}$  = difusifitas dari A ke

$C_A$  = konsentrasi dari A

$J_A$  = flux molar dengan kecepatan molar rata – rata

## 2.7 Persamaan Navier - Stokes

Dengan latar belakang konservasi massa dan energi bahwa energi tidak dapat dimusnahkan. Hal ini dapat dilihat untuk mekanika fluida dengan menggunakan persamaan kontinuitas dengan dasar konservasi massa dan persamaan Navier-Stokes dengan dasar persamaan momentum. Sesuai yang ditulis oleh Jones *et al* (2004), persamaan Navier-Stoke dikembangkan oleh stokes (1845) dan Navier (1821) dan menggambarkan perilaku umum dari fluida.

Persamaan Navier-Stoke merupakan persamaan yang dapat diturunkan dari persamaan kontinuitas yang diaplikasikan pada suatu fluida. Untuk mendapatkan persamaan gerak fluida, sebelumnya harus melakukan penurunan pada persamaan kontinuitas terlebih dahulu yang kemudian digabungkan dengan persamaan konservasi untuk massa dan momentum. Dari penurunan persamaan kontinuitas dan momentum untuk mendapatkan persamaan Navier Stokes dari konservasi massa dan energi didapatkan persamaan seperti pada persamaan (2-7).



$$\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \dots\dots\dots (2-7)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z$$

Dengan:

- $\rho$  adalah densitas fluida
- $\frac{dv}{dt}$  adalah *derivative substantive (derivative material)*
- $v$  adalah vektor kecepatan
- $p$  adalah tensor yang menyatakan gaya gaya permukaan yang bekerja pada partikel fluida

**2.8 Karakteristik CH4**

Methana merupakan gas hidrokarbon paling sederhana dan paling ringan di alam, menjadi komponen dasar dari gas alam (*natural gas*). Propertinya sangatlah spesifik, gas alam tidak mencair pada suhu ruang dan pada tekanan beberapa bar di atas tekanan atmosfer. Adapun beberapa sifat metana yang dituliskan oleh Wardana (2008) adalah sebagai berikut.

- Densitas pada kondisi standar : 0,7168 gr/dm<sup>3</sup>
- Berat jenis spesifik dibandingkan air : 0,554
- Nilai kalor tinggi : 9.510 kcal/m<sup>3</sup>
- Nilai kalor rendah : 8.570 kcal/m<sup>3</sup>
- Temperatur pembakaran adiabatik pada kondisi stoikiometrik pada 25°C : 1.952 °C
- Batas konsentrasi mampu bakar diudara tertinggi terendah : 15%
- Temperatur penyalaan : 580°C
- Kecepatan rambat api pada campuran stoikiometrik pada 25 °C : 43,4 cm/det

Kandungan  $\text{CH}_4$  di dalam *natural gas* sebesar 96%. Nilai kalor bahan bakar gas dalam basis volume adalah sebesar 9000-11.000 kcal/m<sup>3</sup> pada tekanan 1 atm dan temperatur 25°C.

## 2.9 Nitrogen ( $\text{N}_2$ )

Nitrogen ditemukan oleh dokter Skotlandia Daniel Rutherford pada tahun 1772. Nitrogen adalah salah satu unsur dalam golongan VA pada tabel periodik yang memiliki simbol N. Nitrogen merupakan unsur yang paling banyak terkandung dalam udara bebas dengan kadar 78 %. Nitrogen merupakan gas tanpa warna, tanpa bau, tanpa rasa, dan gas diatomik stabil yang sulit bereaksi dengan unsur atau senyawa lain sehingga nitrogen juga biasa disebut dengan gas *inert*. Adapun properti kimia dari nitrogen dapat dilihat pada tabel 2.2

Tabel 2.2

Properti kimia nitrogen

Rumus Molekul	$\text{N}_2$
Wujud	Gas
Warna	Tidak berwarana
Massa molar	14.007 kg/mol
Titik Didih	-346 °F (-210 °C) pada 1 atm
Titik Uap	-320.4 °F (-195.8°C) pada 1 atm
Massa Jenis	1.251 g/L

Sumber: Tjokroawidjojo (1986 : 60)

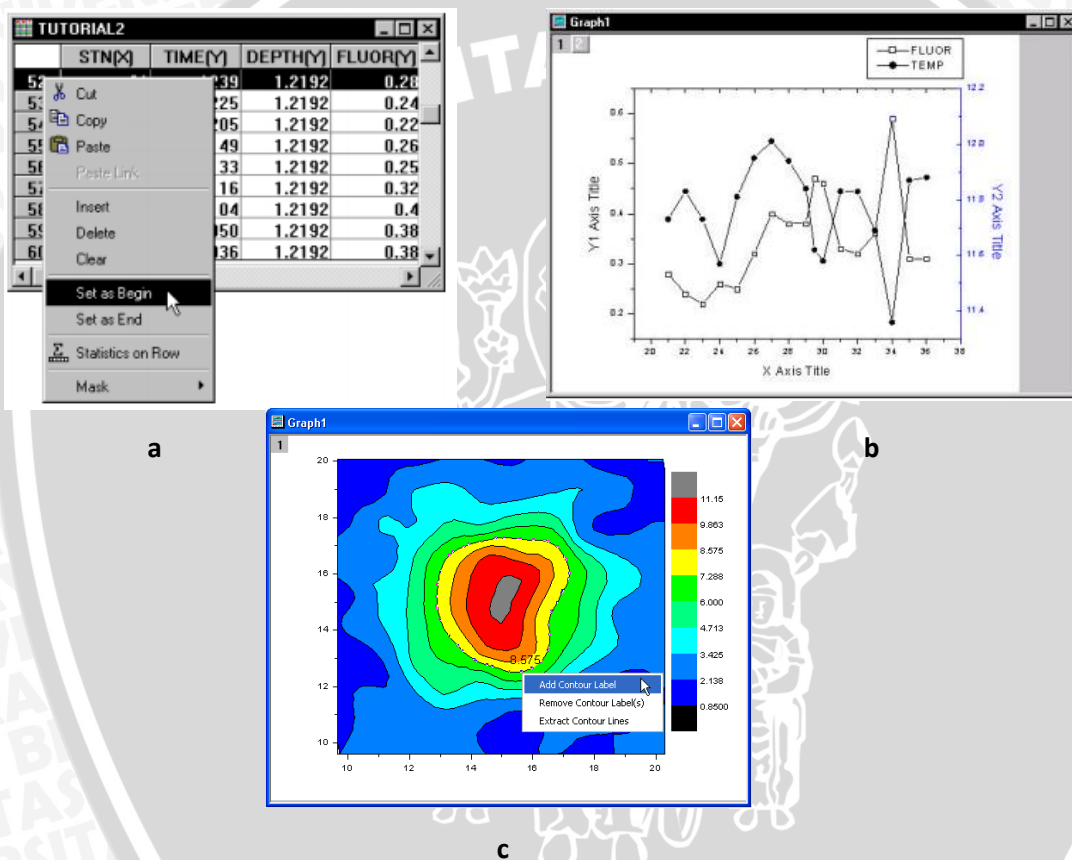
Pada temperatur di bawah atmosfer (25°C dalam keadaan STP), nitrogen sulit beraksi dengan unsur lain kecuali lithium, pada temperatur tinggi nitrogen dapat bereaksi dengan logam alkali dan alkali tanah selain itu juga dengan unsur non logam seperti oksigen dan nitrogen. Batas nitrogen untuk bereaksi yaitu di atas 1500°C. Pada penelitian ini nitrogen digunakan untuk menjaga reaksi difusi antara bahan bakar dan udara tidak terganggu dari udara di lingkungan.

Penggunaan nitrogen pada penelitian ini dikarenakan ketersediaan gas nitrogen sendiri yang sangat banyak pada udara bebas. Selain nitrogen sebenarnya gas  $\text{CO}_2$  atau

argon juga dapat digunakan sebagai gas *inert* namun apabila dibandingkan dengan gas nitrogen, CO<sub>2</sub> memiliki sifat yang lebih reaktif dan ketersediaan gas argon tidak cukup melimpah.

## 2.10 Originlab

*Origin Lab* merupakan salah satu *software* analisis data dan *scientific graphic*. Data yang dapat di olah dengan *software origin* antara lain ASCII *text*, Excel, NITDM, DIAem, NetCDF, SPC, dll. Kemudian inputan data dapat diubah menjadi JPEG, GIF, EPS, TIFF, dll.



Gambar 2.15 (a) Work sheet pada *origin pro* (b) Grafik 2D pada *origin lab* dari *worksheet* excel (c) *Plotting range* dari *worksheet* excel menjadi grafik 2D

Sumber : *Microsoft Software, Inc* (1999,p.17)

Pada penelitian ini *software origin* yang digunakan merupakan *Origin Pro 8.0*. Data yang diinput berupa data excel temperatur dari api difusi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15 (a). Data temperatur tersebut kemudian diubah menjadi grafik 2D seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.15 (b), sehingga distribusi temperatur yang terlihat pada jarak x dan y dapat divisualisasikan selain itu untuk memperjelas distribusi temperatur



pada api difusi selain menggunakan grafik juga dapat dinyatakan dengan perbedaan warna yang mewakili setiap *range* temperatur tertentu menjadi grafik 2D yang disajikan dalam bentuk *plotting* yang ditunjukkan pada gambar 2.15 (c).

### 2.11 Hipotesa

Besar sudut *swirl vanes* yang digunakan pada aliran udara dengan kecepatan udara dan bahan bakar tertentu dapat mempengaruhi visualisasi dan distribusi temperatur api dari pembakaran gas metana. Semakin besar pemasangan sudut *swirl vanes* berpengaruh terhadap distribusi temperatur dan visualisasi api karena aliran api yang dihasilkan bersifat turbulen ketika terjadi penambahan kecepatan bahan bakar ataupun udara. Pengaruh besar sudut *swirl vanes* akan menimbulkan zona resirkulasi sehingga kualitas campuran antara bahan bakar dan udara semakin baik, serta dapat meningkatkan kecepatan reaksi pembakaran.



### BAB III

## METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini adapun metode penelitian yang digunakan adalah dengan metode eksperimental, dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk mengetahui hubungan sebab akibat dengan menggunakan satu atau lebih kelompok perlakuan dan membandingkan hasilnya dengan kontrol yang digunakan sebagai pembanding. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh sudut *swirl* terhadap visualisasi api dan distribusi temperatur dari pembakaran secara difusi oleh CH<sub>4</sub>.

#### 3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mesin Fluida Fakultas Teknik Jurusan Mesin Universitas Brawijaya Malang pada bulan Juni 2016.

#### 3.2 Variabel Penelitian

Adapun variabel penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

##### 1. Variabel bebas

Variabel bebas merupakan variabel yang besarnya tidak dipengaruhi oleh variabel lain. Besar variabelnya bisa dirubah sesuai dengan kebutuhan penelitian ataupun konstan. Adapun variabel bebas dalam penelitian ini adalah:

- Sudut *swirl vanes* : 10°, 20°, dan 30°
- Kecepatan aliran bahan bakar (v) : 1,32 m/s – 15,92 m/s
- Kecepatan aliran udara aksial (udara primer) : 0,9 m/s – 2,5 m/s

##### 2. Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang besarnya dipengaruhi oleh variabel bebas dan diketahui setelah penelitian berlangsung. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah visualisasi api dan distribusi temperatur dengan variasi sudut *swirl vanes* serta penempatan *thermocouple* dari alat ukur temperatur.

##### 3. Variabel Kontrol

Variabel kontrol merupakan variabel yang besar nilainya dijaga tetap saat penelitian berlangsung. Variabel kontrol dalam penelitian ini adalah:

- Waktu pengukuran temperatur tiap – tiap titik
- Jarak pengambilan pada tiap titik suhu api difusi

### 3.3 Instrumen Penelitian

Alat yang akan dipergunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1) *Sentrifugal Fan*

*Sentrifugal Fan* dalam penelitian ini berfungsi sebagai suplai udara pembakaran. Adapun spesifikasi *blower* yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Model : *electric blower*

Ukuran : 2"

Tegangan : 220

Arus : 1 A

Putaran : 3600 rpm

#### 2) *Stop Valve*

Penggunaan *stop valve* dalam penelitian ini sebagai pengatur kapasitas bahan bakar dan udara yang digunakan selama penelitian berlangsung.

#### 3) *Flowmeter*

*Flowmeter* pada penelitian ini digunakan untuk mengukur kecepatan bahan bakar.

#### 4) *Blower*

Penggunaan *blower* pada penelitian ini digunakan untuk mengalirkan nitrogen menuju saluran udara dan nitrogen.

#### 5) Pipa Saluran Udara Primer

Pipa saluran udara primer ini digunakan untuk mengalirkan udara sebelum melewati *swirl vanes* dengan ukuran diameter pipa sebesar 1".

#### 6) Pipa Saluran Udara Sekunder

Pipa saluran udara sekunder ini digunakan sebagai saluran campuran antara nitrogen ( $N_2$ ) dengan udara, dengan ukuran diameter pipa sebesar 2".

#### 7) Pipa Saluran Bahan Bakar

Digunakan sebagai saluran bahan bakar methana ( $CH_4$ ) untuk menyuplai bahan bakar saat proses pembakaran, dengan ukuran diameter pipa sebesar 8 mm dan ketebalan pipa sebesar 2 mm.



8) Tabung Gas Nitrogen ( $N_2$ )

Tabung Gas Nitrogen berfungsi sebagai tempat untuk menampung gas Nitrogen ( $N_2$ ).

9) Tabung Gas Metana ( $CH_4$ )

Dalam penelitian ini tabung gas Methana yang berfungsi sebagai tempat untuk menampung bahan bakar  $CH_4$  yang digunakan saat penelitian berlangsung.

10) Tripod

Digunakan untuk tempat kamera ketika proses pengambilan gambar dan juga sebagai alat untuk menjaga jarak antara kamera dengan objek tidak berpinda-pindah.

11) Ruang Bakar

Ruang bakar merupakan tempat terjadinya pembakaran antara campuran udara dan bahan bakar.

12) Kamera Digital

Kamera digital berfungsi untuk mengambil gambar dari nyala api, yaitu nyala api pada saat menggunakan *swirling vanes* maupun tanpa menggunakan *swirling vanes*. Adapun spesifikasi dari kamera digital yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

Merk	: Canon
Model	: 100 D
Resolution	: 10 Mega Pixels
Optical Zoom	: 7x
File Formats	: JPEG

13) Swirl Vanes

*Swirl vanes* merupakan alat yang digunakan untuk menimbulkan pusaran berupa udara pada suatu aliran udara yang dihasilkan oleh *sentrifugal fan* yang juga mengubah aliran aksial dari udara (udara primer) menjadi aliran udara yang bersifat radial

14) Thermocouples

Penggunaan *thermocouples* pada penelitian ini sebagai sensor temperatur pada api difusi. Menggunakan *thermocouple* tipe K dengan maksimal temperatur sebesar  $1370^{\circ}C$ .

### 15) *Data Logger*

Digunakan untuk memantau suhu pada api yang diperoleh dari *thermocouple* kemudian akan ditransmisikan ke laptop atau komputer, dengan spesifikasi sebagai berikut:

*Channel* : 8 *differential*

*OS Support* : 32-bit/64bit Windows 7/8/10, and linux

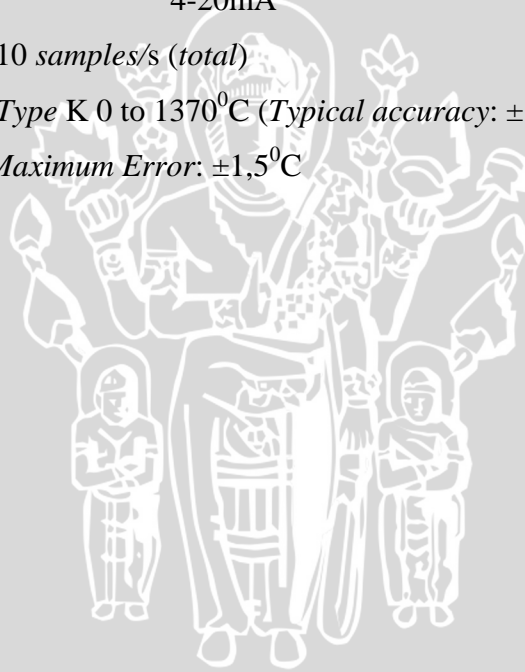
*Input Range* : J, K, T, E, R, S and B

*Uni Polar* 0-15mV, 0-50mV,  
0-100mV, 0-500mV,  
0-1V, 0-1.5V, 0-20mA,  
4-20mA

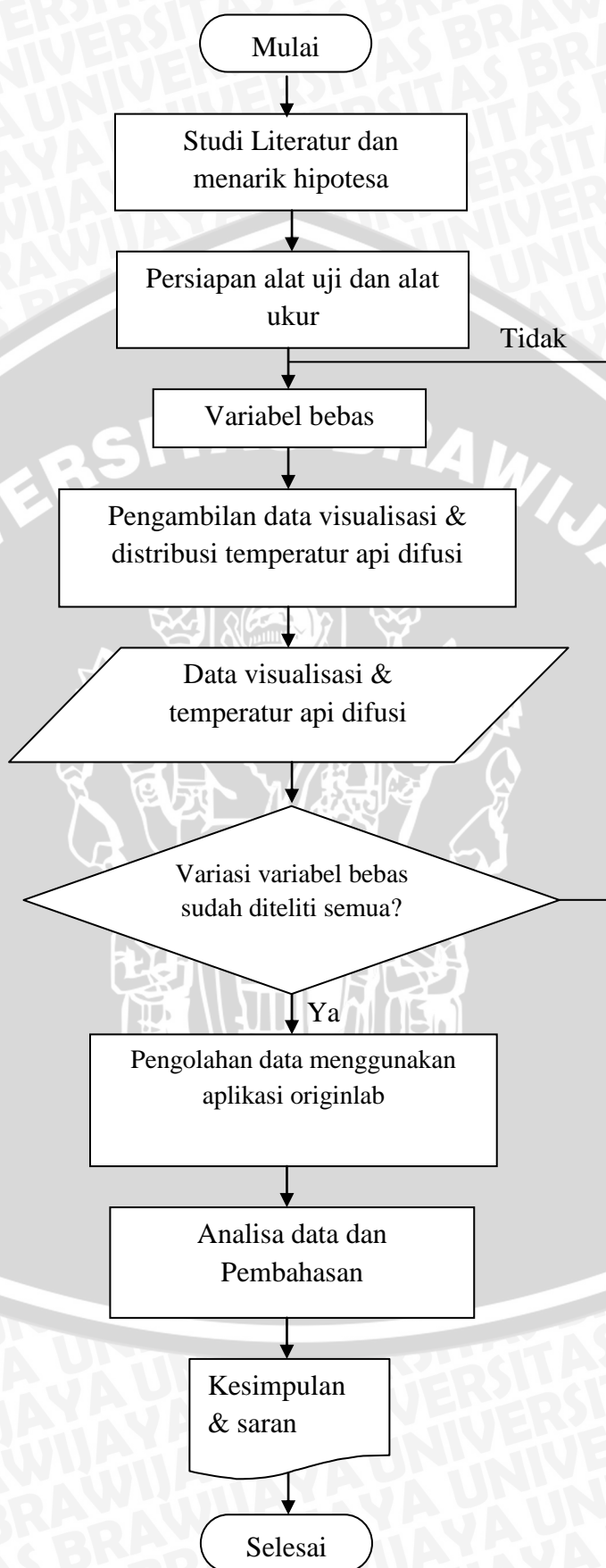
*Sampling Rate* : 10 *samples/s (total)*

*Operating Temperature* : Type K 0 to 1370<sup>0</sup>C (*Typical accuracy*: ±1,0<sup>0</sup>C,

*Maximum Error*: ±1,5<sup>0</sup>C



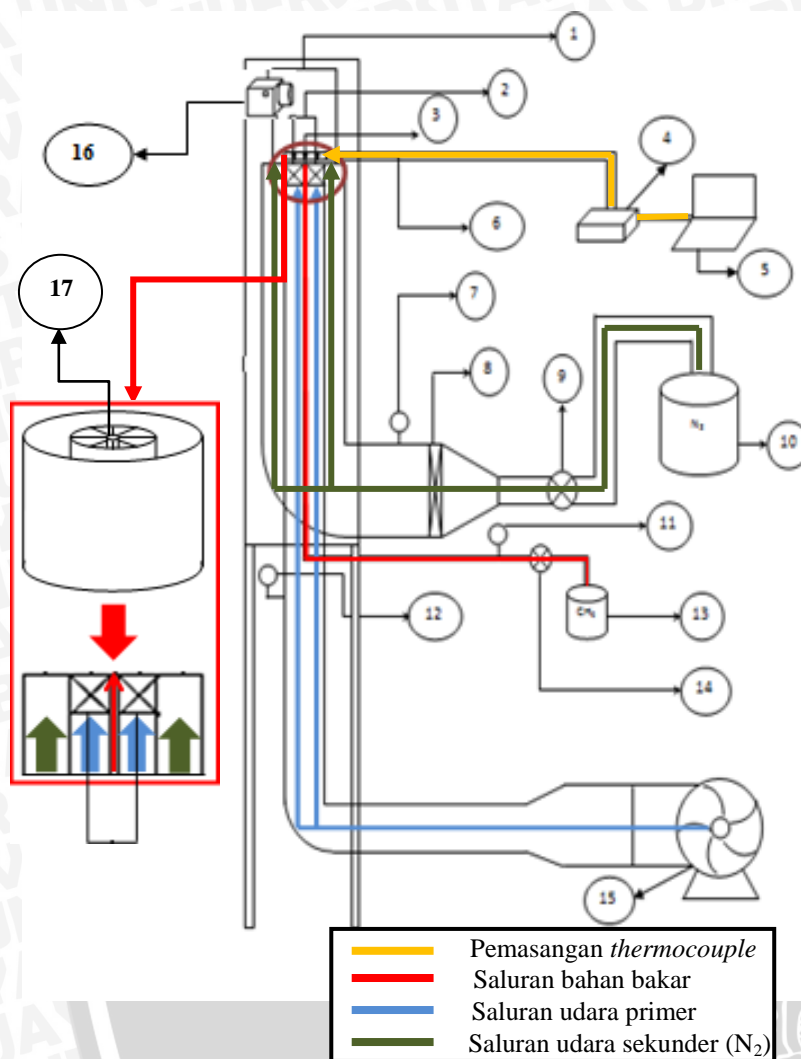
### 3.4 Diagram Alir Rancangan Penelitian



Gambar 3.1 Diagram alir penelitian



### 3.5 Instalasi Penelitian



Keterangan:

1. Pipa saluran udara dan nitrogen aksial (udara sekunder)
2. Pipa saluran aksial (udara primer)
3. Pipa saluran bahan bakar
4. *Data Logger*
5. Laptop/ komputer
6. *Thermocouple*
7. Alat ukur kecepatan udara sekunder
8. *Blower*
9. *Stop Valve* Nitrogen ( $N_2$ )
10. Tabung gas Nitrogen ( $N_2$ )
11. *Flowmeter* bahan bakar metana ( $CH_4$ )
12. *Manometer*
13. Tabung gas metana ( $CH_4$ )
14. *Stop Valve* bahan bakar metana ( $CH_4$ )
15. *Centrifugal Fan*
16. Kamera Digital

Gambar 3.2 Instalasi penelitian

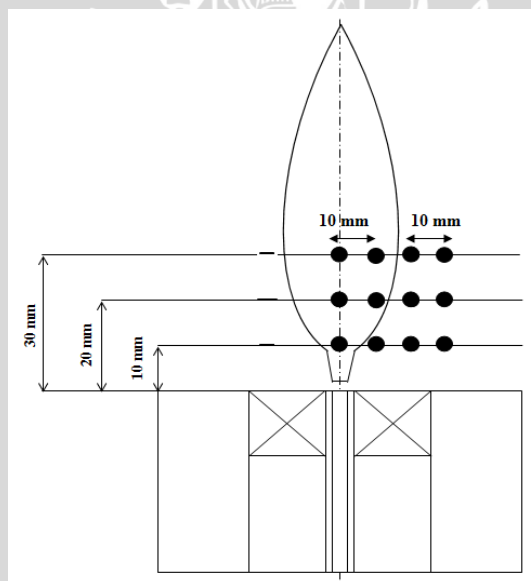
Pada gambar 3.2 menunjukkan instalasi penelitian yang digunakan, adapun garis warna biru menunjukkan arah aliran udara yang dihasilkan dari *centrifugal fan* dengan variasi kecepatan udara yang telah ditentukan. Selanjutnya, garis warna merah menunjukkan arah aliran bahan bakar dari tabung gas  $CH_4$  (metana) dengan variasi kecepatan bahan bakar yang telah ditentukan. Garis warna hijau pada gambar 3.2 menunjukkan arah aliran nitrogen dari tabung gas nitrogen ( $N_2$ ) dengan kecepatan yang telah ditentukan. Adapun fungsi dari nitrogen adalah untuk menjaga api tetap berada pada ruang bakar ketika dilakukan penambahan kecepatan bahan bakar maupun kecepatan udara. Kemudian garis warna kuning menunjukkan peletakkan *thermocouple*, di mana *thermocouple* ini tersambung dengan *data logger* yang kemudian akan membaca temperatur dari api difusi dan ditransmisikan ke laptop atau komputer. Adapun lingkaran

warna merah pada instalasi menunjukkan peletakkan *swirl vanes* pada saluran udara dengan variasi sudut yang telah ditentukan.

### 3.6 Prosedur Penelitian

#### 3.6.1 Teknik Pengambilan Data

Pengambilan data visualisasi api difusi mula – mula dengan mempersiapkan semua alat dan bahan yang diperlukan, kemudian memasang *swirl vanes* pada saluran udara sesuai dengan variasi sudut yang digunakan. Memeriksa *stop valve* pada bahan bakar dan udara dan memastikannya bahwa tidak ada kebocoran. Menghidupkan *sentrifugal fan* dan buka katup udara dan bahan bakar, yang kemudian api dinyalakan. Setelahnya, kecepatan bahan bakar dan udara diatur sesuai dengan variasi menggunakan katup bahan bakar dan udara. Setelah nyala api difusi sesuai dengan variasi yang ditentukan, data visualisasi api difusi dimasukkan ke dalam kamera dengan format video, yang setelahnya akan diubah menjadi format ke dalam bentuk JPG.



Gambar 3.3 Titik – titik pengukuran pengambilan data

Gambar 3.3 menunjukkan teknik pengambilan data temperatur api difusi dengan menggunakan *thermocouple*, mula – mula dengan mempersiapkan alat dan bahan yang diperlukan. Kemudian memasang *swirl vanes* sesuai variasi sudut yang digunakan. Memeriksa *stop valve* pada bahan bakar dan udara dan memastikannya bahwa tidak ada kebocoran. Menghidupkan *sentrifugal fan* dan buka katup udara dan bahan bakar, yang kemudian api dinyalakan. Setelahnya, kecepatan bahan bakar dan udara diatur sesuai dengan variasi menggunakan katup bahan bakar dan udara. Setelah nyala api difusi sesuai

dengan variasi yang ditentukan, langkah selanjutnya dengan mengukur temperatur api difusi. Temperatur api difusi diukur menggunakan *thermocouple* tipe K dengan temperatur ukurnya maksimal 1370<sup>0</sup>C. Data temperatur yang diambil akan ditransmisikan oleh data *logger* ke laptop. Untuk melihat kontur distribusi temperatur pada api difusi menggunakan *software OriginLab* yang disajikan dalam bentuk *plotting*. Pengambilan data temperatur dilakukan dengan jarak tiap 1 cm ke arah horizontal dan ke arah vertikal dengan menggunakan plat khusus untuk peletakkan *thermocouple*.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Penelitian

Dari penelitian yang telah dilakukan, didapat data dari masing – masing variasi penelitian, yaitu variasi besar sudut *swirl*  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ , dan  $30^\circ$ , kecepatan aliran udara yang diukur dengan manometer dan melalui *orifice* udara aksial, dan juga kecepatan aliran bahan bakar yang diukur dengan menggunakan *flowmeter*. Terjadi perbedaan tekanan pada saluran udara disebabkan karena adanya perbedaan luas penampang didalam *orrifice*. Untuk menghitung kecepatan aliran udara menggunakan persamaan Bernoulli. Data temperatur api difusi didapatkan dengan menggunakan *thermocouples* yang terhubung dengan data *logger* yang kemudian ditransmisikan ke komputer sehingga data temperatur dapat terbaca. Data temperatur diambil di beberapa titik horizontal dan vertikal, dan didapatkan hasil data temperatur yang fluktuatif. Adapun pengambilan data lain juga dilakukan, yaitu pengambilan data visualisasi api menggunakan kamera digital dengan berbagai variasi *swirl*, kecepatan udara dan kecepatan bahan bakar yang telah ditentukan.

##### 4.1.1 Data Penelitian

Pengambilan data visualisasi dilakukan dengan menggunakan kamera digital pada kecepatan bahan bakar, kecepatan udara, dan waktu tertentu. Hasil data temperatur diperoleh dari rata – rata temperatur total. Pengambilan data temperatur dilakukan secara berurutan minimal 3 titik pengukuran secara vertikal dan 3 titik horizontal pada api difusi. Dari data temperatur yang diambil terlihat adanya fluktuasi dari nilai temperatur yang kemudian jumlah dari nilai tersebut dirata – rata. Pengolahan data rata – rata temperatur menggunakan *software OriginLab*, *software* ini akan menampilkan distribusi temperatur dari data rata – rata temperatur ke dalam bentuk *plot*.

##### 4.1.2 Perhitungan Data

Perhitungan untuk massa alir udara ( $\dot{m}_{\text{udara}}$ )

Diketahui:  $\rho_{\text{ud}}$  = massa jenis udara ( $1,208 \text{ kg/m}^3$ )

$\rho_{\text{air}}$  = massa jenis air ( $1000 \text{ kg/m}^3$ )

$\Delta h$  = beda ketinggian pada manometer

- $g$  = percepatan gravitasi bumi =  $9,81 \text{ m/s}^2$   
 $\beta$  = rasio diameter *orifice* dan diameter saluran  
 $D_{ud}$  = diameter pipa udara ( $0,0254 \text{ m}$ )  
 $d_{ud}$  = diameter dalam *orifice* udara ( $0.0127 \text{ m}$ )  
 $A_{ud}$  = luas pipa udara aksial ( $0,000506451 \text{ m}^2$ )  
 $C$  = nilai yang didapatkan dari grafik hubungan kecepatan dan (munson)

Contoh perhitungan data massa alir udara aksial

Kecepatan udara aksial pada ketinggian ( $\Delta_h$  air) =  $2\text{mm}$

$\dot{m}_{udara} = \rho_{ud} \cdot A_{ud} \cdot v$ , dengan  $\Delta_h = 2\text{mm}$  (air)

$$v_{ud} = C \frac{d_{ud}^2}{D_{ud}^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_{air} \cdot g \cdot \Delta h) / 1000}{\rho_{ud} \cdot (1 - \beta^4)}}$$

$$\beta = \frac{d_{ud}}{D_{ud}} = \frac{0,0127}{0,0254} = 0,5$$

$$v = (0,61) \frac{(0,0127)^2}{(0,0254)^2} \sqrt{\frac{2(1000 \cdot 9,81 \cdot 2) / 1000}{1,2(1 - 0,5^4)}} = 0,9 \text{ m/s}$$

$$\begin{aligned} \dot{m}_{udara} &= 1,208 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot 5,06 \times 10^{-4} \text{ (m}^2) \cdot 0,9 \text{ (m/s)} \\ &= 5,21 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Bila udara keluar pada diameter  $0,0254 \text{ m}$ , maka kecepatan udaranya adalah:

$$v = \frac{5,21 \times 10^{-4}}{1,208 \times 0,00056} = 3,41 \text{ m/s}$$

Contoh perhitungan kecepatan udara

$$Q = 1 \text{ Liter/menit} = 0,0000167 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$A_{\text{bahan bakar}} = \frac{1}{4} \pi d^2 = \frac{1}{4} \cdot 3,14 \cdot (0,04 \text{ m})^2 = 0,00001256 \text{ m}^2$$

$$Q = A \cdot v$$

$$0,0000167 \text{ m}^3/\text{s} = 0,00001256 \text{ m}^2 \cdot v$$

$$v = 1,32696 \text{ m/s} = 1,32 \text{ m/s}$$

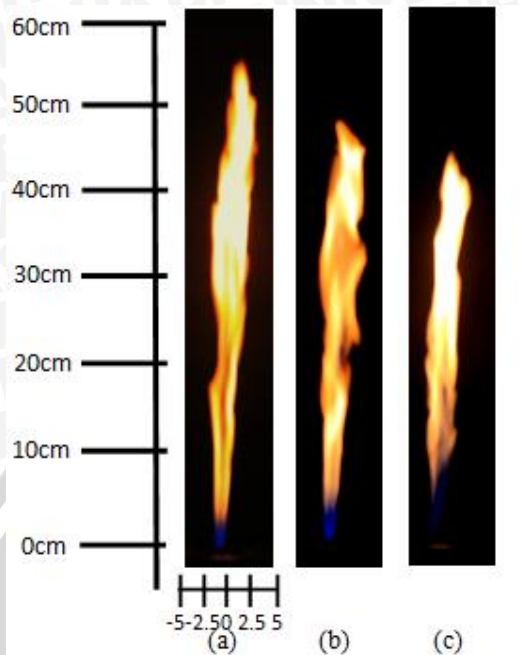
#### 4.1.3 Visualisasi Api Difusi

Pada kondisi tertentu karakter api difusi dapat dilihat melalui visualisasi api. Penelitian ini melihat pengaruh dari variasi kecepatan bahan bakar pada besar sudut *swirl* yang berbeda serta pengaruh dari kecepatan udara pada besar sudut *swirl* yang berbeda.

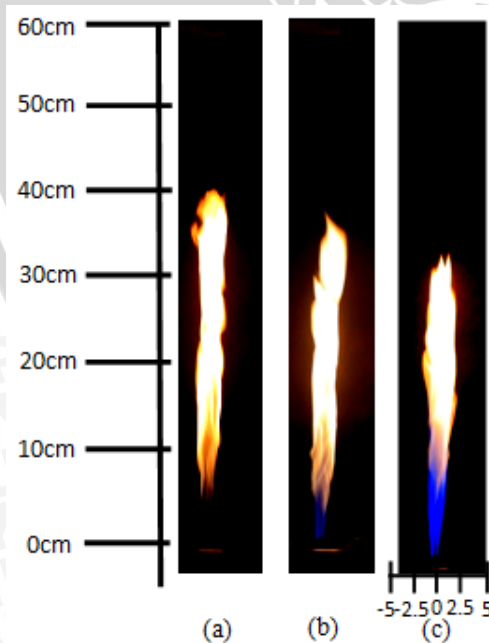
## 4.2 Pembahasan

### 4.2.1 Visualisasi Api Difusi

#### 4.2.1.1 Pengaruh Variasi Kecepatan Udara terhadap Visualisasi Api Difusi

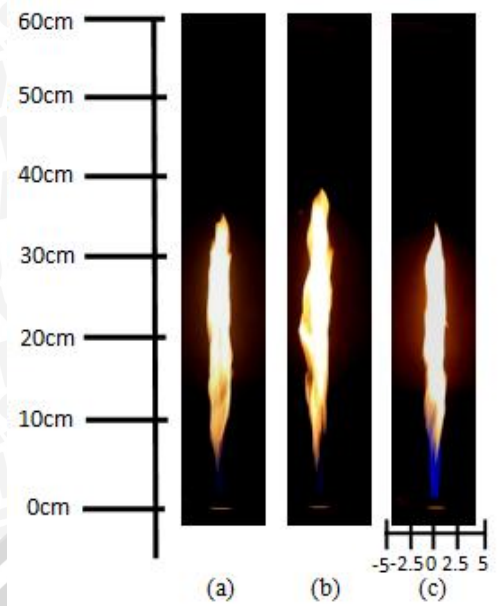


Gambar 4.1 Visualisasi Api pada Berbagai Variasi Kecepatan Udara dengan Kecepatan Bahan Bakar 5.30 m/s pada Pemasangan sudut *swirl*  $10^\circ$  (a) 0,9m/s (b) 1,04 m/s (c) 1,47 m/s



Gambar 4.2 Visualisasi Api pada Berbagai Variasi Kecepatan Udara dengan Kecepatan Bahan Bakar 5.30 m/s pada Pemasangan sudut *swirl*  $20^\circ$  (a) 0,9m/s (b) 1,04 m/s (c) 1,47 m/s





Gambar 4.3 Visualisasi Api pada Berbagai Variasi Kecepatan Udara dengan Kecepatan Bahan Bakar 5.30 m/s pada Pemasangan sudut *swirl* 30° (a) 0,9m/s (b) 1,04 m/s (c) 1,47 m/s

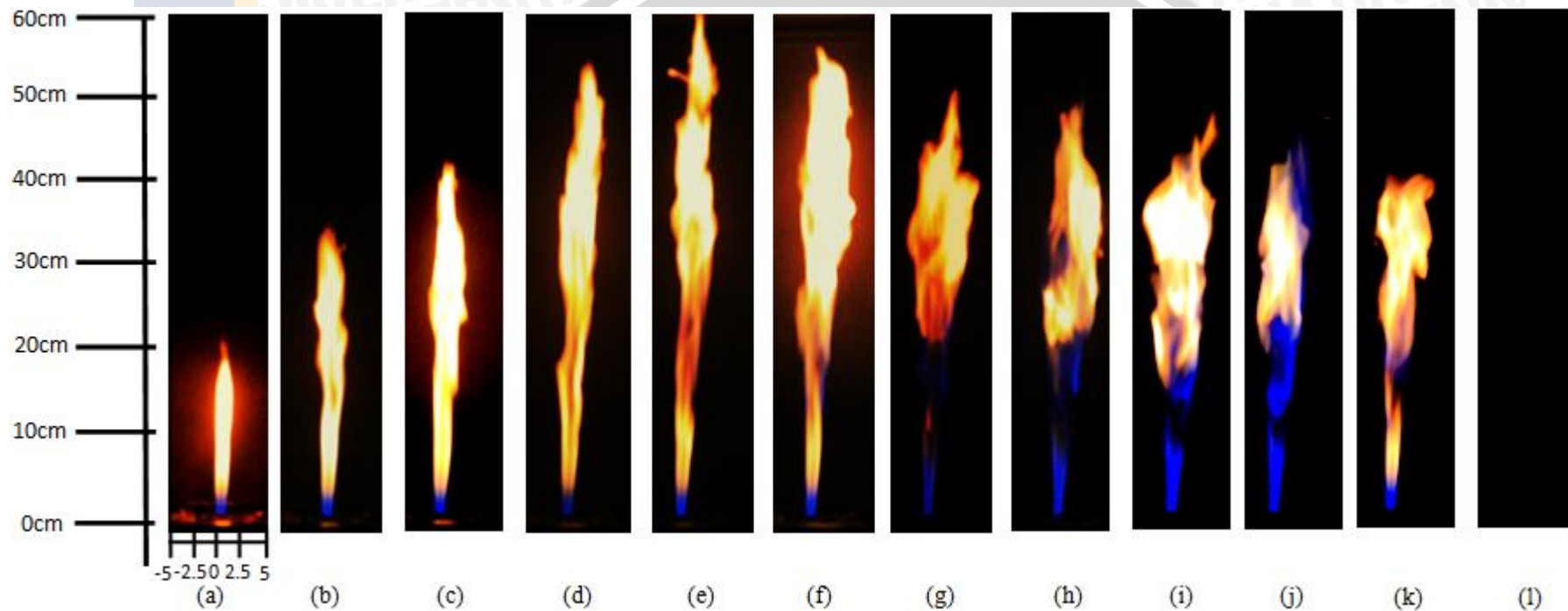
Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3 menunjukkan visualisasi api difusi pada variasi sudut *swirl* 10°, 20, dan 30° dengan menggunakan kecepatan bahan bakar 5.30 m/s serta variasi kecepatan udara a (0,9m/s), b (1,04 m/s), c (1,47 m/s). Dapat dilihat pada keseluruhan gambar visualisasi api difusi dengan seiring penambahan kecepatan udara ketinggian api mengalami penurunan. Hal ini dikarenakan kecepatan udara yang semakin tinggi, pencampuran antara bahan bakar dan udara semakin baik sebelum bahan bakar terbawa ke atas. Pada kecepatan udara yang rendah visualisasi ketinggian api lebih tinggi, hal ini dikarenakan pencampuran antara bahan bakar dan udara belum tercampur dengan baik sehingga bahan bakar terbawa ke atas karena adanya efek *buoyancy* di mana massa jenis udara lebih tinggi dibandingkan massa jenis bahan bakar. Pencampuran antara bahan bakar dan udara yang baik ditandai juga dengan warna api yang semakin biru. Dilihat dari gambar visualisasi api difusi pada gambar 4.1, 4.2, dan 4.3 besar sudut *swirl* yang semakin besar mempengaruhi ketinggian api. Di mana semakin besar sudut *swirl* yang dipakai ketinggian api semakin menurun. Hal ini disebabkan hambatan yang semakin besar pada saluran udara aksial. Penambahan *swirl* dapat membentuk zona resirkulasi pada aliran udara. Adanya zona resirkulasi ditunjukkan dengan olekan – olakan yang terjadi pada api difusi.

Visualisasi api difusi pada gambar 4.1, 4.2, 4.3 menunjukkan perbedaan yang signifikan, hal ini karena pemasangan *swirl* dengan besar sudut yang berbeda. Dapat dilihat

pada gambar 4.1 dengan variasi besar sudut  $10^\circ$  menghasilkan api yang tinggi jika dibandingkan gambar visualisasi 4.2 dan 4.3. Hal ini dikarenakan hambatan aliran pada *swirl* dengan besar sudut  $10^\circ$  lebih sedikit sehingga aliran udara aksial mengalir lebih banyak dan bereaksi dengan bahan bakar dibandingkan dengan *swirl* dengan besar sudut 20 dan  $30^\circ$ .

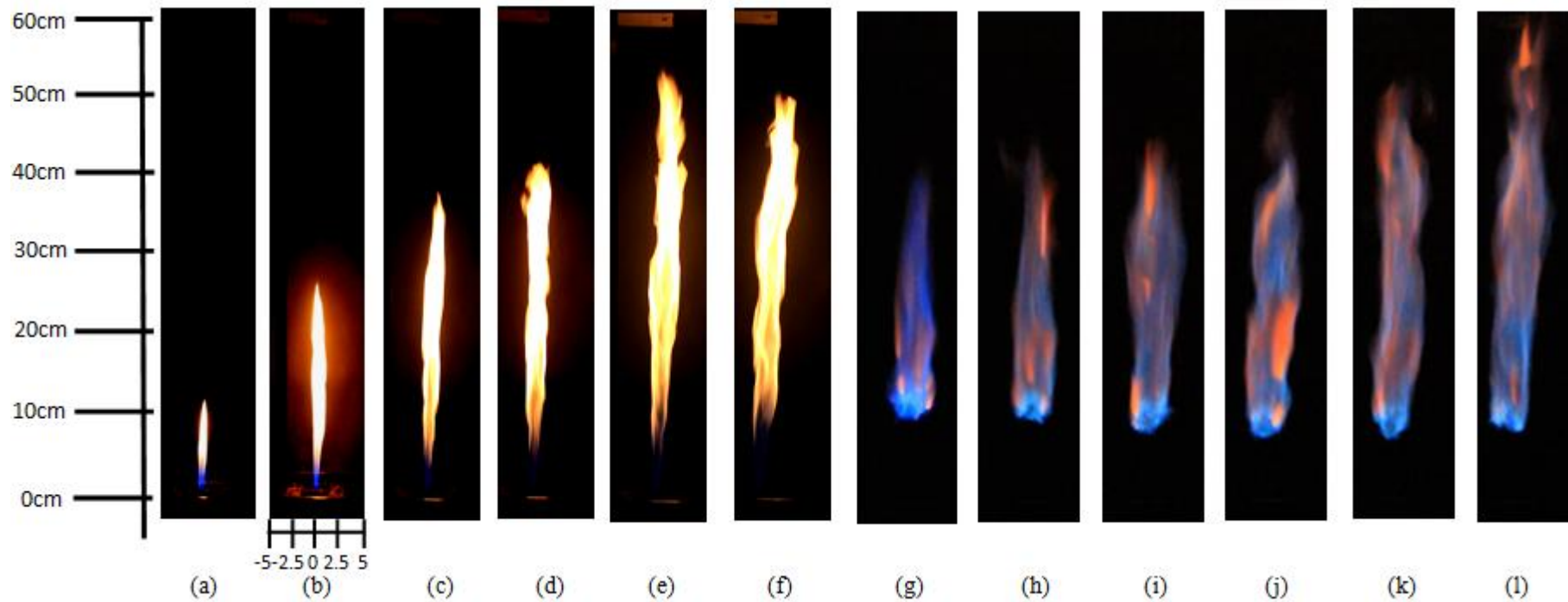


#### 4.2.1.2 Pengaruh Variasi Kecepatan Bahan Bakar terhadap Visualisasi Api Difusi

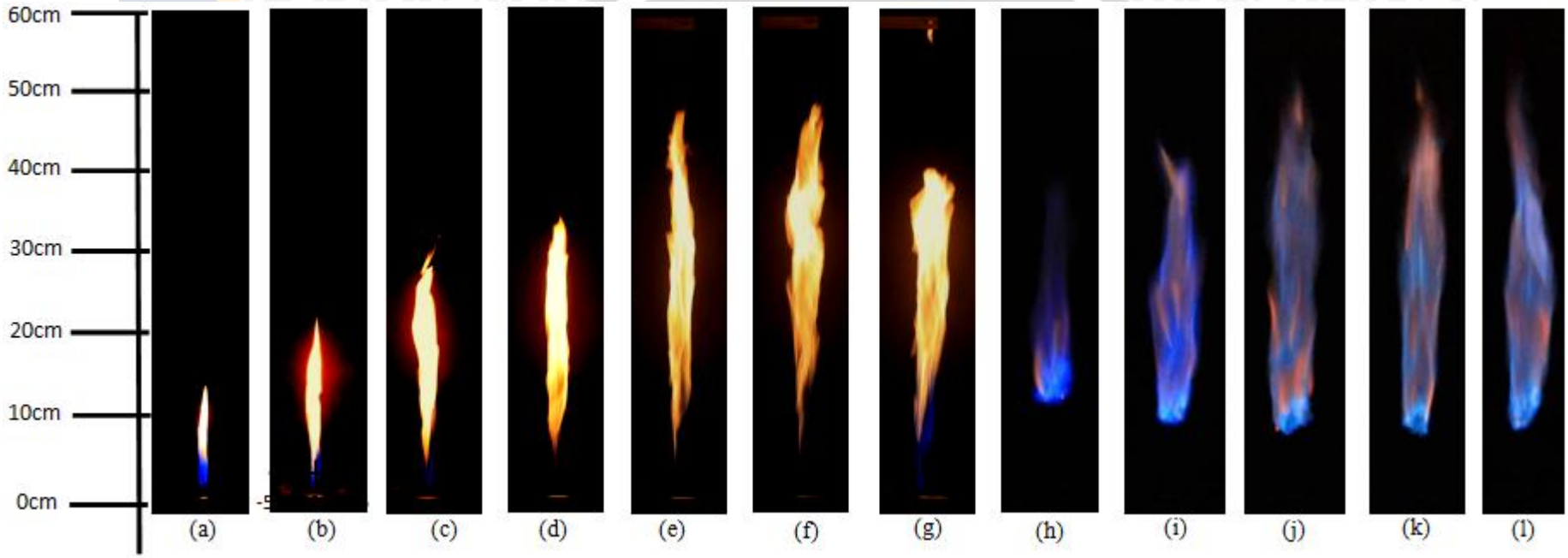


Gambar 4.4 Visualisasi api pada berbagai variasi kecepatan bahan bakar (a) 1,32 m/s; (b) 2,65 m/s; (c) 4,00 m/s; (d) 5,30 m/s; (e) 6,63 m/s; (f) 7,96 m/s; (g) 9,3 m/s; (h) 10,61 m/s; (i) 11,94 m/s; (j) 13,30 m/s; (k) 14,60 m/s; (l) 15,92 m/s dengan kecepatan udara 0,9 m/s pada pemasangan sudut *swirl* 10°





Gambar 4.5 Visualisasi api pada berbagai variasi kecepatan bahan bakar (a) 1,32 m/s; (b) 2,65 m/s; (c) 4,00 m/s; (d) 5,30 m/s; (e) 6,63 m/s; (f) 7,96 m/s; (g) 9,3 m/s; (h) 10,61 m/s; (i) 11,94 m/s; (j) 13,30 m/s; (k) 14,60 m/s; (l) 15,92 m/s dengan kecepatan udara 0,9 m/s pada pemasangan sudut *swirl* 20°



Gambar 4.6 Visualisasi Api pada Berbagai Variasi Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s; (b) 2,65 m/s; (c) 4,00 m/s; (d) 5,30 m/s; (e) 6,63 m/s; (f) 7,96 m/s; (g) 9,3 m/s; (h)10,61 m/s; (i)11,94 m/s; (j) 13,30 m/s; (k) 14,60 m/s; (l) 15,92 m/s dengan Kecepatan Udara 0,9 m/s pada Pemasangan Sudut Swirl 30°

Gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 menunjukkan gambar visualisasi api difusi pada pemasangan sudut *swirl*  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ , dan  $30^\circ$  dengan menggunakan kecepatan udara sama,  $U = 0,9\text{m/s}$  serta variasi kecepatan bahan bakar a (1.32 m/s), b (2.65 m/s), c (3.98 m/s), d (5.30 m/s), e (6.63 m/s), f (7.96 m/s), g (9,29 m/s), h (10.61 m/s), i (11.94 m/s), j (13.26 m/s), k (14.59 m/s), l (15.92 m/s). Dapat dilihat pada keseluruhan gambar seiring dengan penambahan kecepatan bahan bakar api difusi cenderung mengalami peningkatan dan kemudian mengalami penurunan. Saat penambahan kecepatan bahan bakar secara perlahan tidak banyak terjadi olakan pada api difusi, ketika kecepatan bahan bakar bertambah semakin tinggi terlihat pada api difusi terjadi olakan dan api mengalami turbulensi yang mana hal ini dapat dilihat pada grafik hubungan antara kecepatan aliran dengan ketinggian api. Kondisi turbulensi terjadi pada daerah transisi di mana api mengalami ketidakstabilan pada beberapa bagian api dan seiring dengan bertambahnya kecepatan bahan bakar api akan semakin tidak stabil dan mengakibatkan api menjadi turbulen.

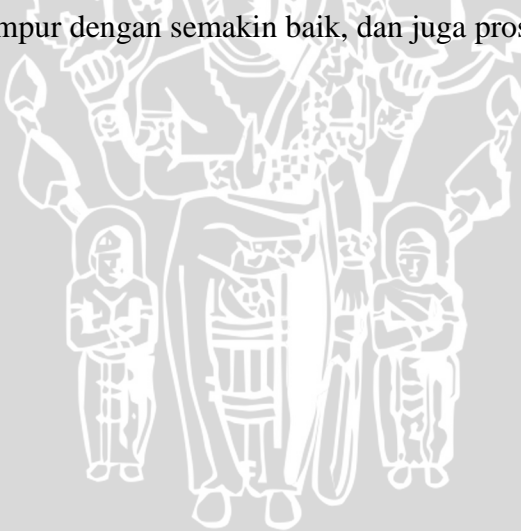
Dapat dilihat pada gambar 4.5, 4.6, 4.7 dengan pemasangan sudut *swirl* yang berbeda menghasilkan tinggi api yang berbeda pula, di mana semakin besar sudut *swirl* terjadi penurunan ketinggian api yang disebabkan karena bertambahnya hambatan pada saluran udara aksial. Semakin besar hambatan pada saluran udara maka kecepatan udara akan semakin melambat untuk melewati saluran udara aksial. Udara aksial yang terkena hambatan tersebut akan membentuk zona resirkulasi, di mana resirkulasi terjadi karena adanya aliran pusaran udara yang kuat dan ditunjukkan dengan olakan – olakan yang terjadi pada api difusi. Jika pusaran udara tersebut melewati hambatan maka akan terjadi olakan yang mengakibatkan turbulensi pada api sehingga udara dan bahan bakar dapat tercampur dengan baik. Campuran antara bahan bakar dan udara semakin baik ditandai juga dengan warna api yang semakin biru dengan seiring penambahan kecepatan bahan bakar, penambahan kecepatan bahan bakar menyebabkan aliran yang semakin turbulen, dari keseluruhan variasi bahan bakar yang digunakan dapat diketahui kondisi turbulen mulai terjadi pada kecepatan aliran bahan bakar 13,30 m/s, 14,59 m/s, dan 15,92 m/s yang memiliki bilangan reynold secara berurutan sebesar 4243.2, 4668.8, 5095.4.

Pada gambar 4.5 dapat dilihat visualisasi dari *swirl* dengan besar sudut  $10^\circ$  memiliki tinggi maksimum api 60 cm pada kecepatan bahan bakar 6,63 m/s, kemudian ketinggian api mengalami penurunan pada kecepatan bahan bakar sebesar 7,96 m/s dengan ketinggian api 52 cm. Pada kecepatan bahan bakar 15,92 m/s api sudah mengalami *blow out*. Gambar 4.6 menunjukkan visualisasi *swirl* dengan besar sudut  $20^\circ$  memiliki tinggi api maksimum sebesar 53 cm pada kecepatan bahan bakar 6,63 m/s, sedangkan api mengalami penurunan



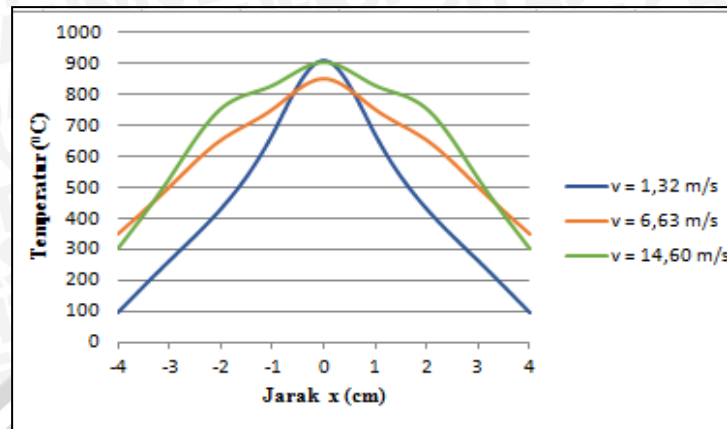
ketinggian api pada kecepatan bahan bakar 7,96 m/s dengan tinggi api sebesar 49 cm. Pada kecepatan bahan bakar 9,3 m/s api mulai mengalami *lift off*. Gambar 4.7 menunjukkan visualisasi *swirl* dengan besar sudut  $30^{\circ}$  memiliki tinggi api maksimum 50 cm pada kecepatan bahan bakar 7,96 m/s dan api mengalami penurunan ketinggian pada kecepatan bahan bakar 9,3 m/s dengan tinggi api 40 cm. Pada kecepatan bahan bakar 10,61 m/s api mulai mengalami *lift off*.

Dari gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 dapat disimpulkan bahwa *swirl* dengan besar sudut  $30^{\circ}$  memiliki intensitas turbulensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan *swirl* dengan besar sudut  $10^{\circ}$  dan  $20^{\circ}$  yang memiliki tinggi api lebih pendek. Hal ini disebabkan semakin besar hambatan pada saluran udara maka kecepatan udara akan semakin melambat untuk melewati saluran udara aksial. Sehingga udara aksial pada *swirl* sudut  $30^{\circ}$  intensitas turbulensi yang tinggi, udara aksial yang terkena hambatan tersebut akan membentuk zona resirkulasi, di mana resirkulasi terjadi karena adanya aliran pusaran udara yang kuat dan ditunjukkan dengan olakan – olakan yang terjadi pada api difusi. Selain itu, warna api menjadi biru dengan seiring penambahan kecepatan bahan bakar, hal ini dikarenakan bahan bakar dan udara bercampur dengan semakin baik, dan juga proses difusi yang terjadi pada api menjadi lebih cepat.

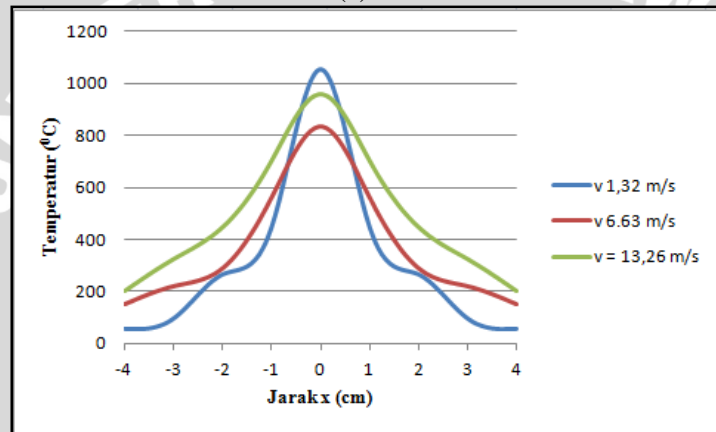


## 4.2.2 Distribusi Temperatur Api Difusi

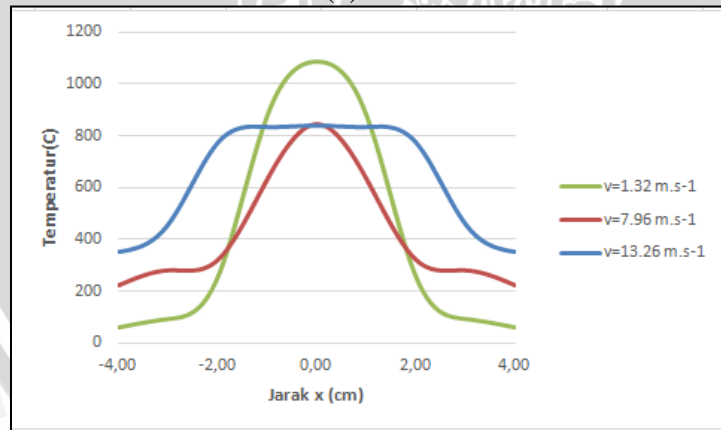
### 4.2.2.1 Distribusi Temperatur Api Difusi pada Variasi Kecepatan Bahan Bakar



(a)



(b)



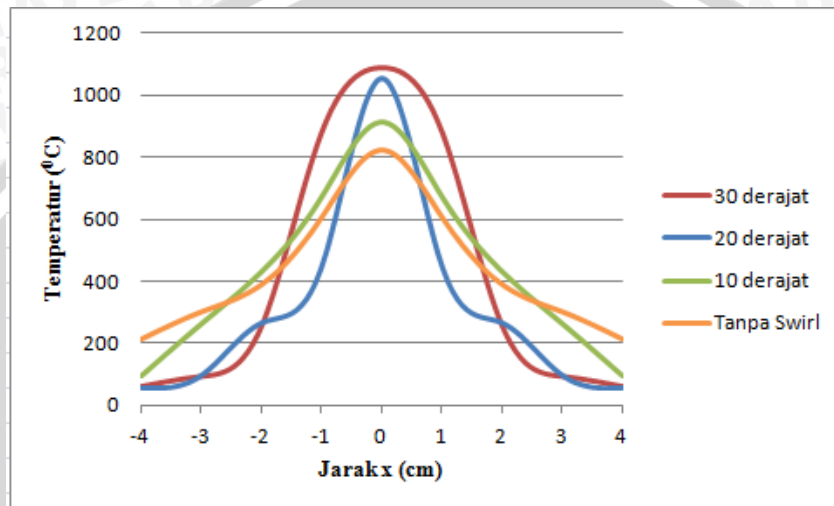
(c)

Gambar 4.7 Grafik Hubungan Temperatur Rata-rata pada Sumbu y terhadap Sumbu x Api Difusi pada *swirl* (a) Sudut  $10^\circ$  (b) Sudut  $20^\circ$  (c) Sudut  $30^\circ$  dengan Kecepatan Udara 0.08 m/s

Gambar 4.7 menunjukkan grafik hubungan temperatur rata – rata pada sumbu y terhadap sumbu x api difusi pada variasi sudut swirl, pada grafik c dengan besar sudut

*swirl*  $30^0$  memiliki temperatur rata – rata pada sumbu y tertinggi dibandingkan dengan *swirl* dengan sudut  $10^0$  dan  $20^0$ . Pada *swirl* dengan sudut  $30^0$  memiliki intensitas turbulensi yang tinggi, yang disebabkan karena adanya hambatan yang besar. Semakin besar tingkat turbulensi api, energi kinetik dari molekul bahan bakar serta udara juga akan semakin meningkat sehingga temperaturnya juga meningkat.

#### 4.2.2.2 Distribusi Temperatur Api Difusi pada Variasi *Swirl*



Gambar 4.8 Grafik Hubungan Temperatur Rata-rata Sumbu y terhadap Sumbu x Api Difusi pada variasi *swirl* dengan Kecepatan Bahan Bakar 1.32 m/s dan Kecepatan Udara 0.08 m/s.

Gambar 4.4 menunjukkan grafik hubungan antara temperatur rata – rata sumbu y terhadap sumbu c api difusi pada variasi sudut *swirl*  $10^0$ ,  $20^0$ , dan  $30^0$ . ditunjukkan pada *swirl* dengan sudut  $30^0$ , kemudian  $20^0$ , dan yang terakhir adalah  $10^0$ . Besarnya sudut sangat mempengaruhi distribusi temperatur api difusi, dengan semakin besarnya penambahan sudut *swirl* juga berpengaruh terhadap aliran api yang akan langsung mempengaruhi temperatur api.

Semakin besar sudut yang digunakan pada pemasangan *swirl* akan semakin besar hambatan pada api difusi yang akan menimbulkan resirkulasi dan akan menyebabkan turbulensi yang ditunjukkan dengan terjadinya olakan – olakan pada api, dengan adanya resirkulasi mempengaruhi pencampuran bahan bakar dan udara. Bahan bakar dan udara yang telah tercampur akan kembali ke mulut *burner* di mana campuran tadi akan memanaskan kembali gas bahan bakar yang baru keluar dari saluran bahan bakar, sehingga

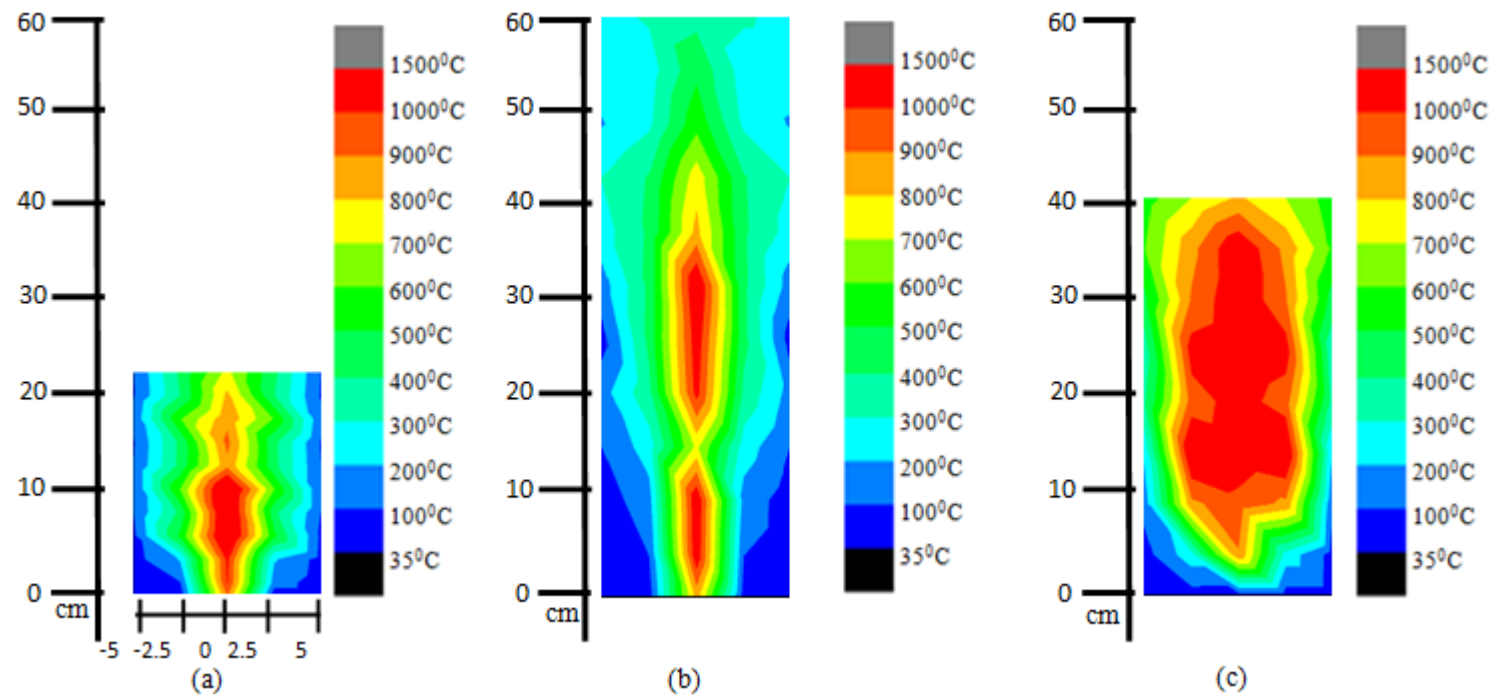


akan terjadi pemanasan awal sebelum bercampur dengan udara dengan begitu campuran bahan bakar dan udara akan menjadi semakin baik.

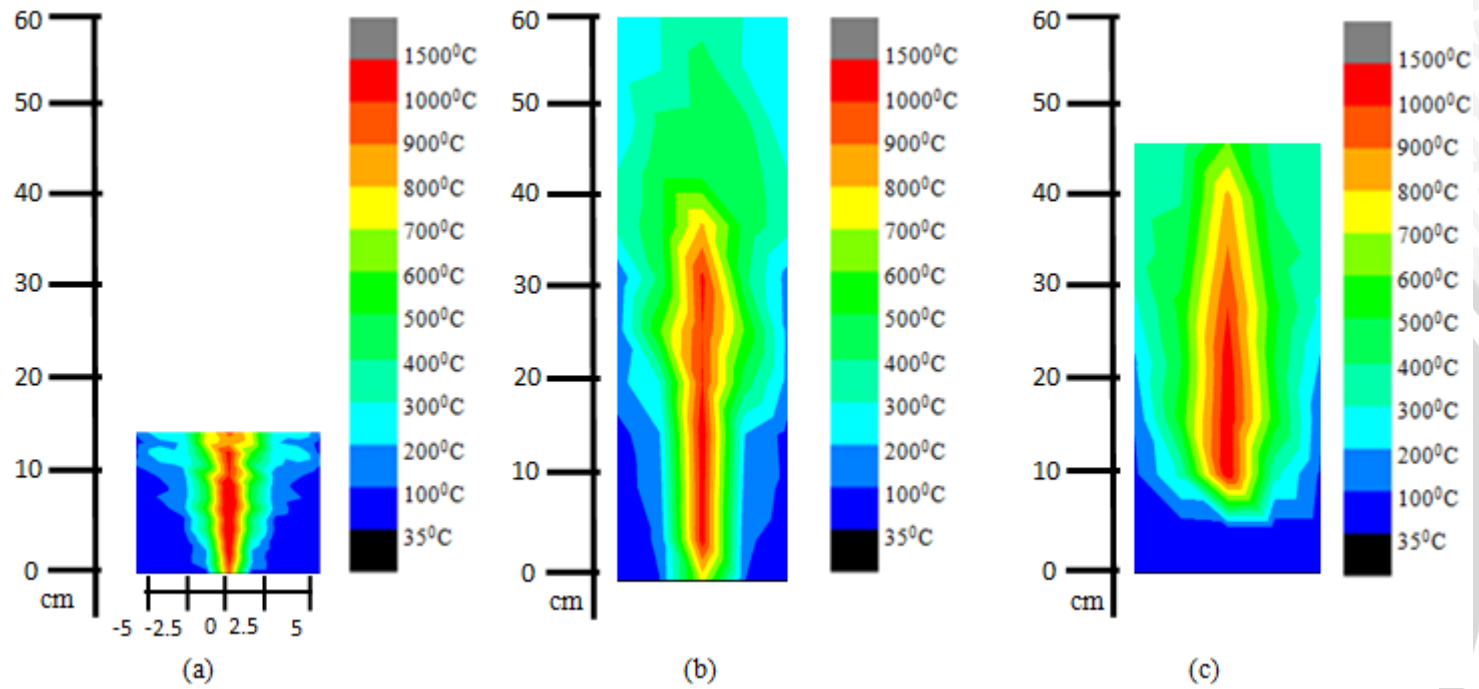
Setelah melihat grafik hubungan dari temperatur rata – rata sumbu x dan sumbu y dengan kecepatan bahan bakar sama dan variasi kecepatan udara, berikut pada gambar 4.5, 4.6, dan 4.7 menunjukkan kontur distribusi temperatur pada api difusi dengan variasi sudut *swirl*.



### 4.2.3 Pengaruh Variasi Kecepatan Bahan Bakar terhadap Kontur Distribusi Temperatur



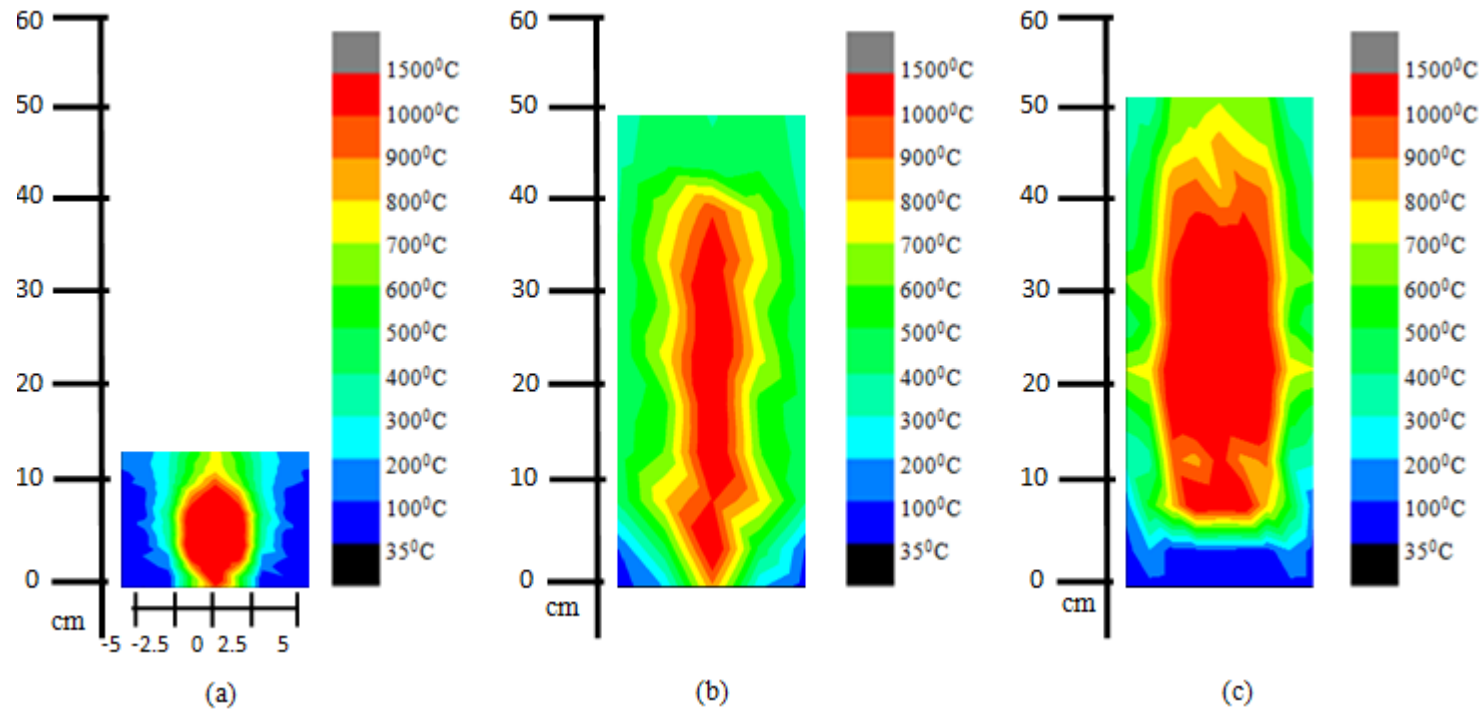
Gambar 4.9 Kontur Distribusi Temperatur Sudut Swirl 10° dengan Variasi Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 6,63 m/s (c) 14,60 m/s



Gambar 4.9 Kontur Distribusi Temperatur Sudut *Swirl* 20° dengan Variasi Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 6,63 m/s (c) 13,26 m/s







Gambar 4.10 Kontur Distribusi Temperatur Sudut Swirl  $30^\circ$  dengan Variasi Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 6,63 m/s (c) 14,60 m/s

Pada gambar 4.8, 4.9, dan 4.10 menunjukkan distribusi temperatur dari variasi besar sudut *swirl*  $10^\circ$ ,  $20^\circ$ , dan  $30^\circ$  yang disajikan dalam bentuk *plotting*. Warna yang terdapat dalam *plotting* distribusi temperatur menunjukkan besar nilai dari temperaturnya. Warna merah menunjukkan temperatur yang paling tinggi dan memiliki luasan yang lebih besar pada kecepatan bahan bakar yang paling besar dibandingkan dengan kecepatan bahan bakar yang kecil. Adapun hal ini disebabkan adanya kecepatan aliran bahan bakar yang bertambah sehingga mengakibatkan terjadinya turbulensi. Keadaan turbulensi mengakibatkan atom – atom udara dan bahan bakar bertumbukan dengan kecepatan tinggi di mana keadaan ini dapat meningkatkan temperatur api dan hal ini sesuai dengan prinsip *transport phenomena*. Seiring dengan meningkatnya kecepatan bahan bakar dapat dilihat pada temperatur bagian tengah api selalu memiliki temperatur yang lebih tinggi.

Gambar 4.8, 4.9, 4.10 menunjukkan pemasangan *swirl* sangat mempengaruhi distribusi temperatur api difusi. Gambar 4.8 menunjukkan *swirl* dengan besar sudut  $10^\circ$  dengan kecepatan bahan bakar 1, 32 m/s, temperatur api paling tinggi ditunjukkan pada bagian saluran bahan bakar saja. Pada gambar 4.9 *swirl* dengan besar sudut  $20^\circ$  dengan kecepatan bahan bakar yang sama, dapat dilihat temperatur mulai tersebar merata dan tidak hanya pada saluran bahan bakar saja. Gambar 4.10 menunjukkan pemasangan *swirl* dengan besar sudut  $30^\circ$  dengan kecepatan bahan bakar yang sama memiliki distribusi temperatur yang lebih merata yang ditandai dengan luasan dari warna merah yang semakin melebar. Perbedaan warna pada *swirl* dengan besar sudut  $30^\circ$  juga tidak terlalu banyak, yang artinya temperatur pada *swirl* sudut  $30^\circ$  terdistribusi secara merata dibandingkan dengan *swirl* sudut  $10^\circ$  dan  $20^\circ$ .

Semakin besar sudut *swirl* maka hambatan pada saluran aliran udara aksial juga semakin bertambah besar yang akan membelokkan arah udara dan akan membentuk resirkulasi. Resirkulasi ini terjadi karena adanya aliran pusaran udara yang kuat yang ditunjukkan dengan adanya olakan – olakan yang menyebabkan turbulensi pada api difusi, sehingga meningkatkan temperatur yang dilepas oleh api difusi.





## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang telah dilakukan dan didapatkan hasil penelitian, dapat disimpulkan bahwa *swirl vanes* dengan sudut  $10^0$  memiliki tinggi api yang paling tinggi jika dibandingkan *swirl* sudut  $20^0$  dan  $30^0$ , di mana semakin besar sudut *swirl vanes* menghasilkan visualisasi tinggi api yang semakin rendah. Seiring meningkatnya kecepatan bahan bakar dan kecepatan udara konstan maka tinggi api juga akan semakin meningkat kemudian pada kecepatan bahan bakar tertentu tinggi api mulai menurun. Selain itu, Pada kecepatan udara yang rendah dengan kecepatan bahan bakar yang konstan pada semua jenis *swirl vanes* menunjukkan visualisasi ketinggian api lebih tinggi. Variasi besar sudut *swirl vanes* berpengaruh terhadap distribusi temperatur api difusi. Semakin besar sudut yang digunakan distribusi temperatur api difusi semakin merata dan juga temperatur api semakin meningkat. *Swirl vanes* dengan distribusi paling merata, yaitu *swirl* dengan sudut  $30^0$ ,  $20^0$ ,  $10^0$ . Kemudian, Besar sudut *swirl*  $30^0$  pada kecepatan bahan bakar 1,32 m/s memiliki temperatur rata – rata pada sumbu y tertinggi dibandingkan dengan *swirl* dengan sudut  $10^0$  dan  $20^0$ . Semakin besar sudut *swirl vanes* memiliki temperatur rata – rata pada sumbu y tertinggi. Selanjutnya, pada penambahan kecepatan bahan bakar dan kecepatan udara konstan untuk semua jenis *swirl vanes* menunjukkan semakin tinggi kecepatan bahan bakar maka distribusi temperaturnya semakin merata.

#### 5.2 Saran

1. Sebaiknya dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan variasi kecepatan bahan bakar yang lebih besar.
2. Sebaiknya dilakukan variasi terhadap bahan bakar yang digunakan (selain metana).
3. Sebaiknya dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai efek dari penggabungan antara jumlah sudu *swirl*, besar sudut *swirl*, dan bentuk *swirl* terhadap distribusi temperatur.



# UNIVERSITAS BRAWIJAYA

## LAMPIRAN





## Lampiran 1

Jenis Swirl : Sudut  $10^{\circ}$ 

Kecepatan Udara : 0,9 m/s

Kecepatan Bahan Bakar : 1,32 m/s

X (cm) \ Y (cm)	Temperatur Rata – Rata ( $^{\circ}$ C)		
	0	2	4
1	721,91	47,61	34,40
2	967,10	88,00	36,32
4	775,78	93,98	41,85
6	790,85	137,32	49,21
8	757,86	208,61	51,51
10	820,63	439,20	76,26
12	678,66	256,20	72,31
14	731,94	338,95	69,41
16	689,44	463,61	74,90
18	644,95	332,94	86,68
20	587,63	245,35	120,74

Jenis *Swirl* : Sudut  $10^{\circ}$   
Kecepatan Udara : 0,9 m/s  
Kecepatan Bahan Bakar : 6,63 m/s

X (cm) \ Y (cm)	Temperatur Rata – Rata ( $^{\circ}\text{C}$ )		
	0	2	4
1	650,78	100,81	61,990
6	898,91	141,08	65,12
12	1051,47	916,27	120,17
18	1058,84	1020,98	152,41
24	1101,03	984,77	271,94
30	1154,50	939,85	607,39
36	1015,14	937,80	756,96
42	861,71	754,28	590,86
48	670,02	615,06	494,23
54	460,97	366,40	327,64
60	446,76	399,69	407,64

Jenis *Swirl* : Sudut  $10^{\circ}$   
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s  
 Kecepatan Bahan Bakar : 14,60 m/s

X (cm) \ Y (cm)	Temperatur Rata – Rata ( $^{\circ}$ C)		
	0	2	4
1	48,01	54,12	56,92
5	891,34	262,72	61,11
10	966,13	876,20	125,11
15	1074,24	1129,31	209,05
20	1053,72	943,53	371,87
25	1103,49	1048,59	323,80
30	1094,68	909,99	460,94
35	1097,32	869,84	587,40
40	814,46	699,42	550,68





Jenis *Swirl* : Sudut 20<sup>0</sup>  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s  
 Kecepatan Bahan Bakar : 1,32 m/s

X (cm) Y (cm)	Temperatur Rata – Rata (°C)				
	0	1	2	3	4
1	931,553	346,498	349,842	27,990	28,448
2	1054,969	138,936	346,498	30,716	28,860
3	1111,583	196,061	398,212	32,367	29,273
4	1082,731	295,297	340,986	28,665	30,876
5	1174,571	585,929	532,033	45,835	28,988
6	1129,735	366,727	84,709	41,095	35,699
7	1212,429	754,356	146,692	53,928	52,602
8	1203,482	419,928	149,900	118,245	44,960
9	1127,478	409,518	125,108	76,827	52,602
10	971,9985	643,124	158,971	104,464	59,165
11	973,946	530,349	292,503	125,938	94,663
12	977,607	530,196	239,369	257,243	78,409
13	935,853	517,708	220,329	158,083	62,355
14	909,553	550,400	347,051	257,243	171,846

Jenis *Swirl* : Sudut 20<sup>0</sup>  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s  
 Kecepatan Bahan Bakar : 6,63 m/s

X (cm) \ Y (cm)	Temperatur Rata – Rata (°C)		
	0	2	4
1	841,7915	54,08711	45,49256
5	1083,783	101,6961	44,07632
10	1100,666	158,6776	47,52592
15	726,2118	251,2729	52,34211
20	1036,591	377,2486	158,3236
25	1070,656	427,2456	58,00865
30	1125,127	423,8291	151,599
35	829,9863	417,6242	256,2541
40	759,287	409,2532	300,1385
45	567,6334	282,8766	191,6047
50	477,1047	252,8242	248,7376
55	369,4035	313,9714	264,1376

Jenis *Swirl* : Sudut  $20^{\circ}$   
Kecepatan Udara : 0,9 m/s  
Kecepatan Bahan Bakar : 10,61 m/s

X (cm) \ Y (cm)	Temperatur Rata – Rata ( $^{\circ}$ C)		
	0	2	4
1	31,42799	53,77831	57,83702
5	48,75006	45,5022	45,64584
10	1110,509	372,3477	71,994201
15	3094,886	657,7304	127,9302
20	1095,082	542,9802	265,9706
25	1091,65	676,914	27,58879
30	703,0164	580,7501	394,5699
35	850,946	687,3536	429,3726
40	627,4824	408,5962	385,8114





Jenis *Swirl* : Sudut 30<sup>0</sup>  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s  
 Kecepatan Bahan Bakar : 1,32 m/s

X (cm) Y (cm)	Temperatur Rata – Rata (°C)				
	0	1	2	3	4
1	816,7578	587,778	27,04329	24,18161	64,89604
2	1167,963	541,71	28,02567	47,26634	31,14334
3	1266,23	133,523	133,5232	37,67824	31,99722 2
4	1278,696	1144,54	200,1717	53,25169	31,06343
5	1282,866	1289,14	321,99863	38,02745	31,59743
6	1294,45	1218,82	1161,88	40,58818	32,37185
7	1258,149	1228,04	353,4257	65,01673	29,05991
8	1281,984	1174,44	439,4868	46,91684	30,04721
9	1242,883	635,407	344,7084	90,36551	46,72405
10	1103,975	830,183	314,2361	112,5508	53,48303
11	945,6834	645,106	301,2905	113,5781	77,9368
12	833,9524	561,906	287,0425	142,6707	74,73124
13	715,8693	540,793	303,2575	181,0499	148,7993
14	725,4168	555,381	320,7674	98,08908	172,6989

Jenis *Swirl* : Sudut 30<sup>0</sup>  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s  
 Kecepatan Bahan Bakar : 6,63 m/s

X (cm) Y (cm)	Temperatur Rata – Rata (°C)				
	0	1	2	3	4
1	833,8022	246,9397	40,83583	52,30666	40,80874
5	1072,849	637,6885	56,90467	108,4461	70,07493
10	983,3081	1115,281	3250,89	182,8814	108,5959
15	1244,518	713,2287	422,5591	539,6678	397,5135
20	1088,296	692,8644	317,6674	321,9733	272,9999
25	1010,037	810,3519	345,0288	272,8258	149,4178
30	787,2052	559,1127	448,6688	276,7609	257,4395
35	765,8309	656,2158	474,3143	336,792	252,9705
40	650,1708	596,9211	425,8122	312,3423	279,7993
45	410,6943	468,5106	388,7067	337,6934	294,1303
50	438,7975	450,944	332,2349	317,4761	298,8906

Jenis *Swirl* : Sudut 30<sup>0</sup>  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s  
 Kecepatan Bahan Bakar : 14,60 m/s

X (cm) \ Y (cm)	Temperatur Rata – Rata (°C)				
	0	1	2	3	4
1	27,2737	43,3282	53,97474	67,9873	61,5550
5	64,0122	56,30591	53,01133	191,507	59,8907
10	1113,37	1154,616	805,6403	522,159	129,180
15	1048,55	864,5138	919,5335	356,063	321,593
20	1117,75	1173,812	1100,608	553,4682	444,748
25	1071,47	1161,878	1161,583	748,7426	703,7563
30	1144,85	1083,92	1031,848	562,332	404,538
35	1161,48	1140,635	1029,166	653,425	611,096
40	1035,56	1054,111	954,0997	572,058	419,067
45	792,466	941,3575	885,3754	533,169	404,313
50	838,520	737,4896	683,1821	451,564	356,391
55	677,711	614,3092	623,61	303,906	329,261



Jenis *Swirl* : Tanpa *Swirl*  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s  
 Kecepatan Bahan Bakar : 1,32 m/s

X (cm) Y (cm)	Temperatur Rata – Rata ( $^{\circ}$ C)				
	0	1	2	3	4
1	428.4352	340.98	253.5247	156.1415	58.75834
2	603.0288	384.8238	166.6188	108.0114	49.40406
3	933.3372	531.3734	129.4097	87.93172	46.45377
4	789.4678	452.3514	115.2351	83.41459	51.5941
5	1058.3	617.1333	175.9664	111.6917	47.41694
6	906.5896	522.6289	138.6681	97.70367	56.73921
7	1046.291	722.0983	397.9054	248.1087	98.31197
8	931.56	573.5303	215.5007	138.6684	61.83609
9	895.1732	611.9208	328.6684	190.4614	52.25443
10	955.8986	642.2835	328.6684	193.0636	57.45886
11	598.7911	456.1831	313.5751	185.7517	57.92831
12	959.8986	666.391	372.8834	230.7272	88.57102

Lampiran 2

**Perhitungan Bilangan Reynold Kecepatan Bahan Bakar**

• **Contoh Perhitungan**

$$Re = \frac{v \cdot d}{\nu}$$

$$Re = \frac{10,61 \times 0,0004}{1,61 \times 10^{-5}} = 3395,2$$

Keterangan:

V = kecepatan bahan bakar (m/s)

d = diameter bahan bakar (m)

$\nu$  = viskositas gas metana pada suhu 25<sup>0</sup>C

v bahan bakar (m/s)	Bilangan Reynold
1,32	422,40
2,65	848,00
3,98	1273,60
5,3	1696,00
6,63	2121,60
7,96	2547,20
9,29	2972,80
10,61	3395,20
11,94	3820,80
13,26	4243,20
14,59	4668,80
15,92	5094,40

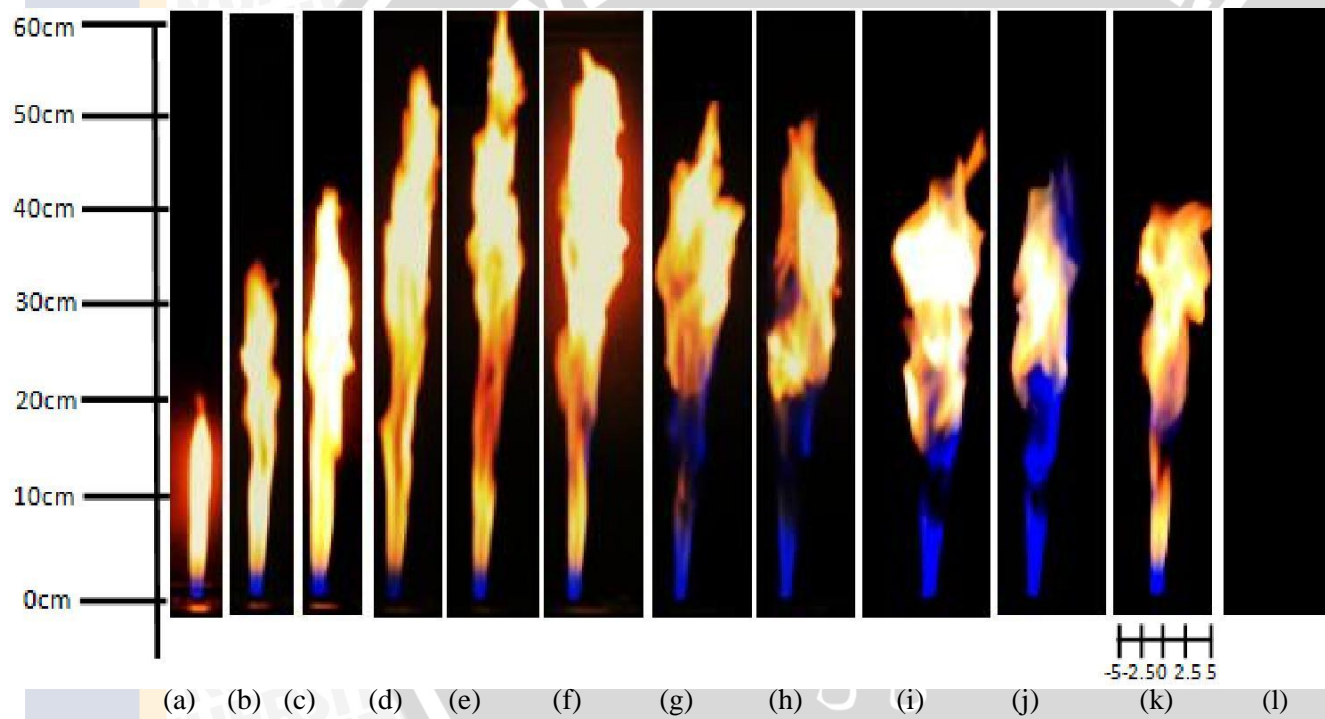




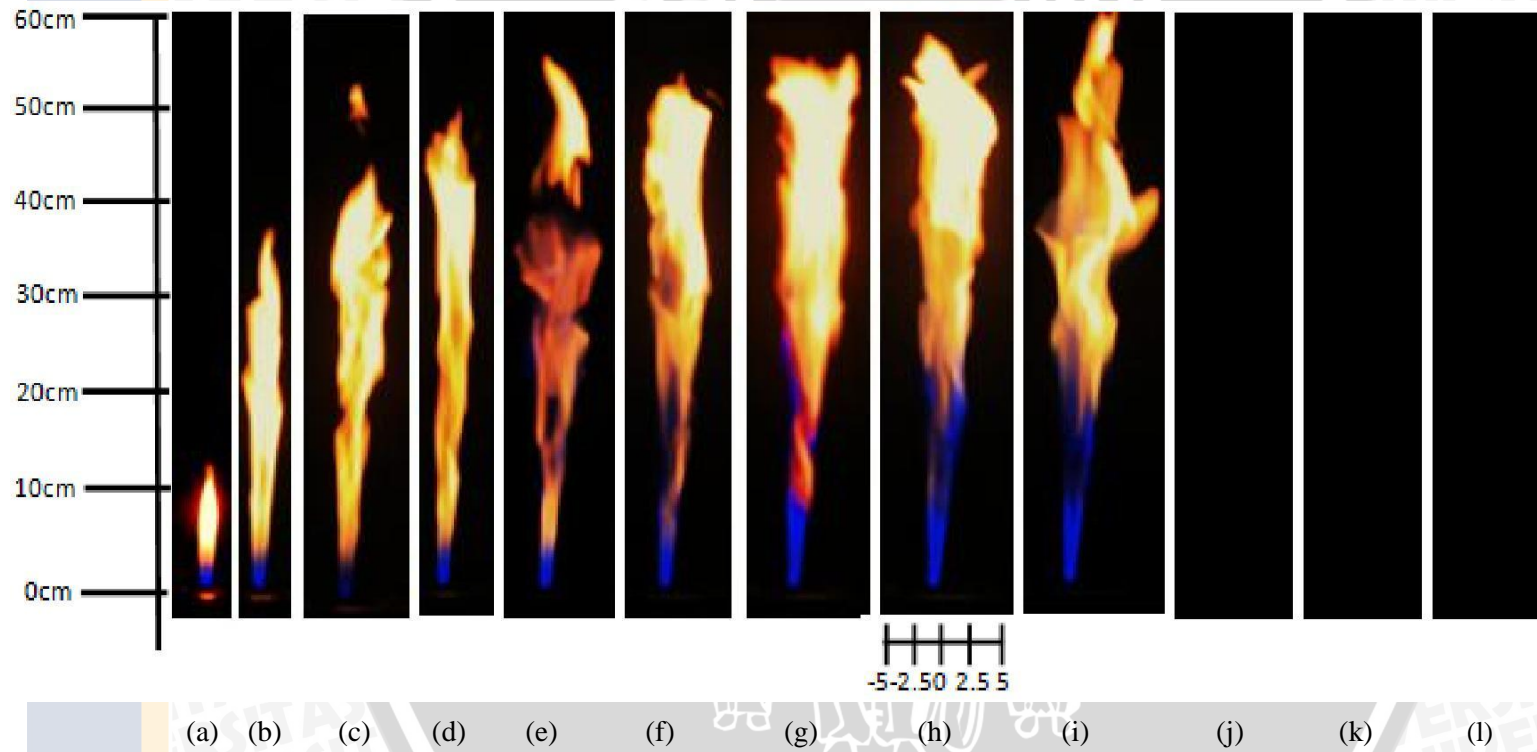
Lampiran 3

Swirl Vanes Sudut  $10^{\circ}$

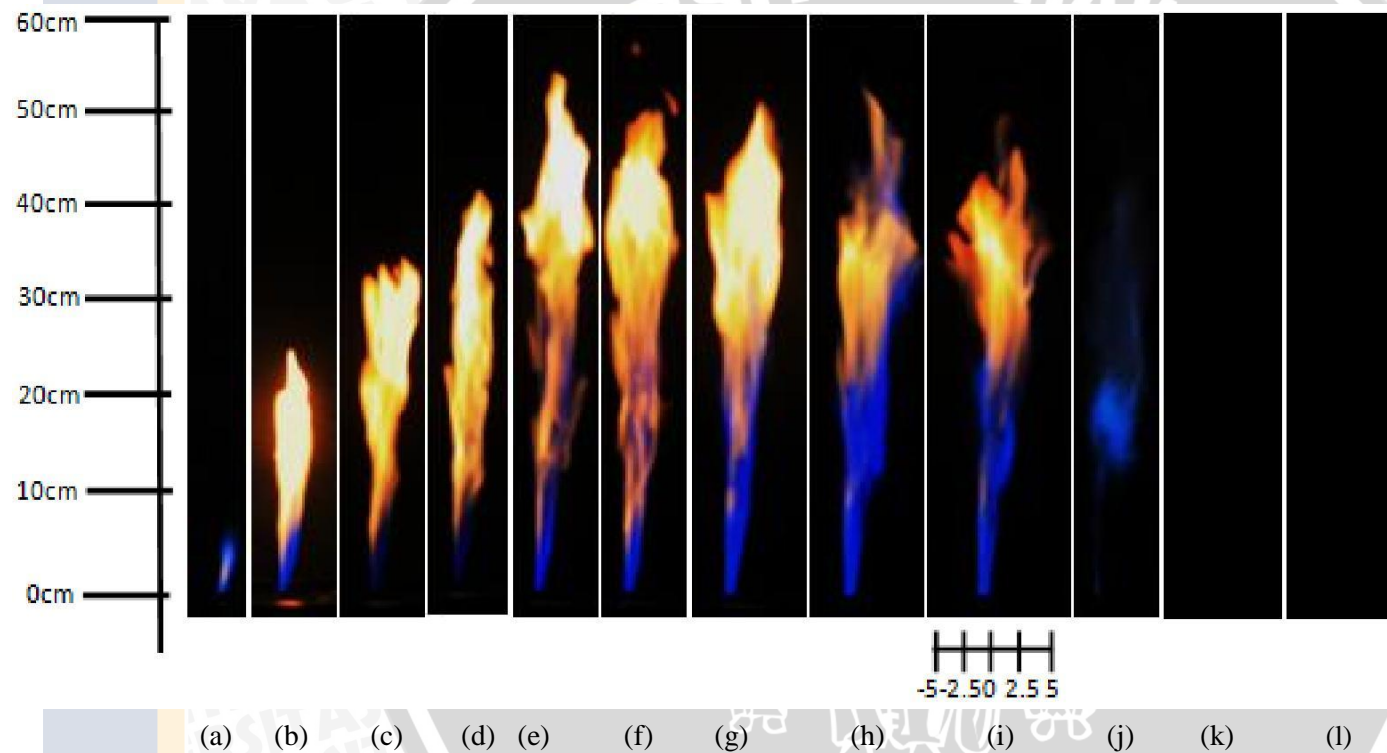
Kecepatan Udara 0,9 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s



Kecepatan Udara 1,04 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

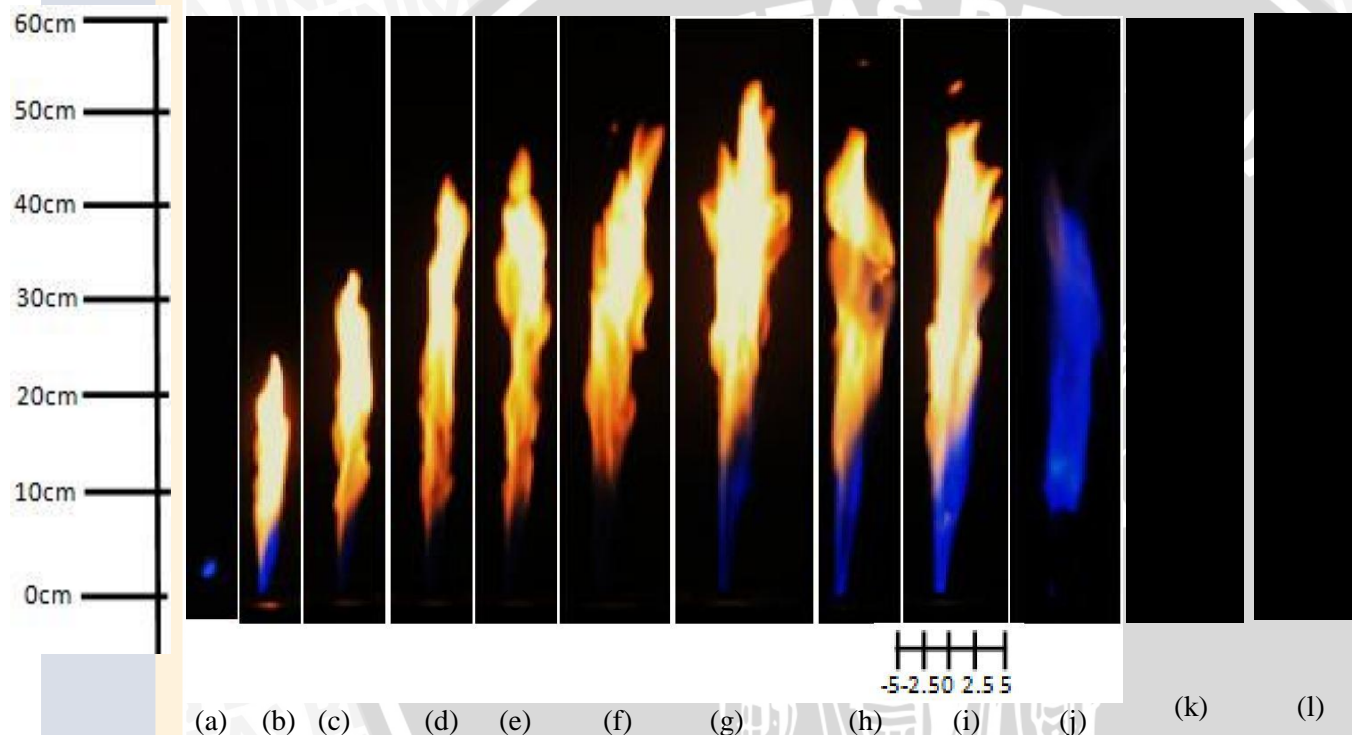


Kecepatan Udara 1,47 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

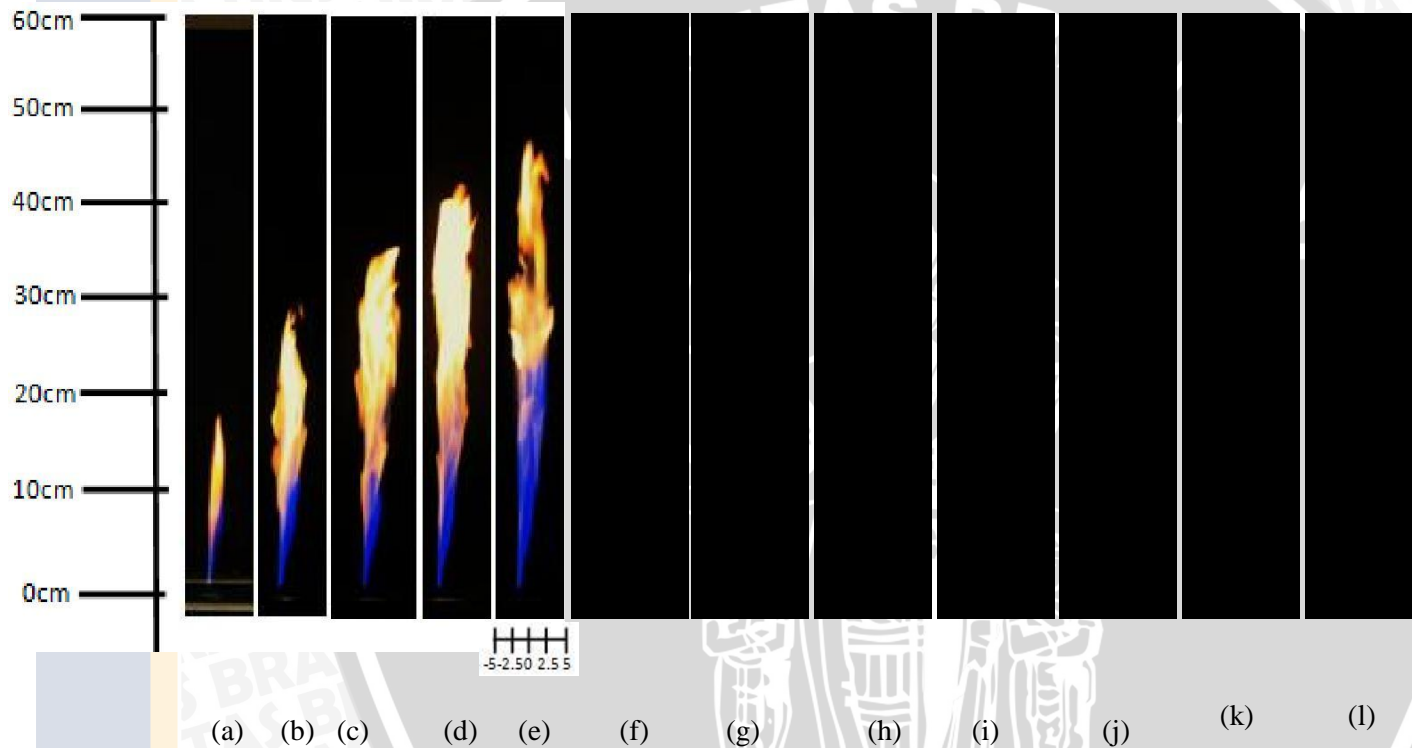




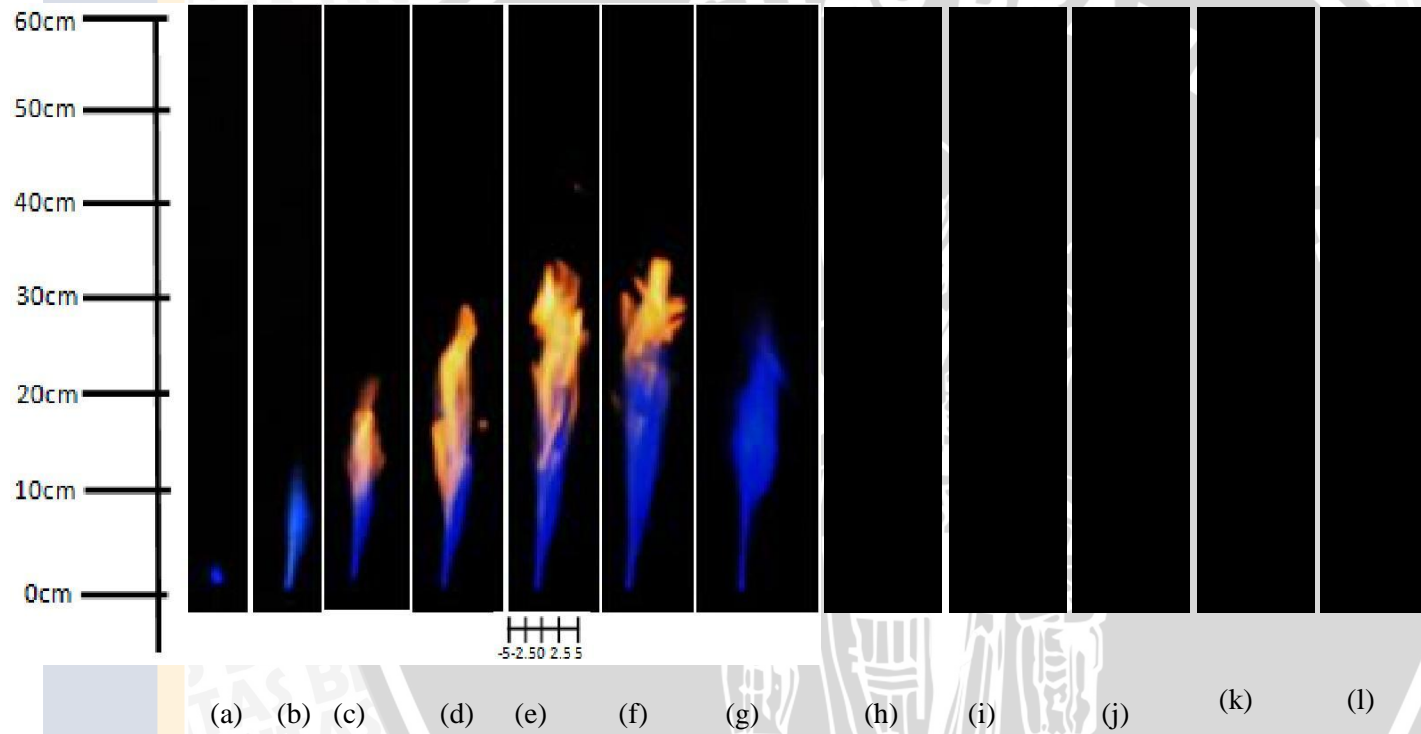
Kecepatan Udara 0,15 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s



Kecepatan Udara 0,19 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s



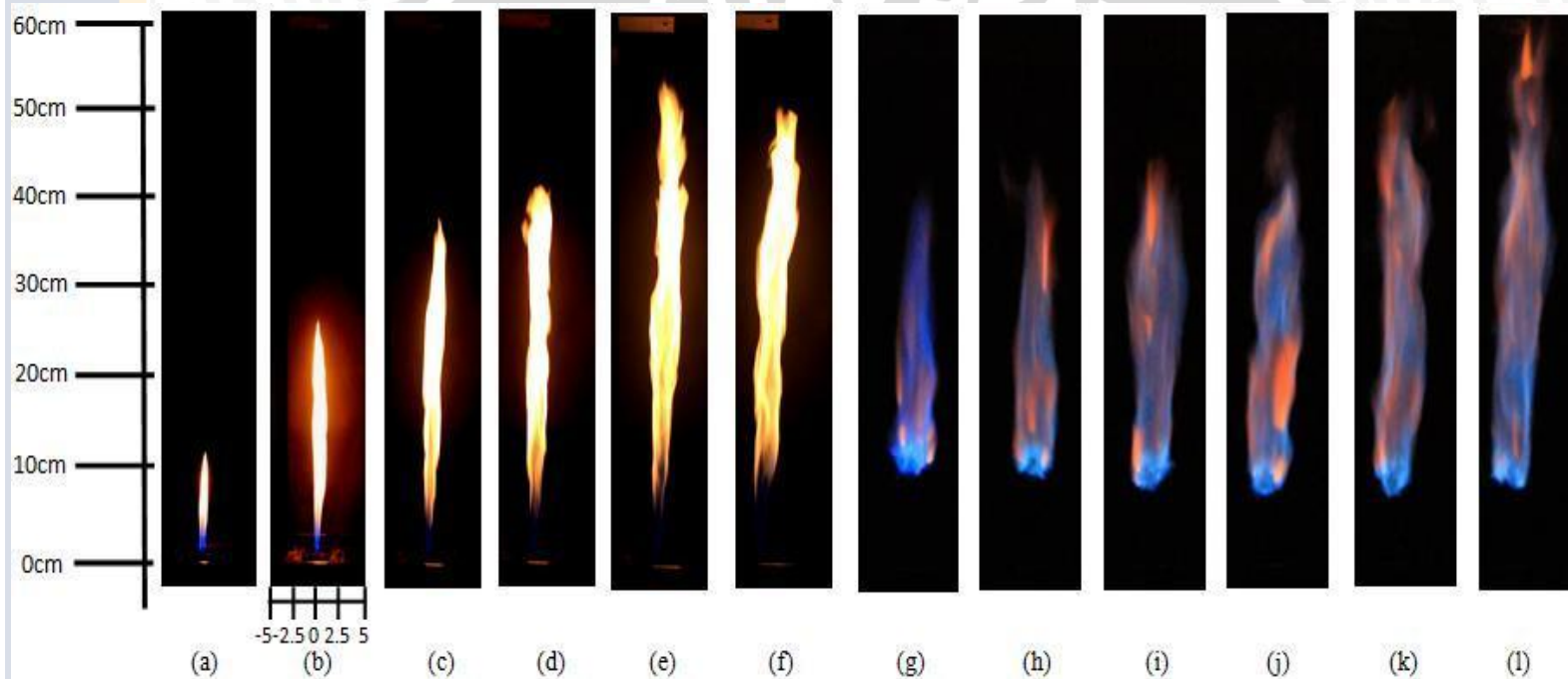
Kecepatan Udara 2,5 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s



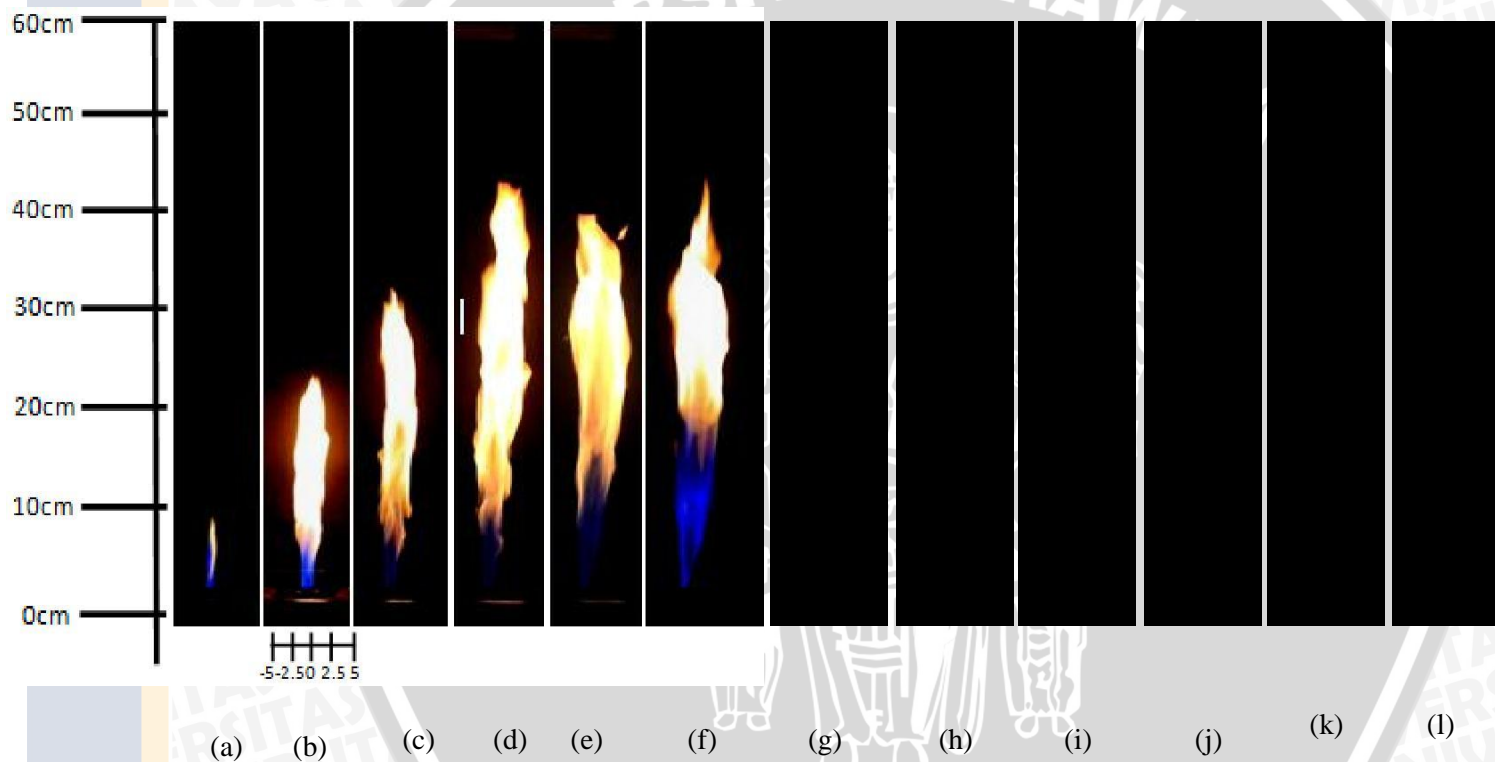


Swirl Vanes Sudut  $20^{\circ}$

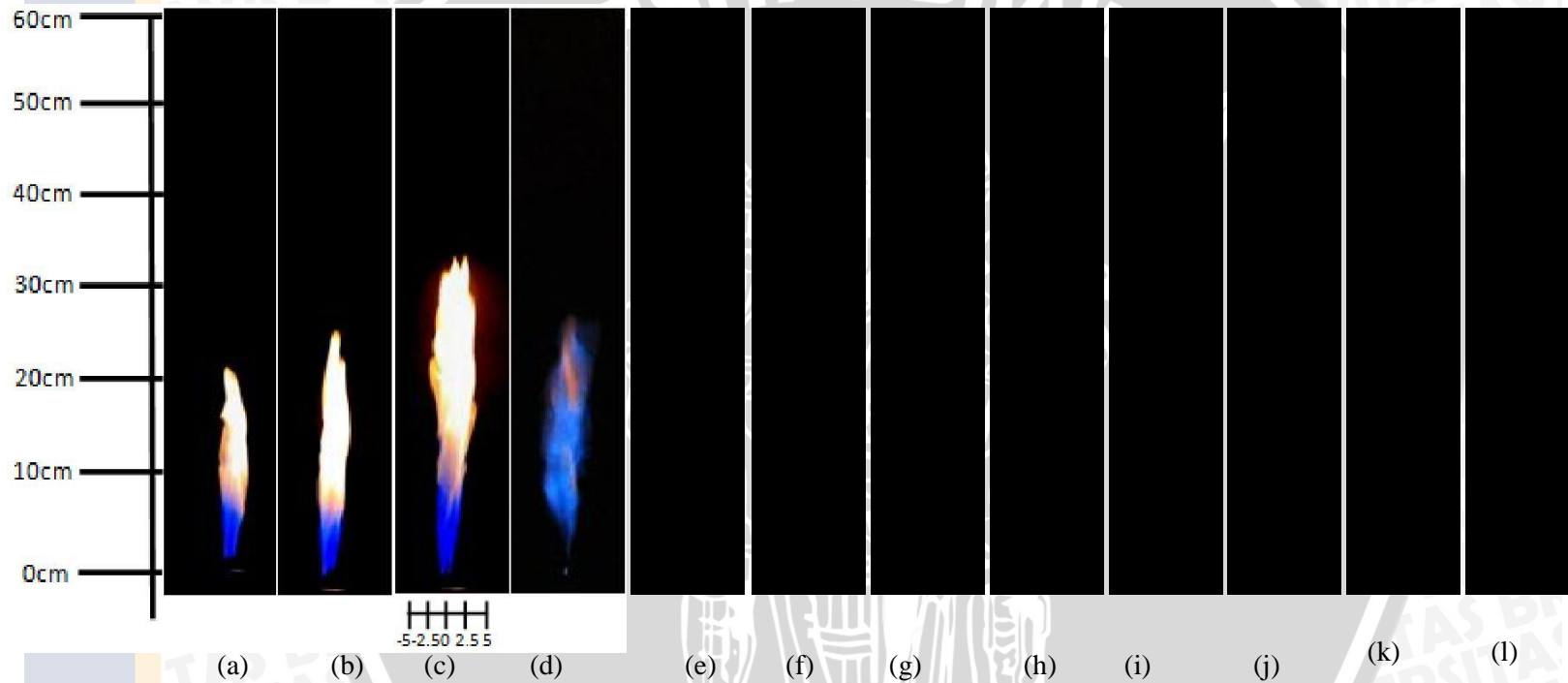
Kecepatan Udara 0,9 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s



Kecepatan Udara 1,04 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

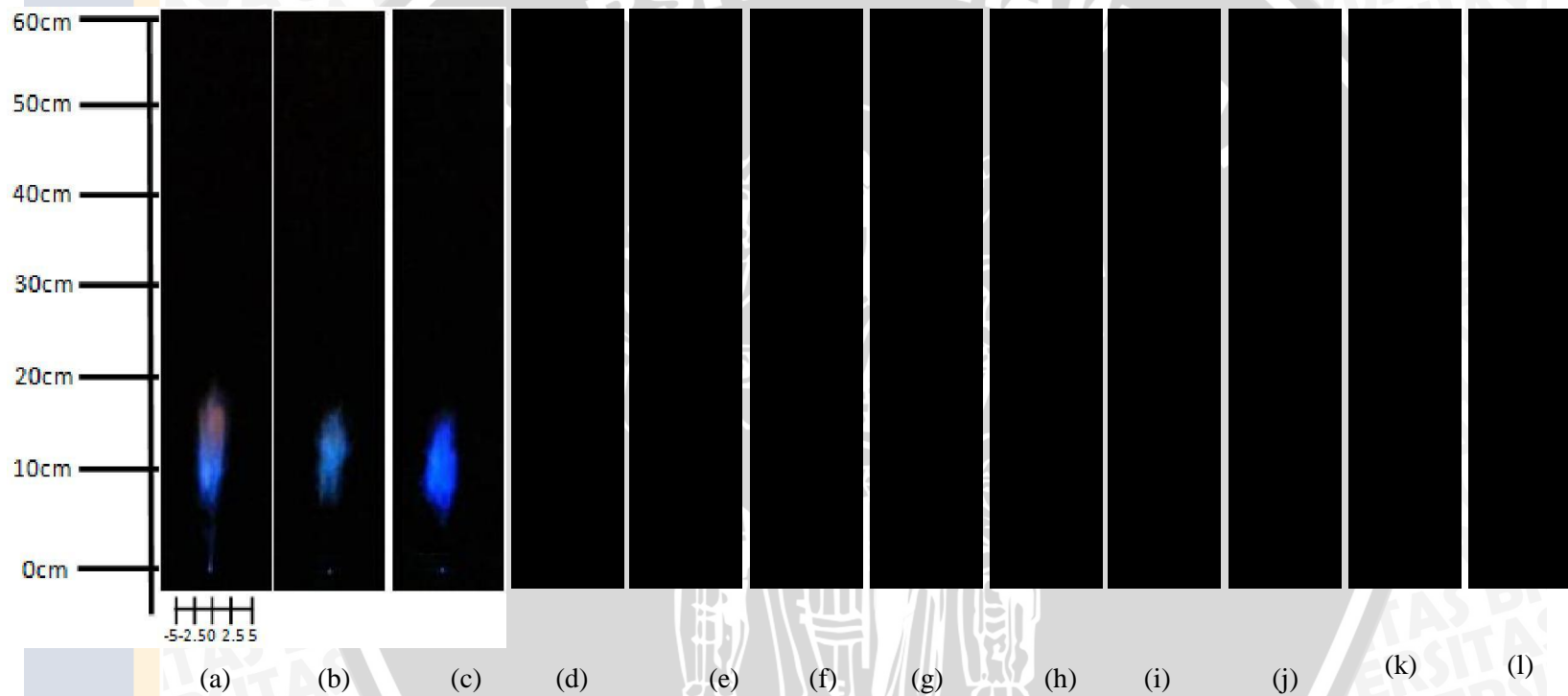


Kecepatan Udara 1,47 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s



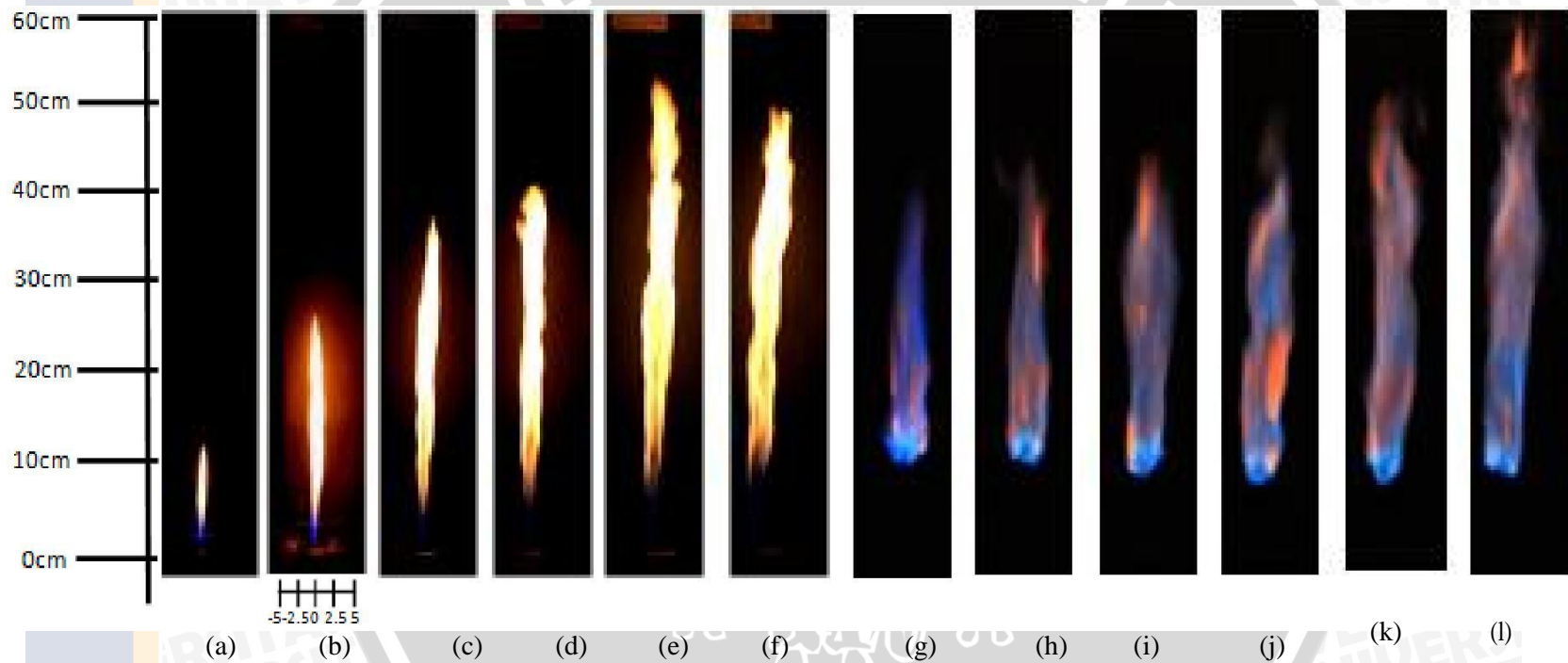


Kecepatan Udara 0,15 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

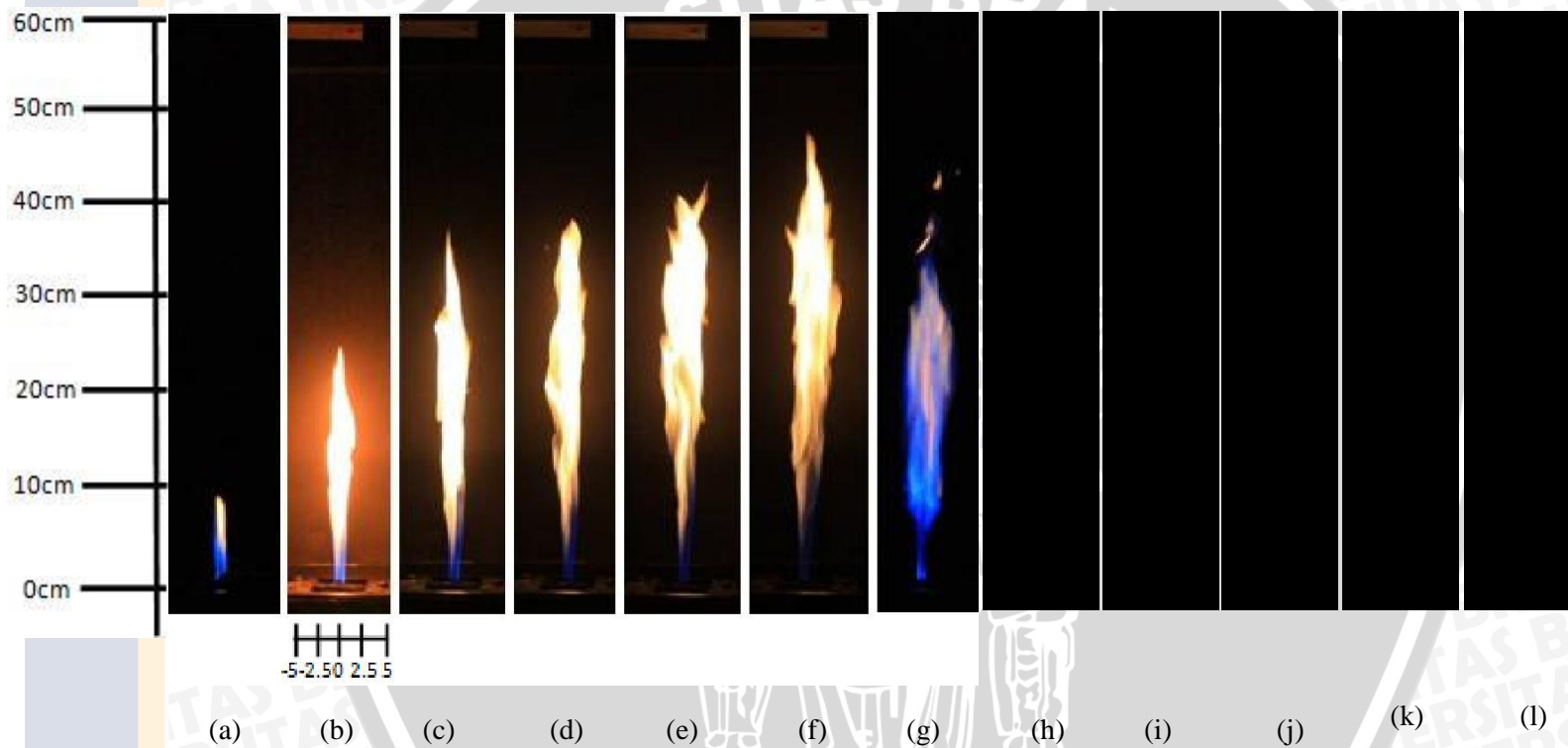


Swirl Vanes Sudut  $30^{\circ}$

Kecepatan Udara 0,9 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

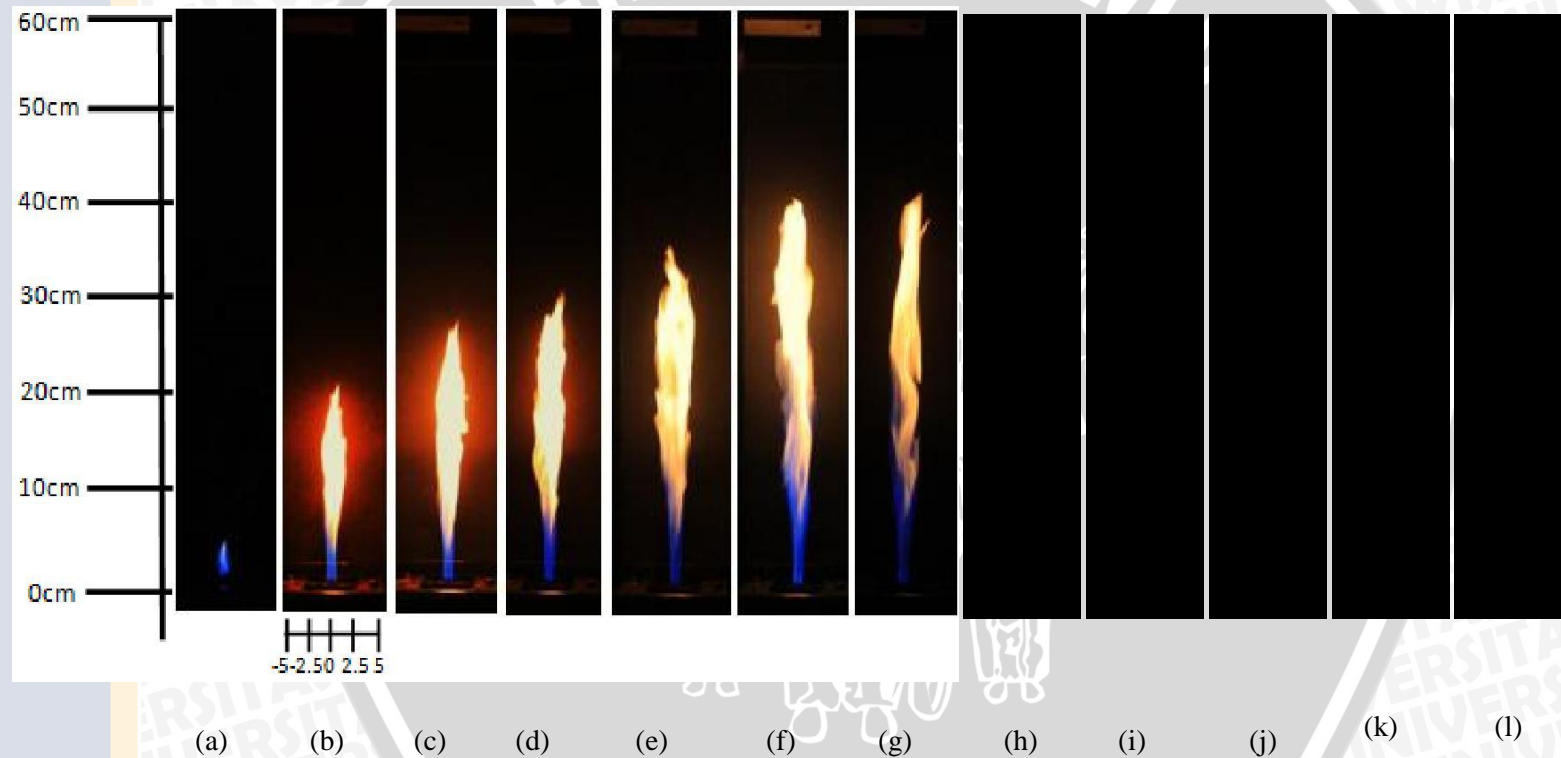


Kecepatan Udara 1,04 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

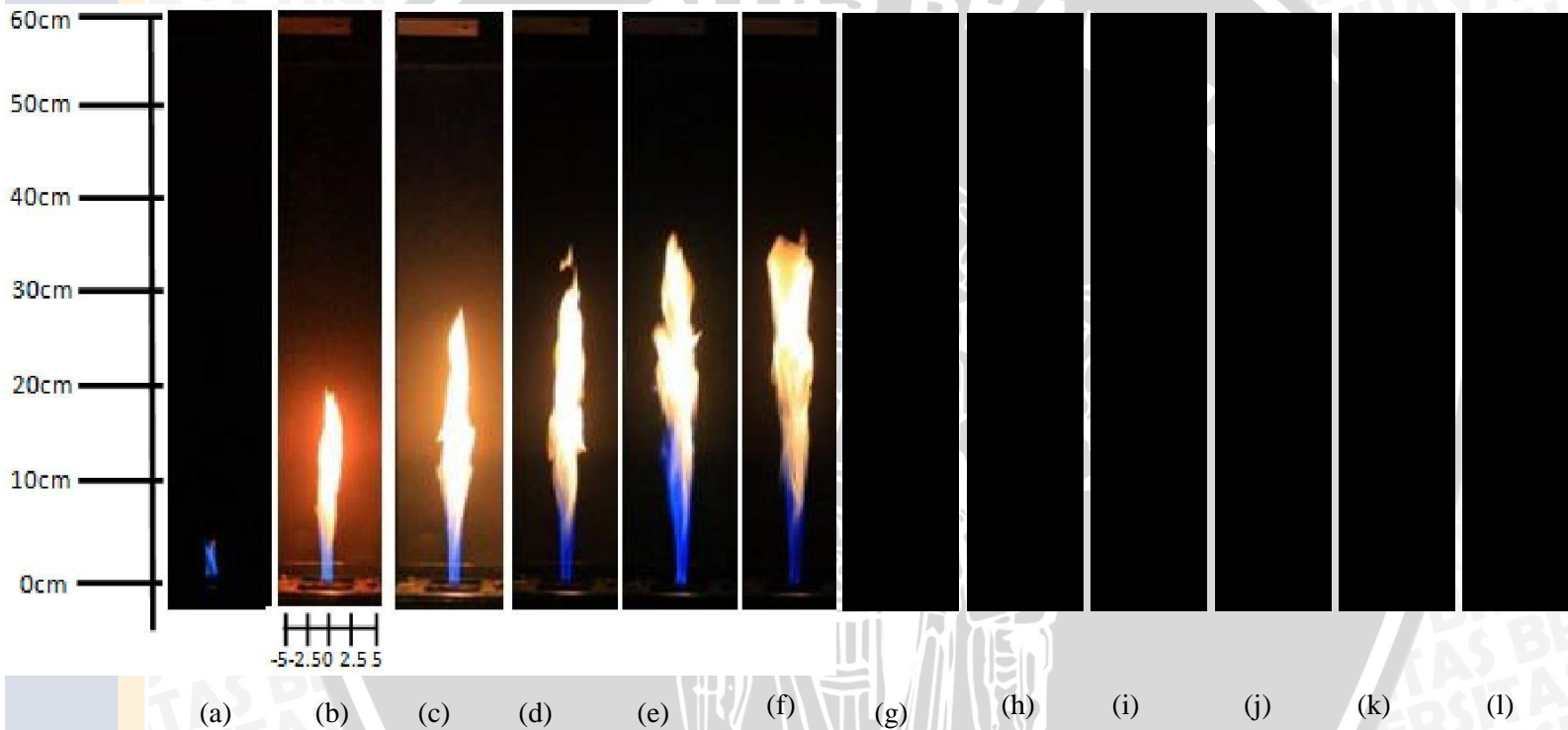




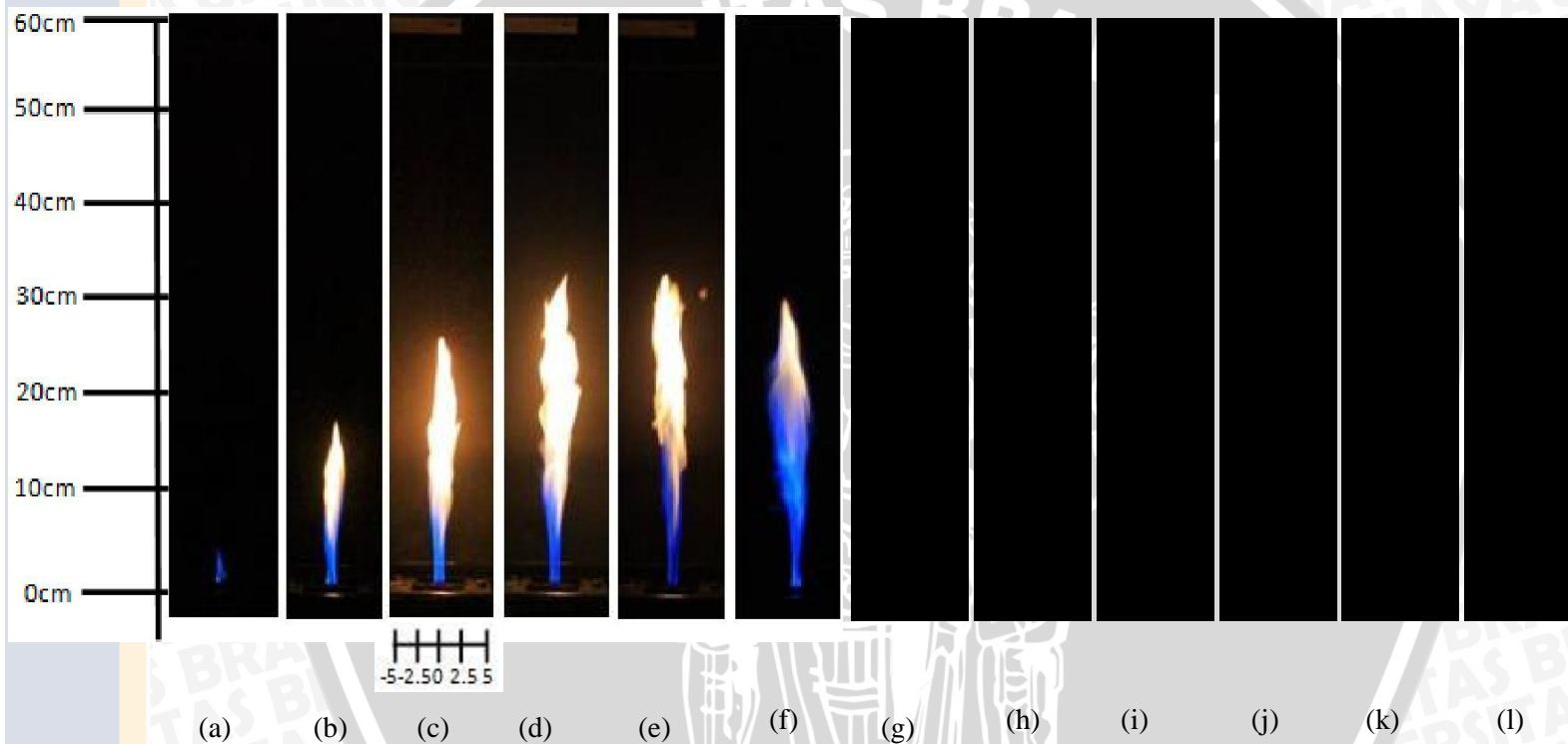
Kecepatan Udara 1,47 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s



Kecepatan Udara 0,15 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

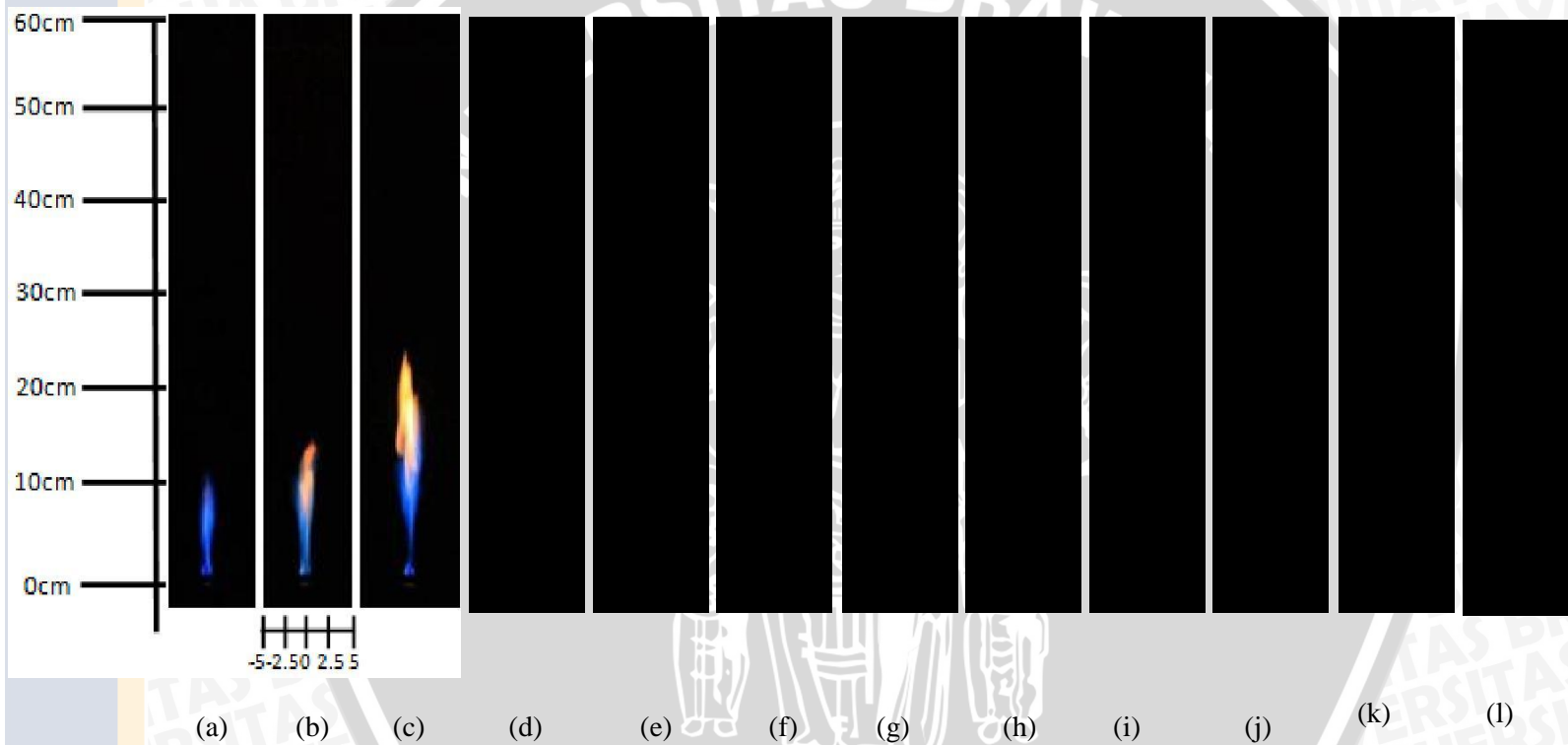


Kecepatan Udara 0,19 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

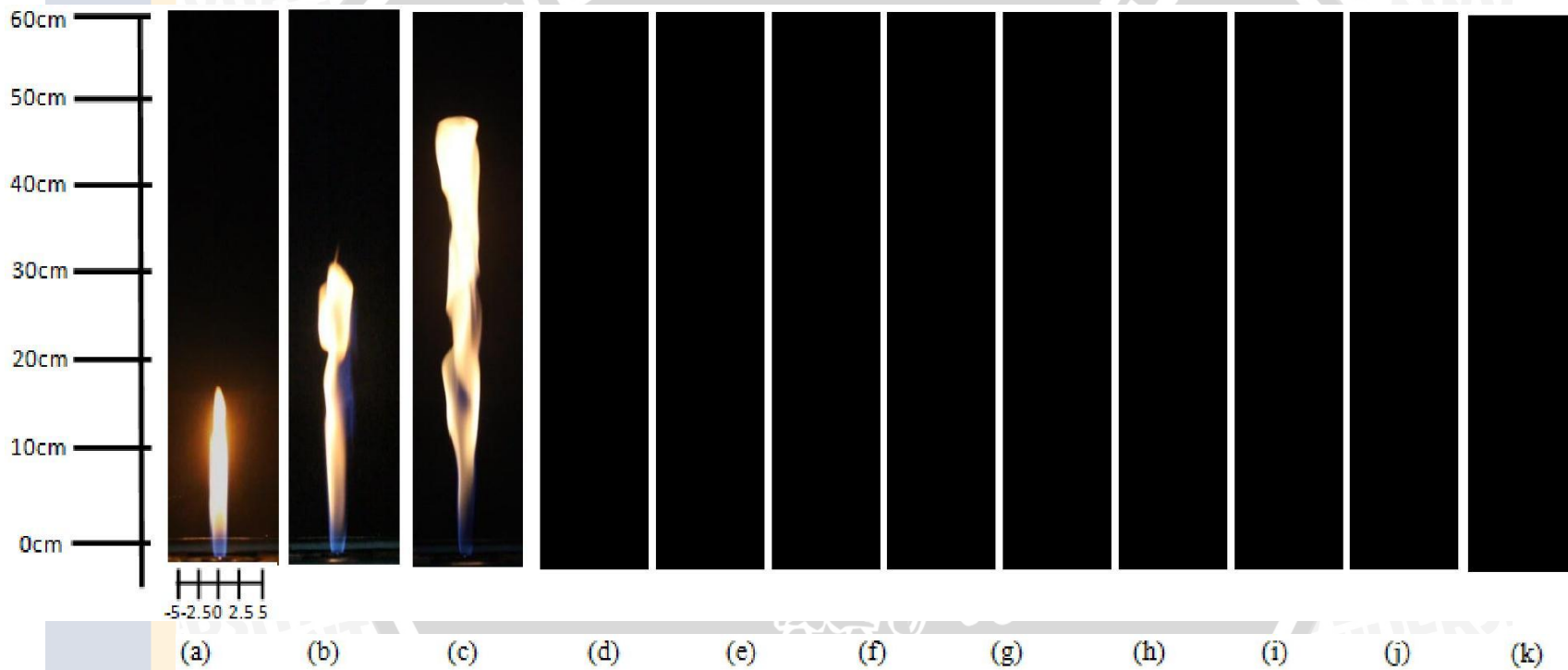




Kecepatan Udara 2,5 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s



Kecepatan Udara 0,9 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

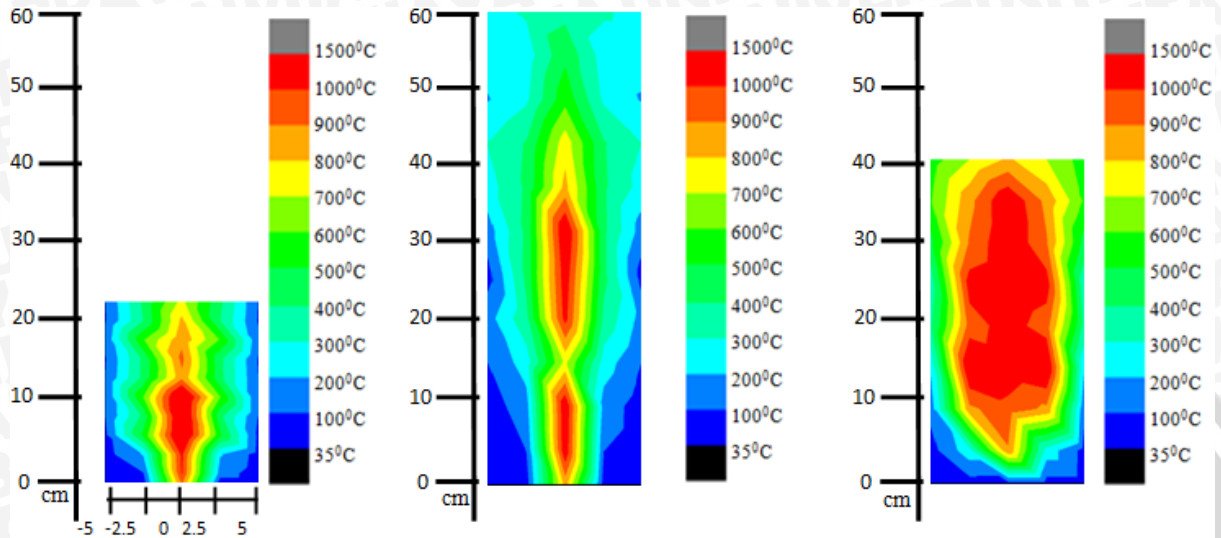


Lampiran 4

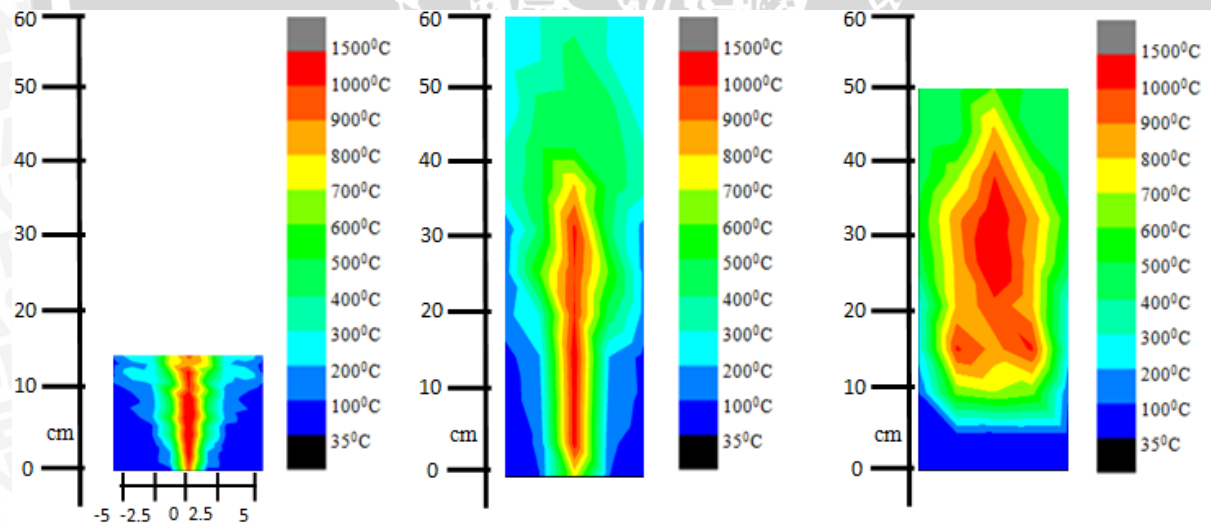
Kontur Distribusi Temperatur Sudut Swirl 10° dengan Variasi Kecepatan Bahan Bakar

(a) 1,32 m/s (b) 6,63 m/s (c) 14,60 m/s

Swirl Vane 10°



Swirl Vane 20°





### Swirl Vane 30°

