

**PENGARUH BENTUK SWIRL VANES TERHADAP VISUALISASI  
DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA API DIFUSI**

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Ditujukan untuk persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



**FAJAR WASIS SATRIO UTOMO**

**NIM. 125060200111082**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**MALANG**

**2016**

**LEMBAR PENGESAHAN**

**PENGARUH BENTUK SWIRL VANES TERHADAP VISUALISASI  
DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR PADA API DIFUSI**

**SKRIPSI**

**TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**FAJAR WASIS SATRIO UTOMO**  
**NIM. 125060200111082**

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

Dosen Pembimbing

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

Mengetahui  
Ketua Program Studi S1

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

## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

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 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 ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No.20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 16 Agustus 2016

Fajar Wasis Satrio Utomo  
NIM. 125060200111082

Fajar Wasis Satrio Utomo  
125060200111082



**JUDUL SKRIPSI :**

Pengaruh Bentuk Swirl Vanes terhadap Visualisasi dan Distribusi Temperatur pada Api Difusi.

Nama Mahasiswa : Fajar Wasis Satrio Utomo

NIM : 125060200111082

Program Studi : Teknik Mesin

Minat : Konversi Energi

**KOMISI PEMBIMBING**

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

**TIM DOSEN PENGUJI**

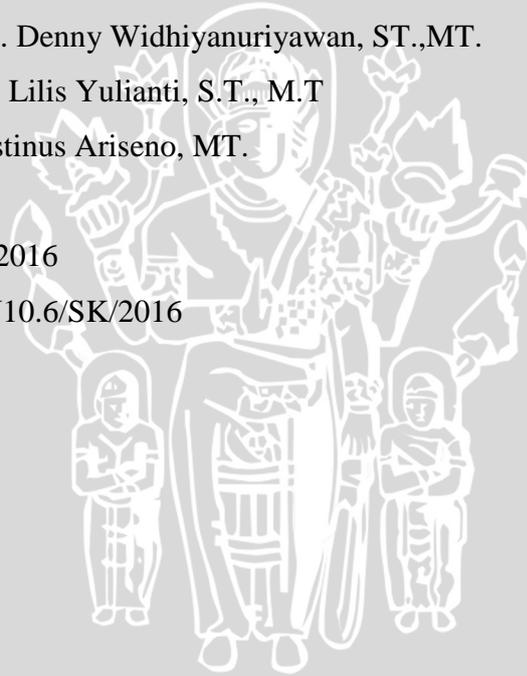
Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST.,MT.

Dosen Penguji 2 : Dr.Eng. Lilis Yulianti, S.T., M.T

Dosen Penguji 3 : Ir. Agustinus Ariseno, MT.

Tanggal Ujian : 26 Juli 2016

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



UNIVERSITAS BRAWIJAYA

Teriring Ucapan Terimakasih Kepada:  
Ayahanda dan Ibunda Tercinta



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah Yang Maha Esa atas segala berkat dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan skripsi dengan judul “Pengaruh Bentuk *Swirl Vanes* Terhadap Visualisasi dan Distribusi Temperatur pada Api Difusi” ini dengan baik.

Penulis menyadari bahwa dalam penulisan dan penyelesaian skripsi ini telah dibantu oleh banyak pihak. Oleh sebab itu, penulis ingin mengucapkan banyak terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini :

1. Bapak SAYEKTI dan Ibu MUJIATI, yakni kedua orang tua saya serta adik saya DIMAS PANGESTU YUDHO PRAWIRO atas kasih sayang, doa, dan motivasi, dukungan moral dan materil yang diberikan selama ini.
2. Dr. Eng Nurkholis Hamidi, S.T., M.Eng., selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Purnami S.T., M.T, selaku Sekertaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
4. Dr.Eng Widya Wijayanti, S.T., M.T, selaku Ketua Program Studi S-1 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya serta dosen pembimbing I skripsi yang telah memberikan pengarahan, bimbingan dan motivasi selama penyusunan laporan skripsi.
5. Seluruh Staf Pengajar Jurusan Teknik Mesin yang telah banyak memberikan ilmu pengetahuan yang sangat mendukung selama penyusunan skripsi ini.
6. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya yang telah banyak membantu dalam pengurusan administrasi.
7. Seluruh team penelitian *Swirl Vanes* yang telah membantu dalam memecahkan segala masalah yang ada dalam penelitian ini.
8. Semua Asisten Laboratorium Mesin Fluida dan Energi Alternatif yang telah banyak membantu.
9. Teman-teman mesin angkatan 2012 ADMIRAL yang selalu memberikan semangat, motivasi, serta seluruh dukungan yang diberikan.
10. Begundal62 selaku teman seperjuangan selama menempuh kuliah di jurusan Teknik Mesin yang selalu memberikan dukungan moril selama menjalani perkuliahan dan penyelesaian tugas akhir.

11. Sahabat SOULS selaku teman seperjuangan semasa SMA yan telah memberi motivasi dan semangat saat proses pembuatan skripsi.
12. Seluruh pihak terkait yang telah membantu dan memberi semangat tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini masih jauh dari kata sempurna, oleh karena itu penulis menerima segala kritik yang bersifat membangun di kemudian hari. Akhirnya penulis berharap semoga penulisan skripsi bermanfaat bagi semua pihak.

Malang, 16 Agustus 2016

Penulis



## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vi
<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 .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Penelitian Sebelumnya .....	5
2.2 Reaksi Pembakaran .....	6
2.3 Reaksi Pembakaran Bahan Bakar Gas .....	8
2.4 Pembakaran Bahan Bakar Gas Metana (CH <sub>4</sub> ) .....	8
2.5 Pembakaran Api Difusi .....	10
2.6 Aliran Turbulen .....	13
2.7 <i>Swirl Vanes</i> .....	15
2.7.1 Karakteristik Aliran Putar <i>Swirl Vanes</i> .....	17
2.7.2 Karakteristik Aliran Putar Lemah ( <i>Weak Swirl</i> ) pada <i>Swirl Vanes</i> .....	18
2.7.3 Karakteristik Aliran Putar Kuat ( <i>Strong Swirl</i> ) pada <i>Swirl Vanes</i> .....	18
2.8 Distribusi Temperatur Pada Penggunaan <i>Swirl</i> .....	19
2.9 Transport Fenomena .....	21
2.10 Konservasi Massa dan Energi .....	23
2.11 Gas <i>Inert</i> Nitrogen (N <sub>2</sub> ) .....	24
2.12 <i>Origin Lab</i> .....	25
2.13 Hipotesa .....	26

**BAB III METODE PENELITIAN**

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	27
3.2 Variabel Penelitian .....	27
3.2.1 Variabel Bebas.....	27
3.2.2 Variabel Terikat.....	28
3.2.3 Variabel Terkontrol .....	28
3.3 Peralatan Penelitian .....	28
3.4 Instalasi Penelitian.....	30
3.5 Prosedur Penelitian .....	31
3.5.1 Visualisasi Api.....	31
3.5.2 Distribusi Temperatur.....	32
3.6 Diagram Alir Penelitian.....	34

**BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Hasil Penelitian.....	35
4.2 Perhitungan Data .....	35
4.3 Visualisasi Api.....	36
4.3.1 Kecepatan Udara Konstan Kecepatan Bahan Bakar Divariasikan .....	37
4.3.1.1 <i>Swirl</i> Tipe <i>Twist</i> .....	37
4.3.1.2 <i>Swirl</i> Tipe Melengkung .....	39
4.3.1.3 <i>Swirl</i> Tipe Miring 30° .....	41
4.3.2 Kecepatan Bahan Bakar Konstan Kecepatan Udara Divariasikan .....	43
4.3.3 Perbandingan Visualisasi Api Antar <i>Swirl</i> .....	45
4.4 Distribusi Temperatur.....	48
4.4.1 Distribusi Temperatur Api Difusi Pada Variasi Kecepatan Bahan Bakar... ..	48
4.4.2 Distribusi Temperatur Api Difusi Pada Variasi Bentuk <i>Swirl</i> .....	50
4.4.3 Pengaruh Variasi Kecepatan Bahan Bakar Terhadap Kontur Distribusi Temperatur.....	51

**BAB V KESIMPULAN DAN SARAN**

5.1 Kesimpulan.....	57
5.2 Saran .....	57

DAFTAR PUSTAKA.....	xi
---------------------	----

LAMPIRAN	
----------	--

## DAFTAR TABEL

No. Tabel	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi Udara Kering di Lingkungan .....	7
Tabel 2.2	Properti kimia nitrogen .....	25



## DAFTAR GAMBAR

No. Gambar	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Ilustrasi proses pembakaran .....	6
Gambar 2.2	Ilustrasi proses pembakaran gas metana ( $\text{CH}_4$ ) yang sempurna.....	10
Gambar 2.3	Difusi komponen a ke dalam komponen b .....	11
Gambar 2.4	Efek olakan pada aliran turbulen pada permukaan nyala.....	12
Gambar 2.5	Diskripsi rata rata terhadap waktu $\underline{u}$ dan fluktuasi, $u'$ dari sebuah parameter untuk aliran turbulen.....	13
Gambar 2.6	Efek <i>scale of turbulen</i> pada permukaan nyala.....	14
Gambar 2.7	Gambaran penampang permukaan nyala api turbulen .....	15
Gambar 2.8	Pipa <i>burner</i> dengan <i>swirl vanes</i> .....	16
Gambar 2.9	Campuran bahan bakar, udara, dan hasil pembakaran pada api difusi .....	15
Gambar 2.10	Distribusi suhu pada <i>burner</i> dengan diameter $d_0 = 12.65$ mm dan $rc = 12130$ .....	16
Gambar 2.11	Zona resirkulasi dan daerah pancaran api.....	17
Gambar 2.12	<i>Plotting range</i> dari <i>worksheet excel</i> menjadi grafik 2D dan 3D .....	26
Gambar 3.1	Skema instalasi alat .....	29
Gambar 3.2	Titik pengukuran distribusi temperatur pada api difusi.....	32
Gambar 3.3	Diagram alir penelitian.....	34
Gambar 4.1	Visualisasi api <i>swirl</i> tipe <i>twist</i> dengan kecepatan udara 0,9 m/s dan variasi kecepatan bahan bakar .....	37
Gambar 4.2	Visualisasi api <i>swirl</i> tipe melegkung kecepatan udara 0,9 m/s dan variasi kecepatan bahan bakar .....	39
Gambar 4.3	Visualisasi api <i>swirl</i> tipe miring sudut $30^\circ$ kecepatan udara 0,9 m/s dan variasi kecepatan bahan bakar .....	40
Gambar 4.4	Visualisasi api <i>swirl</i> tipe <i>twist</i> dengan debit bahan bakar 7.96 m/s dan variasi kecepatan udara.....	43
Gambar 4.5	Visualisasi api <i>swirl</i> tipe melengkung dengan debit ahan bakar 7.96 m/s dan variasi kecepatan udara .....	43
Gambar 4.6	Visualisasi api <i>swirl</i> tipe miring sudut $30^\circ$ dengan debit ahan bakar 7.96 m/s dan variasi kecepatan udara .....	44
Gambar 4.7	Variasi kecepatan bahan bakar 7.96 m/s dan kecepatan udara 0,9 m/s .....	45
Gambar 4.8	Variasi kecepatan bahan bakar 7.96 m/s dan kecepatan udara 1,5 m/s .....	46

Gambar 4.9 Variasi kecepatan bahan bakar 7.96 m/s dan kecepatan udara 1,6 m/s ..... 46

Gambar 4.10 Variasi kecepatan bahan bakar 7.96 m/s dan kecepatan udara 0,2 m/s ..... 47

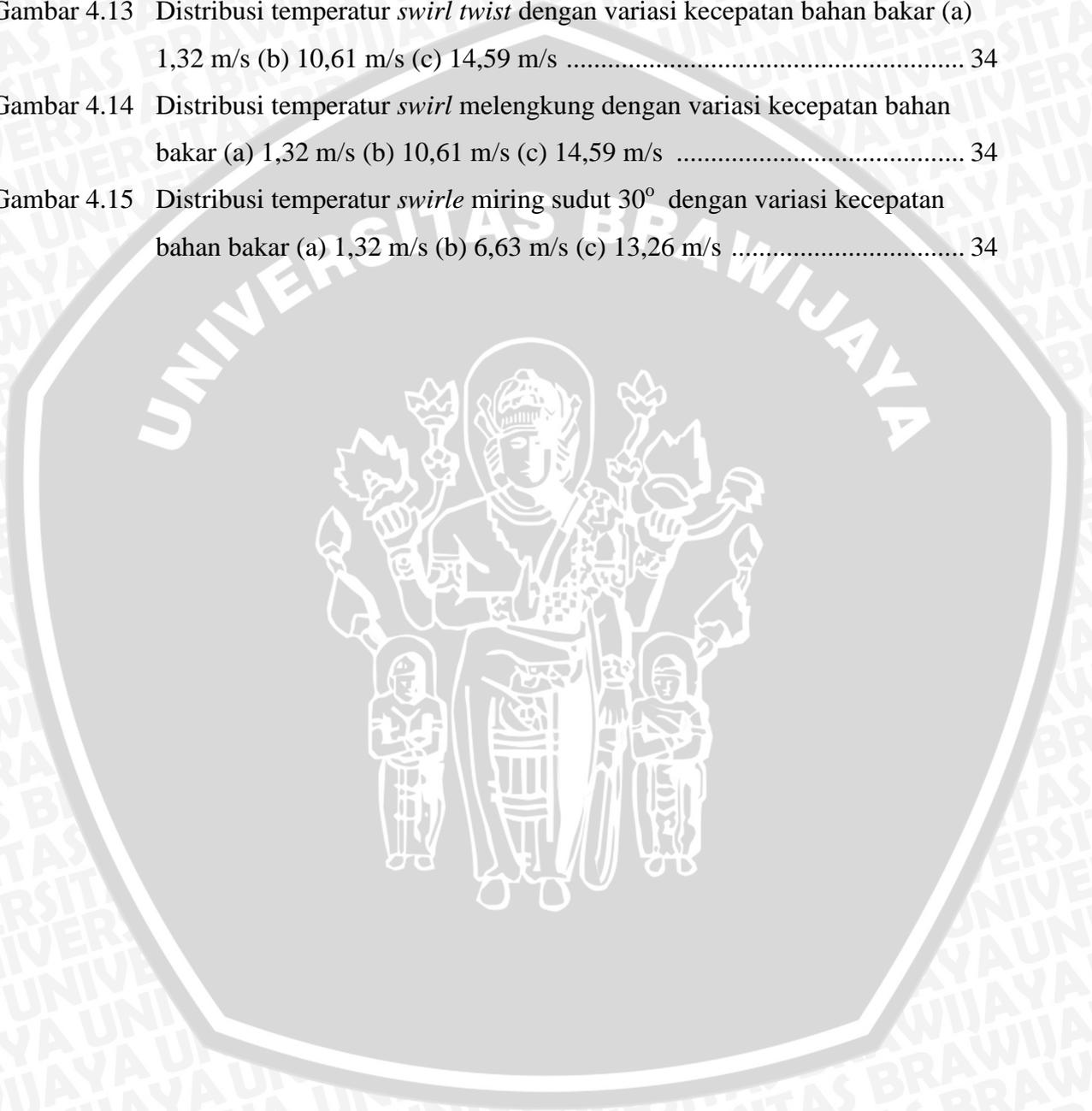
Gambar 4.11 Grafik temperatur api difusi pada variasi kecepatan bahan bakar ..... 48

Gambar 4.12 Grafik temperatur api difusi pada variasi bentuk *swirl* dengan kecepatan bahan bakar 1,32 m/s dan kecepatan udara 0,9 m/s ..... 50

Gambar 4.13 Distribusi temperatur *swirl twist* dengan variasi kecepatan bahan bakar (a) 1,32 m/s (b) 10,61 m/s (c) 14,59 m/s ..... 34

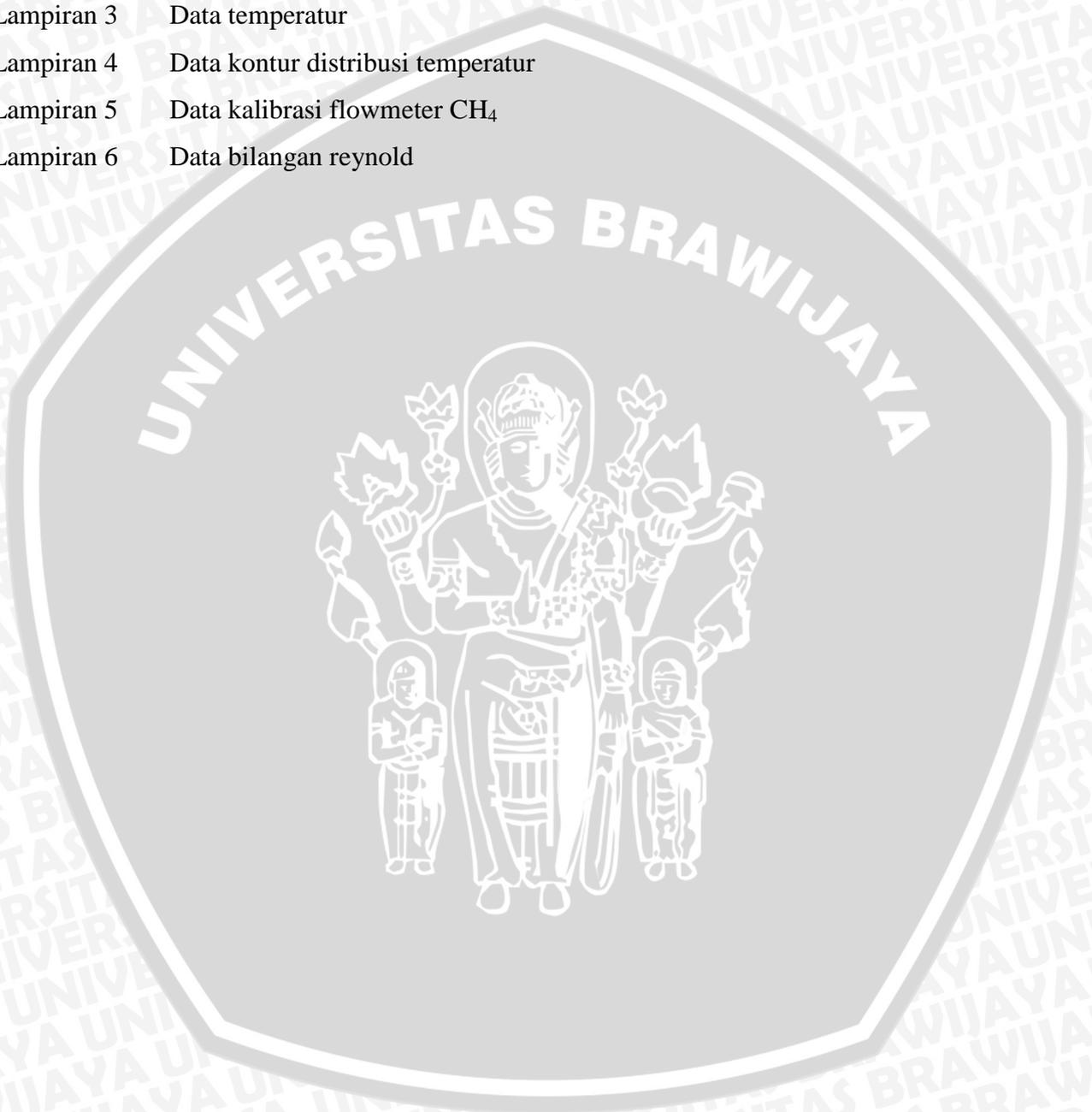
Gambar 4.14 Distribusi temperatur *swirl* melengkung dengan variasi kecepatan bahan bakar (a) 1,32 m/s (b) 10,61 m/s (c) 14,59 m/s ..... 34

Gambar 4.15 Distribusi temperatur *swirle* miring sudut 30° dengan variasi kecepatan bahan bakar (a) 1,32 m/s (b) 6,63 m/s (c) 13,26 m/s ..... 34



## DAFTAR LAMPIRAN

No. Lampiran	Judul
Lampiran 1	Desain <i>swirl vanes</i>
Lampiran 2	Data visualisasi api
Lampiran 3	Data temperatur
Lampiran 4	Data kontur distribusi temperatur
Lampiran 5	Data kalibrasi flowmeter CH <sub>4</sub>
Lampiran 6	Data bilangan reynold



## RINGKASAN

**FAJAR WASIS SATRIO UTOMO**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juli 2016, *Pengaruh Bentuk Swirl Vanes terhadap Visualisasai dan Distribusi Temperatur pada Api Difusi*, Dosen Pembimbing : Widya Wijayanti

*Swirl vanes* adalah alat yang digunakan untuk menciptakan aliran turbulen untuk menyempurnakan pencampuran bahan bakar dan udara agar proses pembakaran berlangsung sempurna dan juga untuk menstabilkan beberapa fraksi hasil pembakaran. Maka dari itu, *swirl vanes* sering digunakan dalam berbagai *burner* untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi dari *burner* tersebut.

Pada penelitian ini, variasi bentuk dari *swirl vanes* digunakan untuk melihat pengaruh bentuknya terhadap visualisai dan distribusi pada api difusi. Tipe *swirl vanes* yang digunakan ada penelitian kali ini adalah tipe *swirl twist*, *swirl* melengkung dan, *swirl* miring 30°. Pada proses pembakaran ini digunakan pembakaran difusi dengan variasi kecepatan udara dan bahan bakar.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *swirl vanes* yang menghasilkan visualisasi tinggi api paling tinggi secara berurutan adalah *swirl* melengkung, *twist* dan miring 30°. Dan hasil *swirl vanes* yang menghasilkan distribusi yang paling merata secara berurutan adalah *swirl* miring 30°, *twist* dan melengkung. Semua perbedaan ini diakibatkan oleh besarnya turbulensi yang dihasilkan setiap *swirl vanes* berbeda-beda. Semakin besar turbulensi maka semakin besar pula zona resirkulasi yang diakibatkannya, dan jika semakin besar zona resirkulasi maka distribusi temperaturnya semakin merata akan tetapi visualisasi tinggi apinya semakin pendek.

Kata kunci : Swirl vanes, pembakaran difusi, visualisasi tinggi api, distribusi temperatur.

## SUMMARY

**FAJAR WASIS SATRIO UTOMO**, Departement of Mechanical Engineering, Brawijaya University, in Juli 2016, The Effect Of Swirl Vanes Shape Towards Visualization And Distribution On The Diffusion Flame, Academic Supervisor : Widya Wijayanti

Swirl vanes are tools used to create turbulent flow to enhance mixing of fuel and air to the combustion process is complete and also to stabilize some fraction of combustion. Therefore, the swirl vanes are often used in a variety of burner to improve the performance and efficiency of the burner.

In this reseach, variations in the shape of a swirl vanes are used to see the effect of the shape of the visualization and distribution on diffusion flames. Type swirl vanes are used there this research is the type swirl twist, swirl melengkung and swirl miring  $30^\circ$ . In the combustion process is used by speed variation diffusion combustion air and fuel.

The results showed that the swirl vanes that generate high visualization highest fire sequentially is swirl melengkung, twist and miring  $30^\circ$ . And the results of swirl vanes that produce the most uniform distribution sequentially is swirl miring  $30^\circ$ , twist and melengkung. All of these differences are caused by the amount of turbulence generated every swirl vanes different. The greater the turbulence, the greater the resultant recirculation zone, and if the greater the recirculation zone, the temperature distribution more evenly but high visualization of the fire is getting shorter.

**Keywords** : Swirl vanes, diffusion combustion, high visualization flame, temperature distribution.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pada saat ini ketersediaan sumber energi di alam semakin menipis namun tidak sejalan dengan semakin meningkatnya kebutuhan energi. Hal ini dibuktikan dengan peningkatan rata-rata sebesar 2,9 % per tahun periode 2000-2012 hasil rekapitulasi dari BPPT (2014) Indonesia Konsumsi energi final di Indonesia. Bahan bakar minyak (BBM) yang meliputi minyak diesel, bensin avtur, avgas, minyak solar dan minyak tanah adalah jenis bahan bakar yang paling dominan digunakan. BBM paling besar digunakan dalam Bidang transportasi. Menurut data ESDM (2012), cadangan minyak bumi Indonesia dari tahun 2004 sampai 2012 terus mengalami penurunan sebesar 1,2 milyar barel dalam satu tahun. oleh karena itu produksi minyak juga ikut menurun. Akibatnya, semakin banyak manusia yang berfikir dan melakukan penelitian tentang berbagai alat konversi energi. Salah satunya adalah penelitian tentang alat-alat pembakaran untuk menghemat penggunaan bahan bakar namun menghasilkan tenaga yang semaksimal mungkin. Serta kebijakan presiden yang terkait dengan komitmen tersebut tertuang dalam Peraturan Presiden No. 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK) dan Peraturan Presiden No 71 Tahun 2011 tentang Penyelenggaraan Inventarisasi GRK. Menghasilkan emisi gas buang yang seminimal mungkin. Indonesia berkomitmen untuk menurunkan emisi Gas Rumah Kaca (GRK) sebesar 26% (dengan usaha sendiri) dan sebesar 41% (apabila mendapat dukungan internasional) dari tingkat *baseline* emisi pada tahun 2020.

Dalam bidang energi pembakaran sangat penting karena dapat menyangkut hampir kesemua bidang sektor kehidupan. Yaitu dari sektor rumah tangga, transportasi, industri, komersial dan lain sebagainya, sedangkan disini pembakaran berperan sebagai salah satu sumber energi utamanya. Secara umum, pembakaran adalah proses atau reaksi oksidasi yang sangat cepat antara bahan bakar (*fuel*) dan oksidator yang menimbulkan nyala api atau panas dan cahaya. Bahan bakar (*fuel*) merupakan segala substansi yang melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O<sub>2</sub>), nitrogen (N), sulfur (S). Sementara oksidator adalah segala substansi

yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi dengan bahan bakar (Taufik,2008).

Proses pembakaran dibagi menjadi dua yaitu pembakaran *premix* dan pembakaran difusi. Pembakaran *premix* adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dicampur dengan udara terlebih dahulu sebelum dibakar di mulut *burner*. Sedangkan pembakaran difusi adalah proses pembakaran yang terjadi dimana bahan bakar dialirkan melalui *burner* belum bercampur dengan udara, namun percampuran tersebut terjadi pada saat diujung *burner* dan menyala ditempat yang sama (Taufik, 2008). Proses pembakaran difusi dapat kita jumpai pada nyala api lilin, nyala tungku api pada kompor minyak dan gas, nyala api unggun dan lain sebagainya. Sedangkan penerapan pembakaran difusi yang lebih kompleks biasanya pada turbin gas, *boiler*, mesin *diesel* dan lain sebagainya. Apa difusi dalam bentuknya yang paling sederhana terdiri dari zona reaksi eksotermis yang memisahkan pengoksidasi dan bahan bakar gas. Oleh karena itu, dia tidak memiliki karakter kecepatan perambatan. Akan tetapi, sifat api difusi jelas sekali tergantung pada situasi aerodinamika aliran. Oleh karena itu, perilaku api difusi tidak bisa dijelaskan tanpa melibatkan aerodinamika.

Banyak yang melakukan penelitian tentang teknologi pembakaran difusi yang bertujuan untuk memperbaiki proses pembakaran difusi agar hasilnya lebih sempurna. Salah satu cara untuk memperbaiki proses pembakaran pada api difusi adalah dengan memberikan gangguan pada aliran reaktannya agar tercipta aliran turbulen. Aliran turbulen ini berfungsi untuk mempercepat proses difusi pada reaktan. Aliran turbulen dapat disebabkan kecepatan aliran yang tinggi, gesekan antara partikel fluida dan adanya hambatan pada aliran fluida. Pada penelitian ini kita menggunakan hambatan untuk membuat aliran fluida menjadi aliran turbulen. Hambatan yang digunakan pada pembakaran bisa berupa *flame holder*, *fractal grid*, *swirl vanes*, dll.

Dari penelitian sebelumnya, dengan pemasangan *swirl vanes*, yaitu alat untuk aerodinamika aliran yang dipergunakan untuk menimbulkan pusaran pada aliran udara turbulen yang nantinya dapat dihasilkan dari *blower* yang diaplikasikan pada pembakaran difusi *double concentric*, dihasilkan api difusi yang semakin stabil dibandingkan tanpa adanya pemasangan *swirl vanes*. Daerah kestabilan api difusi terbesar terjadi pada sudut *swirl vanes*  $30^\circ$  (Widodo, 2004).

Kestabilan api difusi banyak dipengaruhi oleh banyak faktor oleh karena itu terus diteliti dengan menggunakan berbagai macam model *combustor*, seperti penelitian yang tentang struktur api difusi dengan bahan bakar hydrogen menggunakan jenis *combustor*

*double concentric jet flow* (Takahashi, 1996). Pengaruh posisi ujung saluran bahan bakar terhadap kestabilan api difusi yang terbentuk di *double concentric jet flow*. Sebagai hasilnya diketahui bahwa posisi ujung saluran bahan bakar yang lebih dalam mengakibatkan api menjadi lebih mudah *lifted* atau bahkan *blowout*. Sedangkan untuk kondisi sebaliknya maka didapatkan api yang lebih stabil (Wijayanti, 2005).

Dari penelitian-penelitian yang sudah ada tersebut banyak yang meneliti tentang kestabilan api difusi dan beberapa variasi sudut tanpa ada variasi dari bentuk sudunya. Maka dari itu, disini dilakukan penelitian dengan bentuk dan variasi yang berbeda mengenai pengaruh bentuk *swirl vanes* terhadap visualisasi dan distribusi temperatur api difusi. Pemasangan beberapa variasi bentuk *swirl vanes* ini dimaksudkan untuk melihat pengaruh tiap bentuk *swirl vanes* efek turbulensi pada aliran udara yang dihasilkan oleh *swirl vanes*. Untuk mendapatkan campuran udara dan bahan bakar yang semakin homogen dan proses serta hasil pembakaran yang dilihat dari visualisasi apinya. Selain itu, juga untuk melihat distribusi temperatur yang paling merata.

Pada penelitian ini menggunakan bahan bakar metana ( $\text{CH}_4$ ) karena struktur atom yang sederhana sehingga lebih mudah untuk diteliti. Selain itu, menggunakan metana sebagai bahan bakar dapat mengurangi pembuangan gas metana ke lingkungan yang dapat menyebabkan efek rumah kaca. Untuk memaksimalkan proses pembakaran dalam penelitian ini ditambahkan gas inert yang berupa nitrogen ( $\text{N}_2$ ). Penggunaan gas inert pada penelitian ini bertujuan untuk meminimalisir pengaruh-pengaruh dari lingkungan saat proses pembakaran berlangsung. Pemilihan nitrogen sebagai gas inert pada penelitian ini dikarenakan ketersediaan nitrogen dialam yang sangat melimpah sehingga mudah untuk didapatkan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Dari latar belakang yang telah dijelaskan sebelumnya yang hanya menggunakan bentuk *swirl vanes* yang lurus tanpa ada variasi bentuk. Maka pada penelitian ini yang diteliti adalah bagaimana pengaruh bentuk *swirl vanes* terhadap visualisasi dan distribusi temperatur pada api difusi dengan variasi kecepatan udara dan bahan bakar.

## 1.3 Batasan Masalah

Agar pembahasan dari materi skripsi yang penulis ajukan lebih terarah, maka perlu diberikan batasan masalah. Batasan masalah dari skripsi ini adalah:

1. Suhu lingkungan dianggap konstan  $25^{\circ}\text{C}$  sesuai suhu yang diambil pada saat akan pengambilan data.
2. Kecepatan aliran udara, bahan bakar dan aliran nitrogen dianggap konstan.
3. Tekanan udara lingkungan dianggap konstan 1 atm.
4. Bahan bakar yang digunakan  $\text{CH}_4$  atau Metana.

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh bentuk *swirl vanes* terhadap visualisasi dan distribusi temperatur pada api difusi dengan variasi kecepatan udara dan bahan bakar.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian yang penulis ajukan adalah :

1. Memberikan pengetahuan kepada penulis maupun pembaca khususnya pada Teknik Pembakaran.
2. Sebagai media penerapan atau pengaplikasian dari mata kuliah Teknik Pembakaran.
3. Dapat mengetahui pengaruh bentuk *swirl vanes* terhadap visualisasi dan distribusi temperatur api difusi.
4. Dapat digunakan sebagai studi literatur pada penelitian selanjutnya mengenai *swirl vanes* terhadap visualisasi dan distribusi temperatur api difusi.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Widihartono (2007) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi sudut alur *swirl nozzle* terhadap distribusi temperatur api difus didapatkan hasil bahwa besar sudut *swirl nozzle* mempengaruhi distribusi temperatur api difusi. Semakin kecil sudut alur *swirl nozzle*, maka temperatur api difusi akan semakin terdistribusi secara merata ke arah horisontal. Distribusi temperatur yang paling merata ke arah horisontal pada api difusi, diperoleh pada sudut *swirl nozzle* sebesar  $30^\circ$ . Dengan menggunakan *swirl nozzle* dengan sudut alur  $30^\circ$  akan didapatkan kecepatan tangensial yang lebih besar. Hal ini menyebabkan daerah resirkulasi api difusi dan intensitas turbulensi akan semakin meningkat, akibatnya kecepatan bahan bakar pada arah aksial akan menurun. Penurunan kecepatan pada arah aksial menyebabkan akan ada lebih banyak waktu bagi bahan bakar untuk bercampur udara sehingga campuran antara bahan bakar dan udara semakin homogen dan distribusi temperatur akan menjadi lebih merata.

Agung (2010) melakukan penelitian mengenai pengaruh *swirl vanes* pada aliran udara sekunder terhadap api difusi yang terbentuk di aliran sembur *double concentric* menyatakan bahwa pengaruh posisi aksial *swirl vanes* pada aliran udara sekunder tidak terlalu signifikan terhadap luasan api stabil. Di sisi lain, penempatan *swirl vanes* semakin ke dalam membuat api menjadi lebih mudah *blowout*. Kemudian besar sudut *swirl vanes* mempengaruhi luasan api stabil, di mana sudut semakin besar meningkatkan tingkat kestabilan api. Selain itu, aliran *swirl* yang diakibatkan *swirl vanes* pada aliran udara sekunder untuk semua variasi memberikan kestabilan api yang relatif lebih baik dibandingkan *swirl vanes* pada aliran udara primer, kecuali pada posisi aksial *swirl vanes* tepat di ujung *burner*.

Nishimura dkk (2013) melakukan penelitian mengenai pengaruh pengadukan aliran udara oleh *swirl vanes* terhadap karakteristik api pada *double concentric bluff body*. Menyatakan bahwa dengan memberikan pusaran untuk aliran udara annular, akan meningkatkan fenomena kestabilan api. Dari perbandingan proses transisi dari api *bluff body* sederhana, kontribusi komponen aliran udara yang berputar mengakibatkan efek meningkatkan stabilitas nyala api yang lebih besar. Dalam penelitian sebelumnya

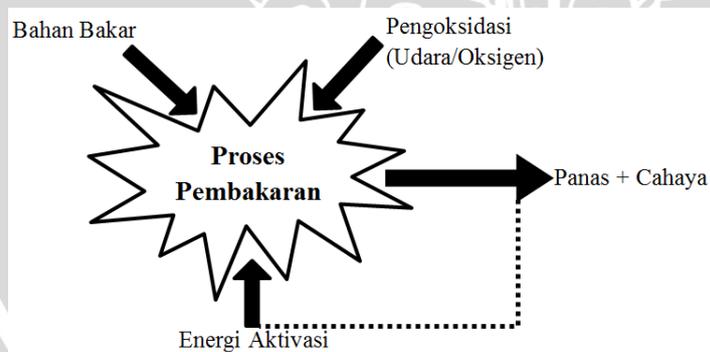
dijelaskan bahwa *swirl number* 0,6 termasuk aliran putar yang kuat akan tetapi dalam memperoleh efek stabilisasi api, perlu untuk memberikan laju aliran udara di atas nilai tertentu. Meningkatnya kestabilan api dengan putaran aliran udara, karena hambatan pada pertemuan aliran udara dan aliran bahan bakar memberikan gaya sentrifugal pada aliran udara annular. Pada ruang bakar pembakaran yang stabil dan pembakaran yang sempurna keduanya diharapkan akan tetapi merupakan suatu hal yang sulit dalam penelitian ini.

## 2.2 Reaksi Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi (oksigen atau udara) yang menghasilkan panas dan cahaya (Wardana, 2008:3). Pembakaran adalah proses konversi massa dan energi selama mana energi ikatan kimia diubah menjadi energi panas. bahan bakar bereaksi dengan oksigen dari udara untuk membentuk produk seperti karbondioksida dan air yang memiliki entalpi yang lebih rendah dari pembentukan atau referensi entalpi dari reaktan (Peters, 2010:8).

Syarat untuk bisa berlangsungnya proses pembakaran yaitu::

1. Bahan Bakar
2. Pengoksidasi (Oksigen atau udara)
3. Panas atau energi aktivasi



Gambar 2.1 Ilustrasi proses pembakaran  
Sumber: Wardana (2008)

Panas atau energi disini digunakan untuk mengaktifkan molekul-molekul bahan bakar. Panas atau energi yang digunakan untuk mengaktifkan molekul-molekul bahan bakar disebut energi aktivasi. Dalam beberapa mesin –mesin pembakaran energi aktivasi diperoleh dari pemantik tegangan tinggi atau kompresi temperatur tinggi.

Yang dimaksud dengan molekul aktif adalah molekul-molekul yang bermuatan. Molekul muatan ini umumnya disebut ion. Sedangkan molekul atau atom bermuatan akibat

pemutusan ikatan molekul-molekul disebut radikal bebas. Molekul atau atom yang bermuatan tersebut sangat mudah bereaksi karena ketidakstabilan muatannya. Molekul atau atom tersebut akan mudah tertarik oleh molekul-molekul dengan muatan berlawanan. Jadi agar reaksi pembakaran dapat berlangsung maka molekul-molekul bahan bakar dibuat bermuatan dengan cara melepaskan satu atau beberapa elektron dari kulit terluar atom atau memutus ikatan rantai molekul. Radikal bebas jika menghantam (menumbuk) molekul lainnya dapat menyebabkan jarak antar ikatan molekul tersebut merenggang dan mengkerut secara periodik. Dengan tambahan sedikit energi dari luar pada saat jarak ikatan atom dalam keadaan merenggang dapat menyebabkan atom-atom dalam molekul terputus dan bermuatan. Jadi radikal bebas juga sangat berperan membantu dalam proses reaksi di dalam pembakaran.

Pembakaran adalah reaksi kimia eksotermis. Dengan demikian secara lebih fundamental bisa didefinisikan bahwa pembakaran adalah proses lepasnya ikatan-ikatan kimia lemah bahan bakar akibat pemberian energi tertentu dari luar menjadi atom-atom bermuatan yang aktif kemudian bereaksi dengan oksigen membentuk ikatan molekul-molekul kuat yang menghasilkan panas dalam jumlah sangat besar dan cahaya (Wardana, 2008:3). Dalam penelitian kali ini menggunakan bahan bakar gas yang berupa  $\text{CH}_4$ .

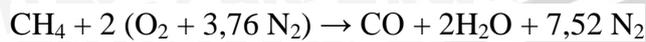
Jika suatu pembakaran yang kita harapkan sempurna, maka proses pembakaran harus ideal. Pembakaran ideal adalah pembakaran yang dapat menghasilkan produk pembakaran yang sempurna. Kondisi ini disebut dengan kondisi stokiometri dimana produk pembakaran untuk senyawa hidrokarbon adalah  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , dan  $\text{N}_2$  sebagai inert gas. Pembahasan kali ini hanya membahas tentang pembakaran antara bahan bakar hidrokarbon dan oksigen dari udara. Udara lingkungan biasanya terdiri dari berikut ini.

Table 2.1  
Komposisi Udara Kering di Lingkungan

Unsur / Senyawa	Prosentase volume (%)	Prosentase berat (%)	Berat Molekul Lb per mole
Oksigen ( $\text{O}_2$ )	20,99	23,19	32,00
Nitrogen ( $\text{N}_2$ )	78,03	75,47	28,016
Argon (Ar)	0,94	1,30	39,944
Karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ )	0,03	0,04	44,003
Hidrogen ( $\text{H}_2$ )	0,01	0,00	2,016
Udara Kering	100,00	100,00	28,967

Sumber : Tjokroawidjojo (1986)

Pembakaran stokiometri adalah pembakaran yang sempurna, yang dimana semua atom dari pengoksidasi bereaksi secara kimia untuk menjadi produk. Di bumi pengoksidasi paling lazim adalah udara, yang sebagai analisis dianggap memiliki komposisi campuran 21% oksigen dan 79% nitrogen (berdasarkan fraksi mol atau volume). Jadi untuk menggunakan 1 mol  $O_2$  akan menggunakan  $\left(\frac{79}{21}\right) = 3,76 N_2$ . Misalkan contoh persamaan kimia dari pembakaran stokiometrik dari metana ( $CH_4$ ) dengan udara adalah:



Reaktan

Produk

### 2.3 Reaksi Pembakaran Bahan Bakar Gas

Reaksi Pembakaran bahan bakar gas mempunyai beberapa keuntungan dibandingkan jenis bahan bakar yang lain. Bahan bakar ini dapat terbakar tanpa adanya asap dan jelaga. Selain itu proses pembakarannya bisa mendekati sempurna dengan persentase kelebihan udara sangat kecil. Pengendalian nyala api bahan bakar gas juga sangat sederhana. Kelemahannya adalah penyimpangannya yang sangat sulit dan memerlukan ruang yang besar bila dibandingkan dengan bahan bakar cair dan padat (Wardana, 2008:14).

Bahan bakar gas dapat diklasifikasikan menjadi 2, yaitu gas alam (natural gas) dan *manufactured gas*. Natural gas biasanya berasal dari sumur-sumur pengeboran minyak dan simpanan batu bara. Bahkan, ada yang berasal dari sumur gas sendiri. Sedangkan, *manufactured gas* diperoleh dari proses-proses gasifikasi kayu, batu bara, dan minyak. Kandungan bahan pada bahan bakar gas yang mudah terbakar adalah senyawa  $CH_4$ ,  $CO$ ,  $H_2$  dengan komposisi kandungan yang berbeda beda sesuai dengan jenis bahan bakarnya. Hal tersebut yang memberikan karakteristik atau sifat dari bahan bakar gas (Wardana, 2008:15). Oleh karena itu, dalam penelitian kali ini menggunakan bahan bakar  $CH_4$ .

### 2.4 Pembakaran Bahan Bakar Gas Metana ( $CH_4$ )

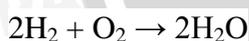
Metana adalah molekul hidrokarbon organik, molekul yang paling sederhana di antara alkana. Ikatan yang membentuk molekul metana adalah ikatan kovalen dengan geometri tetrahedral. Metana ditemui di bumi dalam bentuk gas alam atau produk dari dekomposisi, dan senyawa ini ditemui di planet lain di dalam dan di luar tata surya kita. Reaksi pembakaran dengan metana menghasilkan karbon dioksida, air, panas, dan dalam kasus pembakaran tidak sempurna, karbon monoksida. Adapun sifat metana adalah sebagai berikut:

- Densitas pada kondisi standar : 0,7168 gr/dm<sup>3</sup>
- Berat jenis spesifik dibandingkan air : 0,554
- Nilai kalor tinggi (HHV) : 9,510 kcal/m<sup>3</sup>
- Nilai kalor rendah (LHV) : 8,570 kcal/m<sup>3</sup>
- Volume udara yang diperlukan untuk pembakaran stokiometri : 9,52 (m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>)
- Temperatur pembakaran adiabatic pada kondisi sokhiometrik pada 25°C : 1,952°C
- Batas konsentrasi mampu
  - Bakar diudara tertinggi : 15%
  - Bakar diudara terendah : 5%
- Temperatur penyalaan : 580°C
- Kecepatan rambat api pada campuran Stoikhiometrik pada 25°C : 43,4 cm/det

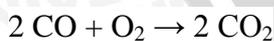
Pada reaksi pembakaran metana, ada beberapa tahap yang dilewati. Hasil awal yang didapat adalah formal dehidra (HCHO atau H<sub>2</sub>CO). Oksidasi formal dehidra akan menghasilkan radikal formil (HCO), yang nantinya akan menghasilkan karbon monoksida (CO):



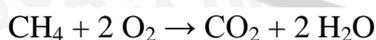
H<sub>2</sub> akan teroksidasi menjadi H<sub>2</sub>O dan melepaskan panas. Reaksi ini berlangsung sangat cepat, biasanya bahkan kurang dari satu milisekon.

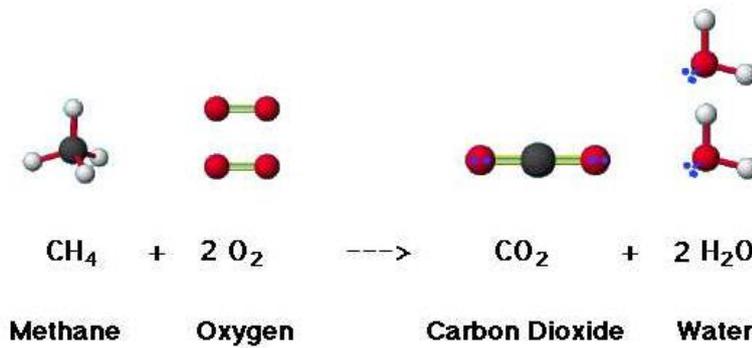


Akhirnya, CO akan teroksidasi dan membentuk CO<sub>2</sub> sambil melepaskan panas. Reaksi ini berlangsung lebih lambat daripada tahapan yang lainnya, biasanya membutuhkan waktu beberapa milisekon.



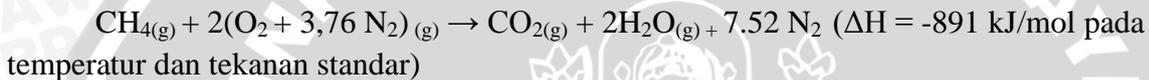
Hasil reaksi pembakaran akhir yang sempurna dari persamaan diatas adalah:





Gambar 2.2 Ilustrasi proses pembakaran gas metana ( $\text{CH}_4$ ) yang sempurna  
 Sumber: Ophardt (2003)

Pembakaran satu molekul metana dengan oksigen akan melepaskan satu molekul  $\text{CO}_2$  (karbondioksida) dan dua molekul  $\text{H}_2\text{O}$  (air). Reaksinya digambarkan pada persamaan kimia berikut.



Sekitar 891 kJ/mol, panas pembakaran gas metana lebih rendah daripada hidrokarbon lain tetapi rasio panas pembakaran (891 kJ / mol) dengan massa molekul (16,0 g / mol) menunjukkan bahwa gas metana, sebagai hidrokarbon yang paling sederhana, menghasilkan panas lebih banyak per satuan massa (55,7 kJ/g) dari hidrokarbon kompleks lainnya.

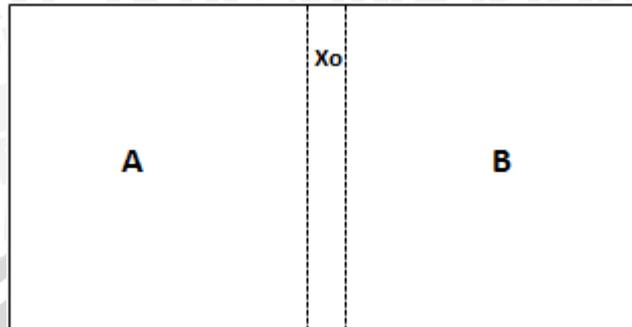
Dalam penelitian kali ini gas metana akan digunakan dalam proses pembakaran secara difusi.

## 2.5 Pembakaran Api Difusi

Pembakaran api difusi adalah proses pembakaran yang mana bahan bakar dan pengoksidasi (udara atau  $\text{O}_2$ ) proses pencampurannya tidak secara mekanik, akan tetapi bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Jika campuran bahan bakar dan udara (oksigen) dengan proses difusi ini mencapai kondisi mendekati stokhiometrik, dan panas yang dilepas oleh api di daerah pencampuran tersebut sudah cukup maka pembakaran akan berlangsung. Proses pembakaran difusi ini bisa kita jumpai pada berbagai proses pembakaran seperti nyala lilin, api kebakaran, pembakaran industri, pembakaran turbin gas, pembakaran mesin diesel, pembakaran mesin propulsi, dll.

Api difusi memiliki bentuk yang paling sederhana yaitu terdiri dari zona reaksi eksotermis yang memisahkan pengoksidasi dan bahan bakar gas. Oleh karena itu, dia tidak

memiliki karakter kecepatan perambatan. Akan tetapi sifat dari api difusi dapat kita lihat dapat dipengaruhi pada situasi aerodinamika aliran. Oleh sebab itu, aerodinamika masuk kedalam beberapa penelitian tentang perilaku api difusi.



Gambar 2.3 Difusi komponen a ke dalam komponen b  
Sumber: Holman (1985)

Pada gambar 2.3 dimisalkan terdapat ruangan tertutup dengan disekat oleh bidang yang khayal  $X_o$ . Bagian ini disebelah kiri  $X_o$  berisi partikel gas A, sedangkan bagian di sebelah kanan  $X_o$  berisi partikel gas B pada tekanan yang sama, sehingga tidak ada potensial aliran. Sesaat setelah bidang  $X_o$  dibuka, partikel gas A bergerak secara ke dua arah, demikian pula partikel gas B, sehingga dalam ruangan tercapai kesetimbangan konsentrasi pada gas A dan gas B. Laju difusi diberikan oleh hukum fick tentang difusi, yang menyatakan bahwa fluks massa dari satu konstituen per satuan luas berbanding lurus dengan gradient suhu. Hal tersebut dapat dituliskan dalam persamaan matematis sebagai berikut (Holman, 1991 : 533):

$$\frac{\dot{m}_A}{A} = -D \frac{\partial C_A}{\partial x} \quad (2.1)$$

Keterangan :

$\dot{m}_A$  = fluks massa per satuan waktu (kg/s)

$D$  = koefisien difusi (Diffusion Coefficient) ( $m^2/s$ )

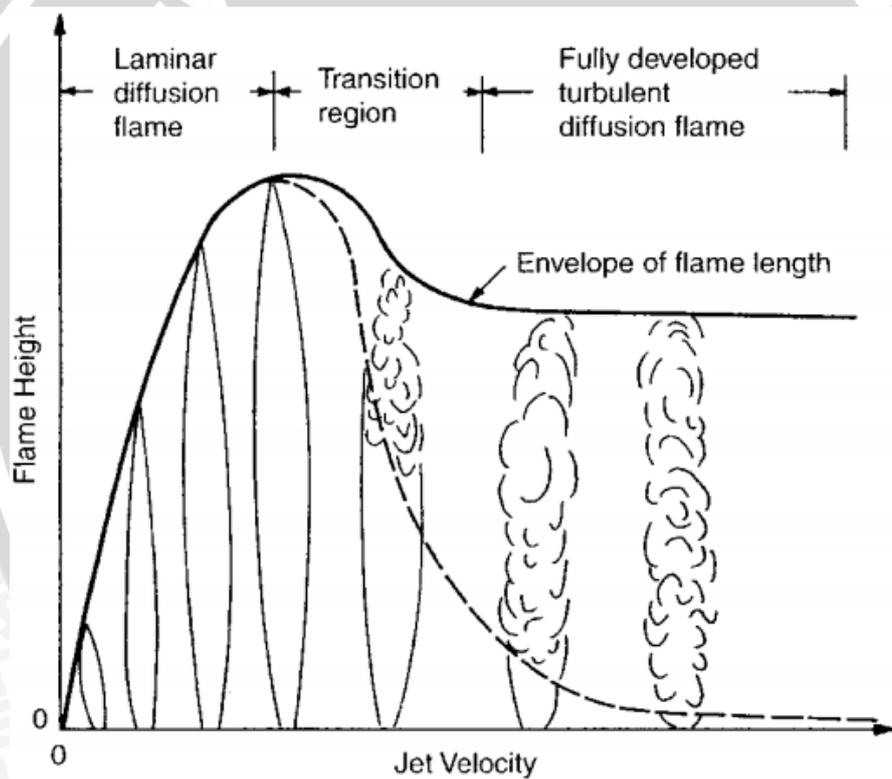
$C_A$  = konsentrasi komponen A persatuan volume ( $kg/m^3$ )

$A$  = luas penampang ( $m^2$ )

Sama seperti pada persamaan aliran panas, tanda minus menyatakan bahwa partikel mengalir dari konsentrasi tinggi ke konsentrasi yang lebih rendah.

Salah satu jenis api dari pembakaran secara difusi adalah api difusi *jet*. Api difusi *jet* adalah api difusi yang terjadi karena aliran *jet* bahan bakar dari nosel ke dalam aliran udara pada burner. Nyala api difusi *jet* meliputi api difusi *jet* laminar dan api difusi *jet* turbulenta.

Gambar 2.4 menjelaskan tentang perubahan aliran difusi jet laminar ke difusi jet turbulen. Perubahan aliran api tersebut disebabkan oleh pemanjangan api dan peningkatan kecepatan aliran jet bahan bakar. Peningkatan kecepatan bahan bakar menyebabkan karakter api berubah. Pada kecepatan jet bahan bakar yang rendah, struktur api adalah laminar. Panjang api laminar tersebut akan meningkat bersamaan dengan peningkatan kecepatan jet bahan bakarnya sampai pada suatu batas aliran api menjadi turbulen. Pada kondisi tansisi terjadi perubahan dari aliran laminar menuju aliran turbulen. Pada kondisi api laminar akan mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kecepatan jet pada bahan bakar dan panjang api turbulen akan mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan kecepatan jet bahan bakarnya., kemudian panjang api total akan menurun karena kecepatan pengadukan api yang turbulen.



Gambar 2.4 Efek olakan pada aliran turbulen pada permukaan nyala  
Sumber: Kuo, (1986)

Nyala api (*flame*) adalah daerah tempat terjadinya reaksi pembakaran. Nyala api dibatasi oleh permukaan nyala (*flame front*), yaitu permukaan yang membatasi gas yang terbakar dan tidak terbakar. Pada proses pembakaran difusi, kestabilan nyala api memegang peranan penting. Api dikatakan stabil apabila terjadi terjadi stasioner pada

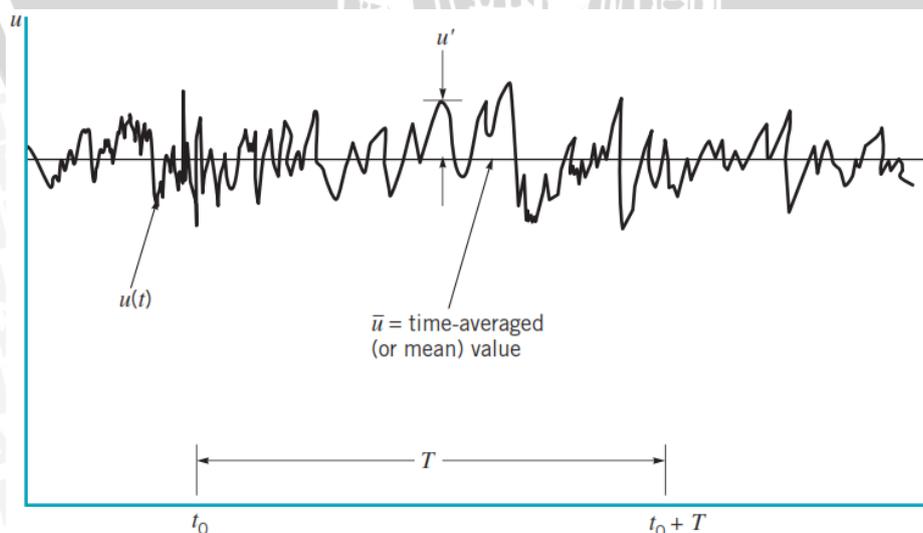
kedudukan tertentu saat kecepatan gas reaktan sama dengan kecepatan produk, dalam hal ini rambatan api.

## 2.6 Aliran Turbulen

Aliran turbulen adalah suatu keadaan dimana partikel-partikel (massa-massa molar yang kecil) fluida bergerak dalam lintasan-lintasan yang sangat tidak teratur, yang mengakibatkan pertukaran momentum dari suatu bagian fluida ke bagian yang lainnya dengan cara yang agak menyerupai perpindahan molekuler. Teori tentang aliran ini sangat sulit namun analisa secara data eksperimen dapat digunakan sebagai acua tentang turbulensi. Untuk suatu aliran dalam pipa dikatakan turbulen jika memiliki besaran bilangan *Reynolds* lebih besar dari 4000.

Kecepatan makroskopik fluida pada sistem turbulensi seperti yang diukur pada anemometer kawat panas dapat digambar seperti pada gambar 2.6. dari gambar tersebut dapat dijelaskan bahwa pada aliran turbulen kecepatan partikel-partikel fluida sangat fluktuatif. Kecepatan yang fluktuatif tersebut dikarenakan partikel-partikel fluida bergerak pada lintasan-lintasan yang sangat tidak teratur, akibatnya terjadi tumbukan dari masing-masing partikel fluida. Peningkatan turbulensi pada suatu aliran disebabkan oleh beberapa faktor, yaitu:

1. Kecepatan aliran yang tinggi
2. Gesekan partikel-partikel fluida
3. Adanya hambatan aliran



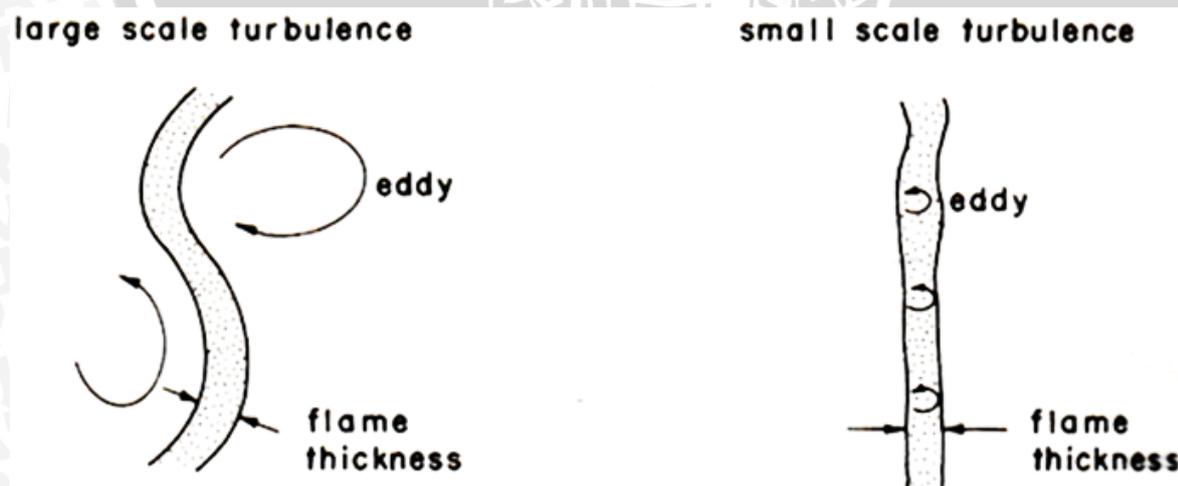
Gambar 2.5 Grafik hubungan visualisasi fluktuasi kecepatan aliran turbulen terhadap interval waktu

Sumber: Munson (2005)

Pada pengukuran suatu kecepatan ada 3 macam kecepatan yaitu  $u(t)$  merupakan kecepatan sesaat dari aliran turbulen pada waktu tertentu.  $\bar{u}$  merupakan kecepatan rata-rata aliran turbulen dari keseluruhan interval waktu. Dan  $u'$  merupakan selisih antara kecepatan aliran turbulen sesaat dengan kecepatan aliran turbulen rata-rata seperti yang ditunjukkan oleh gambar 2.5.

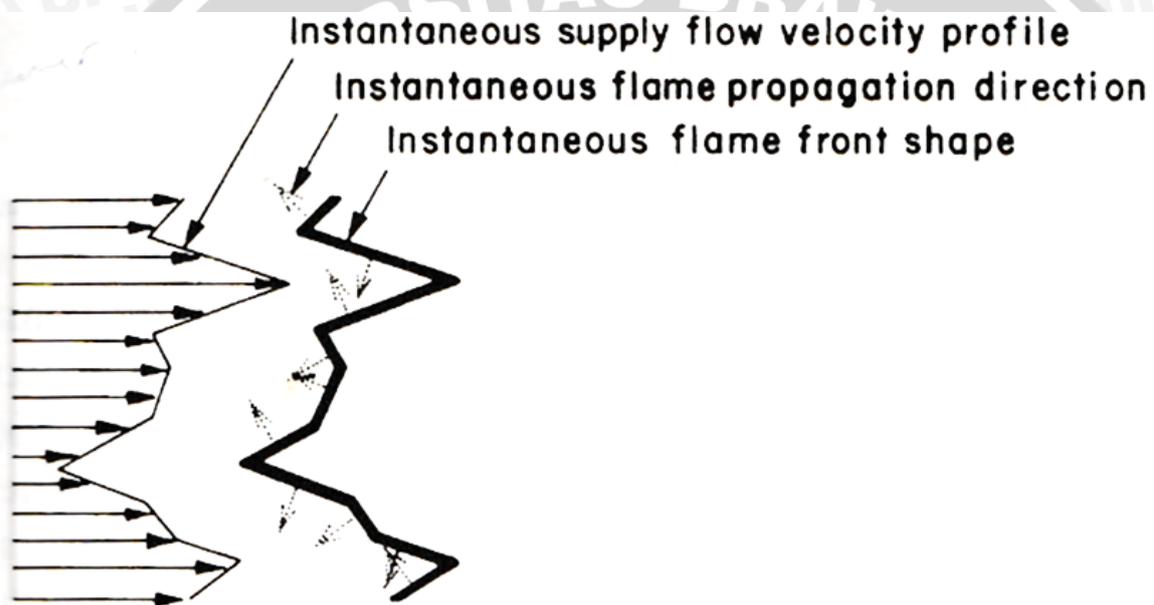
Proses-proses pecampuran dan proses-proses perpindahan kalor dan massa sangat meningkat dalam aliran turbulen dibandingkan dengan aliran laminar. Hal ini disebabkan oleh keacakan skala mikroskopik dalam aliran turbulen. Kita semua telah mengenal gerakan tipe *eddy* yang giat “mengelinding” dari aliran dalam panci yang sedang dipanasi diatas kompor (bahkan jika dipanasi tidak sampai mendidih). Pencampuran acak tertentu seperti itu sangat efektif dalam menghantar energi dan massa ke seluruh medan aliran, oleh karena itu meningkatkan berbagai proses laju yang terlibat. Sebaliknya aliran laminar dapat dianggap sebagai partikel-partikel fluida yang sangat kecil namun berukuran tertentu yang, mengalir secara mulus di dalam masing-masing lapisan. Keacakan dan pencampuran satu-satunya berlangsung dalam skala molekuler dan menghasilkan laju perpindahan kalor, massa dan momentum yang relatif kecil.

Kecepatan tangensial akan membagi aliran fluida menjadi skala (*scale*) yang lebih kecil, sehingga berpengaruh terhadap struktur permukaan nyala seperti ditunjukkan pada gambar 2.5 berikut



Gambar 2.6 Efek *scale of turbulen* pada permukaan nyala  
Sumber: Kuo (1986)

Pada *small eddies* ukuran pusaran (*eddy size*) lebih kecil dari ketebalan permukaan nyala (*flame front thickness*). Akan tetapi, efek yang ditimbulkan adalah meningkatnya proses transport dan difusivitas dalam gelombang pembakaran. Pada *large eddies* ketebalan permukaan nyala api lebih besar daripada saat kondisi laminar. *Large eddies* tidak meningkatkan difusivitas seperti yang terjadi pada *small eddies*, tetapi sebaliknya akan merubah permukaan nyala laminar yang *smooth* menjadi bentuk lipatan-lipatan pada permukaan nyala, seperti pada gambar 2.6. Hal ini akan meningkatkan daerah permukaan nyala untuk setiap unit penampang melintang pada pipa, akibatnya terjadi peningkatan kecepatan pembakaran tanpa terjadi perubahan pada struktur api lokal.



Gambar 2.7 Gambaran penampang permukaan nyala api turbulen  
Sumber: Kuo (1986)

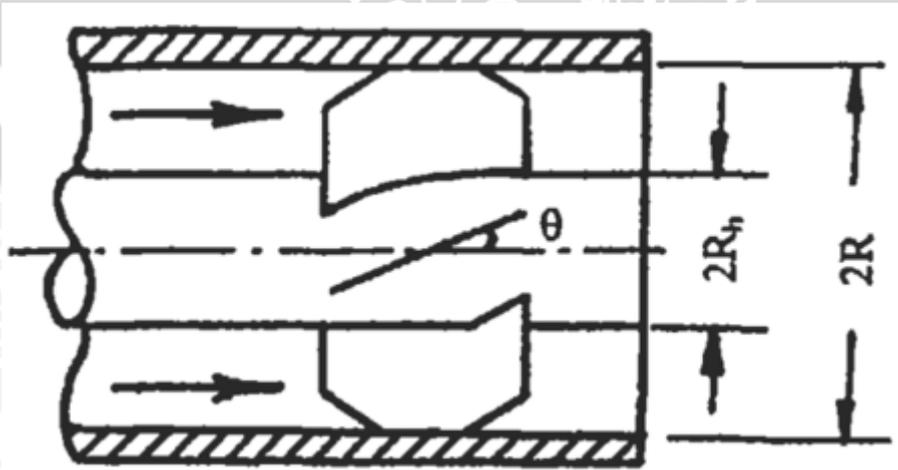
## 2.7 Swirl Vanes

Aliran *swirl* atau aliran putar banyak ditemukan dalam berbagai bentuknya di alam, misalnya pada gejala angin tornado yang sering melanda beberapa kawasan, pada pusaran air laut (*whirl pool*) yang biasa terjadi di tengah lautan, pada aliran udara yang lepas dari ujung sayap (*tip*) pesawat udara, pada aliran air yang melewati baling-baling (*impeller*) dari sebuah kapal laut atau kapal selam.

Aliran putar merupakan aliran fluida yang selain mempunyai komponen kecepatan aksial dan radial, juga mempunyai komponen kecepatan *swirl*. Di dalam tabung pembakaran, adanya kombinasi antara komponen kecepatan aksial dan *swirl* tersebut mempengaruhi pencampuran dua atau lebih jenis fluida yang mengalir di dalam tabung

tersebut. Pada beberapa laporan penelitian sebelumnya, aliran putar isothermal mempengaruhi kestabilan nyala api (*flame stability*) pada reaksi pembakaran. Hal ini berhubungan dengan proses pencampuran antara bahan bakar dan udara. Adanya komponen kecepatan *swirl* menginduksikan gaya sentrifugal di dalam aliran, dimana gaya ini akan mempengaruhi puncak distribusi kecepatan, distribusi tekanan statik, serta daerah resirkulasi. Resirkulasi memiliki peranan yang sangat penting pada kestabilan pembakaran, karena dengan adanya resirkulasi maka kecepatan aksial lokal udara didalam zona primer menjadi cukup rendah untuk menjaga keberlangsungan reaksi pembakaran. Resirkulasi juga meningkatkan pencampuran bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar, dan dapat menyuplai cukup oksigen segar ke dalam daerah reaksi.

*Swirl vanes* adalah alat yang digunakan untuk menciptakan zona resirkulasi internal (IRZ). Sedangkan zona resirkulasi eksternal (ERZ) ditimbulkan dari ekspansi geometris dari aliran udara saat terjadi proses pembakaran. Pada proses pembakaran difusi zona resirkulasi internal (IRZ) digunakan untuk menyempurnakan pencampuran bahan bakar dan udara agar proses pembakaran berlangsung sempurna, untuk menstabilkan beberapa fraksi hasil pembakaran, agar terbakar kembali sehingga kadar partikel pada zat *exhaust gas* dapat dikurangi. Maka dari itu, *swirl vanes* sering digunakan dalam berbagai model *burner* untuk meningkatkan kinerja dan efisiensi dari *burner* tersebut.



Gambar 2.8 Pipa burner dengan *swirl vanes*  
Sumber: Mahallawy dan Din Habik (2002)

*Swirl vanes* bekerja seperti sistem sudu-sudu yang diam yang hanya digunakan untuk membelokkan arah aliran udara seperti pada gambar 2.8. Konstruksi penempatan *swirl vanes* pada pipa aliran aksial adalah dengan diberi sudu-sudu yang memiliki bentuk dan

sudut tertentu, yang dapat merubah aliran aksial menjadi radial. Aliran radial ini menghasilkan gelembung resirkulasi yang berperan penting dalam stabilisasi api. Ada dua persyaratan utama untuk stabilisasi api, pertama, rasio campuran udara dan bahan bakar dan kedua, kecepatan yang cukup untuk mencocokkan kecepatan pembakarannya.

Secara luas banyak aplikasi yang menerapkan sistem kerja *swirl vanes*. Aliran misalnya *swirl vanes* digunakan pada *burner* turbin gas, *cyclone separator*, *cyclone combustor*, *swirl optimizer*, *heat exchanger*, mesin spray pertanian dll. Namun yang sering digunakan pada system pembakaran. Pada sistem pembakaran pengaruh kuat pengaplikasian *swirl* pada penginjeksian udara dan bahan bakar, digunakan sebagai bantuan untuk menyetabilkan proses pembakaran pada intensitas tinggi dan pembakaran ramah lingkungan pada mesin bensin, mesin diesel turbin gas, tungku pembakaran industri dan berbagai alat pemanas yang praktis.

### 2.7.1 Karakteristik Aliran Putar *Swirl Vanes*

Aliran putar termasuk salah satu topik penelitian yang cukup lama, namun masih menarik untuk dipelajari lebih dalam lagi. Aliran putar merupakan jenis aliran tiga-dimensi yang sangat kompleks, yang melibatkan banyak aspek fisik didalamnya.

Secara umum, karakteristik aliran putar dinyatakan dengan bilangan *swirl* (bilangan sirkulasi) dan bilangan *Reynolds* (*Re*), sebagaimana yang digunakan beberapa ilmuwan. Bilangan *swirl* yaitu bilangan nondimensional yang digunakan untuk menunjukkan kekuatan putaran (*swirl*) pada aliran putar. Didapat suatu kecenderungan, semakin tinggi bilangan *swirl* (untuk kasus kecepatan aksial rata-rata yang sama) maka kekuatan putaran aliran semakin tinggi. Bilangan *Reynolds* (*Re*) yaitu bilangan nondimensional yang digunakan untuk menunjukkan karakteristik turbulen aliran putar, secara fisik didefinisikan sebagai perbandingan antara gaya inersia dengan gaya friksi dari aliran yang bersangkutan. Semakin tinggi *Re* maka gaya inersia setiap bongkah aliran akan semakin tinggi pula sehingga aliran lebih bersifat turbulen. Untuk aliran di dalam tabung dengan penampang tetap, semakin tinggi *Re* maka berarti kecepatan aksial rata-rata aliran semakin tinggi.

Adapun kriteria non-dimensional, yaitu *swirl number* yang digunakan untuk menghitung jumlah rotasi suatu saluran:

$$S_N = 2G_m / (D_{sw} G_t) \quad (2.2)$$

Keterangan:

$G_m$  = fluks aksial momentm sudut (*axial fluks of angular momentum*)

$G_t$  = Gaya dorong aksial (*axial thrust*)

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, adalah sebagai berikut

$$S_n = \frac{2}{3} \left[ \frac{1 - \left(\frac{D_{hub}}{D_{sw}}\right)^3}{1 - \left(\frac{D_{hub}}{D_{sw}}\right)^2} \right] \tan \theta \quad (2.3)$$

Keterangan:

$D_{hub}$ : Diameter nozzle annular dalam

$D_{sm}$ : Diameter nozzle annular luar

Secara umum, bilangan *swirl* yang dibangkitkan akan semakin besar akibat penambahan sudut *vanes*. Ada dua jenis aliran *swirl* berdasarkan harga bilangan *swirl*nya, yaitu aliran putar kuat (*strong swirl*) dan aliran putar lemah (*weak swirl*) yang perhitungannya sesuai dengan persamaan diatas. Lebih jelasnya pada bagian berikut.

### 2.7.2 Karakteristik Aliran Putar Lemah (*Weak Swirl*) pada *Swirl Vanes*

Aliran putar lemah (*weak swirl*) biasanya dipilih oleh perancang atau peneliti untuk membangkitkan medan aliran putar namun tanpa terlalu mempengaruhi medan aliran secara keseluruhan. Aliran putar lemah mempunyai bilangan *swirl* kecil,  $S \leq 0,4$ . Untuk pembangkitan aliran putar menggunakan *swirl vanes*, maka *weak swirl* diperoleh dengan menggunakan sudut sudu yang relative kecil, antara  $0^\circ$  sampai  $30^\circ$ . Karakteristik aliran *weak swirl* yaitu komponen kecepatan aksial maksimum dan komponen kecepatan tangensial maksimum berada pada garis sumbu aliran. Kekuatan putar dari *weak swirl* tidak cukup kuat untuk membangkitkan daerah resirkulasi di dalam zona primer.

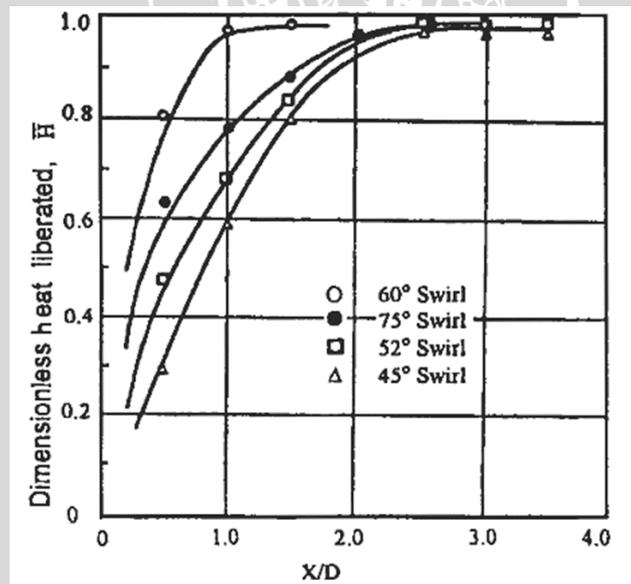
### 2.7.3 Karakteristik Aliran Putar Kuat (*Strong Swirl*) pada *Swirl Vanes*

Aliran putar kuat (*strong swirl*) mempunyai bilangan *swirl* kecil,  $S \geq 0,6$ . Untuk pembangkitan aliran *swirl* menggunakan *swirl vanes*, maka *strong swirl* diperoleh dengan menggunakan sudut sudu yang relatif besar, antara  $30^\circ$  sampai  $55^\circ$ . Karakteristik aliran *strong swirl* yaitu komponen kecepatan aksial maksimum dan komponen kecepatan tangensial maksimum bukan berada pada garis sumbu aliran, namun berada disekitar garis

sumbu. *Strong swirl* menimbulkan gradien tekanan aksial dan radial yang cukup untuk membentuk zona resirkulasi toroid, yang tidak teramati pada *weak swirl*.

## 2.8 Distribusi Temperatur Pada Penggunaan *Swirl*

Prinsip kestabilan dengan fluida berputar di saluran keluar *burner* dengan menggunakan *swirl vanes* mirip dengan prinsip kestabilan dengan penghalang seperti pemakaian pada *swirl nozzle* maupun *bluff body*. Ide dasarnya adalah menciptakan daerah berbentuk *downstream* bertekanan rendah sepanjang sumbu *burner*. Daerah bertekanan rendah terbentuk dengan memaksakan pembakaran udara dan bahan bakar yang memungkinkan untuk berputar dengan arah tangensial disekitar sumbu dalam kombinasinya dengan aliran aksial, sehingga akan meningkatkan *shear flow*. Peningkatan *shear flow* akan meningkatkan intensitas turbulensi namun juga mengurangi kecepatan aksial. Hal ini akan menyeimbangkan kecepatan reaksi dan juga dapat memperbesar kecepatan reaksi.

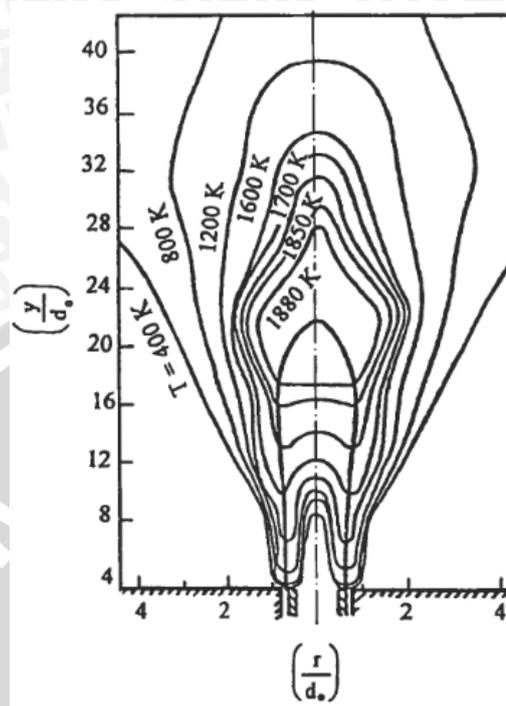


Gambar 2.9 Campuran bahan bakar, udara, dan hasil pembakaran pada api difusi  
Sumber: Mahallawy dan Din Habik (2002)

$$\bar{H}_l = 1 - \exp(-2.3 \frac{X_l}{D}) \quad (2.4)$$

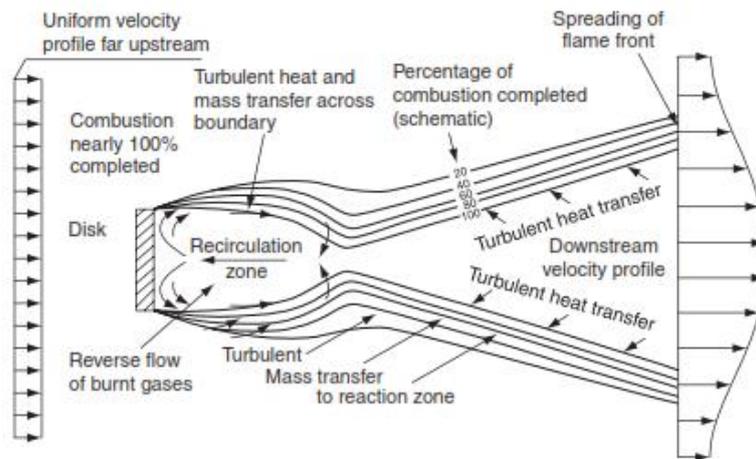
Grafik di atas menunjukkan hubungan bilangan non dimensional antara X/D dan H. Bilangan non dimensional H sendiri ditentukan berdasarkan rumus di bawah ini. H adalah pelepasan panas yang dinyatakan dengan fraksi dari energi kimia bahan bakar, X adalah jarak aksial dari penampang I yang dihitung dari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

Gambar 2.8 menunjukkan distribusi temperatur pada api. Pada gambar tersebut terdapat grafik hubungan ketinggian api dan lebar api dan distribusi suhu di setiap bagiannya.



Gambar 2.10 Distribusi suhu pada burner dengan diameter  $d_0 = 12.65$  mm dan  $Rc = 12130$   
Sumber: Mahallawy dan Din Habik (2002)

Pemasangan *swirl vanes* pada saluran udara akan menyebabkan terjadinya aliran *swirl* pada saat keluar burner. Aliran tersebut akan menyebabkan terjadinya zona resirkulasi yang timbul oleh aliran *swirl*, akibatnya adanya perbedaan kecepatan dan arah gerakan bahan bakar yang menyebabkan adanya batas gesekan (*shear layer*) antara aliran resirkulasi dengan daerah utama, dimana pada permukaan gesekan tersebut terjadi perpindahan panas (campuran bahan bakar dan udara yang sedang terbakar) ke gas dingin (bahan bakar), sehingga bahan bakar akan mengalami pemanasan awal.



Gambar 2.11 Zona resirkulasi dan daerah pancaran api  
Sumber: Glassman dan Yetter (2008)

Dengan adanya pemanasan awal berarti terjadi penambahan energi pada molekul-molekul bahan bakar, sehingga energi kinetik molekul-molekul akan meningkat. Akibatnya molekul-molekul yang bereaksi menjadi lebih aktif mengadakan tumbukan, sehingga pembakaran akan semakin baik seperti dinyatakan oleh Kuo (1986) bahwa semakin tinggi temperature awal maka kecepatan pembakaran juga akan meningkat

Dengan variasi bentuk dari *swirl vanes* maka diharapkan akan mendapatkan aliran udara yang berekspansi kearah tangensial sehingga dapat meningkatkan intensitas turbulensi. Intensitas turbulensi yang semakin besar dapat mengakibatkan kecepatan aksial yang menurun pada zona resirkulasi yang memungkinkan kecepatan reaksi dan kecepatan aliran dapat seimbang atau bahkan kecepatan reaksinya justru menjadi lebih besar. Akan tetapi hal ini bisa terjadi sebaliknya karena terlalu besar kecepatan tangensialnya yang ditimbulkan maka akan terjadi penurunan kecepatan aksial yang cukup besar, sehingga membawa aliran udara tangensial menuju kearah keluar dan memungkinkan penurunan kecepatan reaksi pembakaran serta menurunkan proses difusi yang terjadi antara bahan bakar dan udara. Ketika pencampuran udara dan bahan bakar semakin baik atau homogen, maka distribusi temperatur akan semakin merata atau meningkat.

## 2.9 Transport Fenomena

Transport Fenomena adalah suatu fenomena yang berhubungan dengan kecenderungan temperatur, konsentrasi dan kecepatan suatu partikel untuk berubah sehingga mencapai nilai yang sama. Tiga hal pokok yang dipelajari pada transport fenomena antara lain:

1. Mekanika Fluida,
2. Perpindahan Panas

### 3. Tranfer Massa.

Mekanika Fluida berhubungan dengan perpindahan momentum pada suatu fluida. Pada skala molekular, molekul akan bertumbukan dengan molekul lain sehingga terdapat perpindahan momentum antar molekul, pada skala yang lebih besar tumbukan antar molekul akan menunjukkan bagaimana aliran fluida tersebut apakah laminer atau turbulen. Perpindahan Panas berhubungan dengan panas yang berpindah dari suatu fluida yang memiliki temperatur lebih tinggi menuju temperatur yang lebih rendah dan Transfer Massa berhubungan perpindahan massa pada suatu fluida karena perbedaan konsentrasi dari suatu fluida. Ketiga hal pokok pada transport fenomena memiliki suatu kesamaan yaitu, sama sama mentransferkan sesuatu pada fluida yaitu momentum, temperatur, dan massa yang lebih tinggi menuju yang lebih rendah.

Rumus matematik dari transport fenomena didasarkan pada dua hal yaitu laju perindahan dari fluida sebanding dengan *driving force* yang diberikan pada suatu fluida dan Massa dan Energi tidak dapat dimusnahkan. Hukum dari transport fenomena didapatkan pertama didapatkan dari hokum setiap hal pokok pada transport fenomena yaitu:

- Hukum Newton, Mekanika Fluida

$$\mu \frac{du_x}{dx} = \tau \quad (2.5)$$

Keterangan:

$\mu$  = viskositas fluida

$u_x$  = kecepatan fluida

$\tau$  = tegangan geser fluida

- Hukum Fourier, Perpindahan Panas

$$-kA \left( \frac{dT}{dx} \right) = q \quad (2.6)$$

Keterangan:

$k$  = konduktifitas termal

$A$  = luasan daerah perpindahan panas

$T$  = temperatur

$q$  = laju perpindahan panas per waktu



- Hukum Fick, Tranfer Massa

$$-D_{AB} \left( \frac{Dc_A}{dz} \right) = J_A \quad (2.7)$$

Keterangan:

$D_{AB}$  = difusifitas A ke B

$c_A$  = konsentrasi A

$J_A$  = Flux molar dengan kecepatan molar rata rata

Persamaan pada pembakaran pada umumnya dinyatakan dengan persamaan transport fenomena yang menyangkut persamaan kontinuitas dan momentum. Pada pembakaran difusi terdapat beberapa fenomena transport yang terjadi, yaitu perpindahan massa, energi, dan gerak fluida.

## 2.10 Konservasi Massa dan Energi

Latar belakang dari konservasi massa dan energi dapat diketahui bahwa enegi tidak dapat dimusnahkan. Ide ini kemudian digabungkan dengan konsep mekanika fluida dengan menggunakan persamaan kontinuitas dengan dasar konservasi massa dan persamaan navier stokes dengan dasar persamaan momentum.

Persamaan Kontinuitas merupakan salah satu persamaan dasar mekanika fluida. Persmaan ini menyatakan bahwa massa fluida yang masuk pada pipa satu dengan massa fluida yang keluar pada pipa dua adalah sama, dan hasil kali antara luas penampang A dan kelajuan v pada titik sembarang selalu konstan. Persamaan kontinuitas dapat dituliskan:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2.8)$$

Persamaan di atas berlaku untuk aliran tunak maupun tak tunak, dan fluida termampatkan atau tak termampatkan. Aliran fluida disebut tunak jika kecepatan di setiap titik yang diberikan konstan terhadap waktu. Aliran fluida disebut tak termampatkan jika fluida yang mengalir tidak mengalami perubahan volume atau massa jenis. Fluida ideal adalah fluida yang tak termampatkan, tidak kental, dan tidak memiliki aliran tunak. Dalam notasi vector persmaan di atas dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \rho \bar{v} = 0 \quad (2.9)$$

Persamaan momentum untuk massa dimana dapat dicari dengan hukum kedua Newton dimana:

$$dF = dm \left( \frac{dv}{dt} \right) \text{ sistem} \quad (2.10)$$

Untuk aliran tak termampatkan dengan viskositas konstan, persamaan ini dapat disederhanakan ke bentuk:

$$\rho \frac{\partial v_x}{\partial t} = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \quad (2.11)$$

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

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

Dari penurunan persamaan kontinuitas dan momentum untuk mendapatkan Persamaan Navier Stokes dari konservasi massa dan energi didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \quad (2.12)$$

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

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

Keterangan:

$\rho$  = densitas fluida

$\frac{dv}{dt}$  = derivative substantive (derivative material)

$v$  = vector kecepatan

$p$  = tensor yang menyatakan gaya gaya permukaan yang bekerja pada partikel fluida.

## 2.11 Gas Inert Nitrogen (N<sub>2</sub>)

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 % seperti ditunjukkan pada tabel 2.1. 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. Pada Tabel 2.2 dapat dilihat properti kimia dari nitrogen.

Tabel 2.2  
Properti kimia nitrogen

Rumus Molekul	N <sub>2</sub>
Wujud	Gas
Warna	Tidak berwarna
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

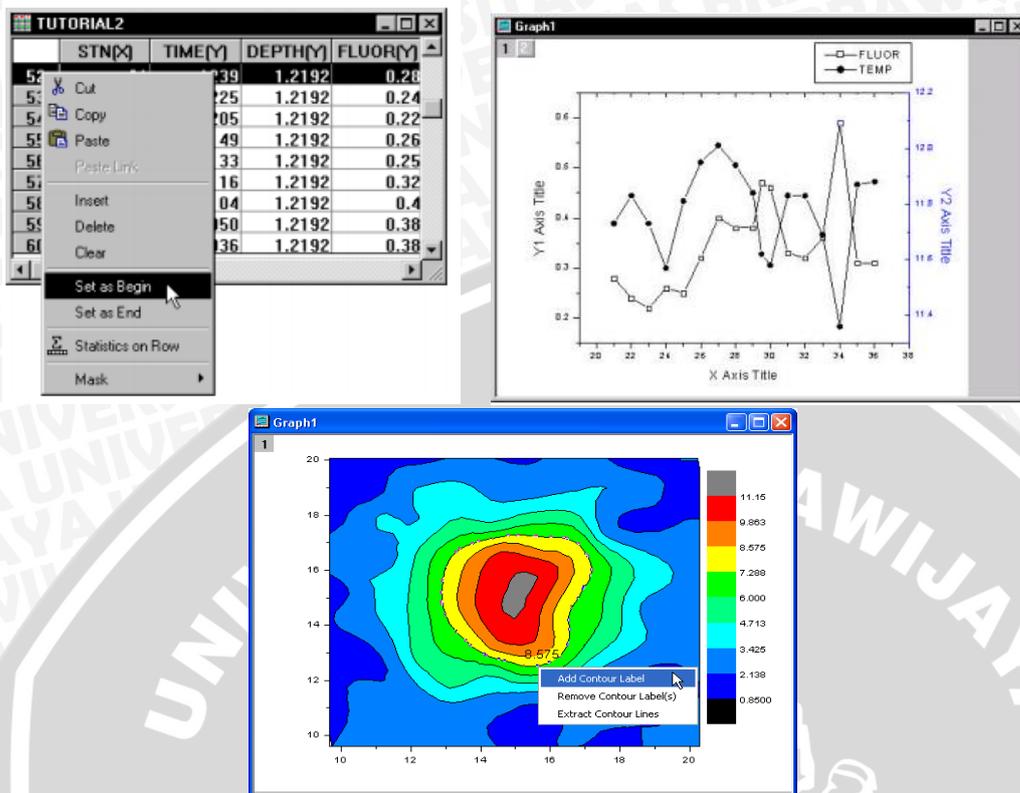
Sumber: Tjokroawidjojo (1986)

Pada suhu atmosfer (25 °C dalam keadaan STP), nitrogen sulit beraksi dengan unsur lain kecuali lithium. Pada suhu tinggi nitrogen dapat bereaksi dengan logam alkali dan alkali tanah selain itu juga dengan unsur non logam seperti oksigen dan nitrogen. Batas suhu nitrogen dapat bereaksi yakni diatas 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 kesediaan yang sangat banyak pada udara bebas. Selain nitrogen sebenarnya gas CO<sub>2</sub> 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.

### 2.12 Origin Lab

*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 2.12 Plotting range dari worksheet excel menjadi grafik 2D dan 3D  
Sumber : Microcal Software, Inc (1999:17)

Pada penelitian ini *software origin* yang digunakan merupakan *Origin Pro 8.0*. Data yang diinput berupa data excel temperatur dari api difusi. Data temperatur tersebut kemudian diubah menjadi grafik 2D seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13, 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 3D yang ditunjukkan pada Gambar 2.12.

### 2.13 Hipotesa

Semakin besar turbulensi yang dihasilkan suatu *swirl vanes* maka semakin merata distribusi temperaturnya, dikarenakan pencampuran bahan bakar dan udara berlangsung sempurna sehingga terjadi proses pembakaran yang sempurna pula. Disamping itu, turbulensi juga berpengaruh pada proses perpindahan kalor diudara sehingga kalor tersebar lebih merata. Dalam penelitian ini besar turbulensi dari aliran udara dapat dipengaruhi oleh bentuk dari *swirl vanes*.

### BAB III METODE PENELITIAN

Dalam penelitian kali ini menggunakan metode eksperimental nyata (*true experimental reseach*). Metode ini dilakukan dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk mengetahui ada tidaknya hubungan sebab akibat melalui sebuah uji eksperimen untuk mendapatkan data empiris. Dalam hal ini objek penelitiannya adalah pengaruh bentuk *swirl vanes* terhadap karakteristik pembakaran difusi  $\text{CH}_4$  pada *bluff body*.

#### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada bulan Juni 2016 sampai Juli 2016 penelitian ini dilaksanakan Laboraturium Mesin Fluida, Jurusan Mesin, fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.

#### 3.2 Variabel Penelitian

Variabel penelitian adalah suatu besaran yang dapat diubah atau berubah sehingga dapat mempengaruhi peristiwa atau hasil penelitian. Dengan penggunaan variabel, kita dapat dengan mudah memperoleh dan memahami permasalahan. Variabel–variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

##### 3.2.1 Variabel Bebas

Variabel bebas adalah suatu variable yang tidak dapat terpengaruh/dirubah oleh adanya variabel lainnya. Besaran dari variabel bebas ini dapat diubah-ubah ataupun konstan, sehingga nantinya diharapkan muncul hubungan dari variabel bebas dan terikatnya agar tujuan dari penelitian ini dapat tercapai. Dalam penelitian kali ini variabel bebasnya adalah sebagi berikut:

- Kecepatan aliran bahan bakar : 1.32, 2.65, 3.98, 5.30, 6.63, 7.96, 9.29, 10.61, 11.94, 13.26, 14.59, dan 15.92 m/s
- Kecepatan aliran udara : 0.9, 1, 1.5, 1.6, 2 dan 2.6 m/s
- Kecepatan aliran nitrogen ( $\text{N}_2$ ) : 0,5 m/s
- Bentuk alur *Swirl Vanes* : (terlampir)

### 3.2.2 Variabel Terikat

Variabel terikat adalah suatu variabel yang besarnya dipengaruhi oleh besarnya variabel bebasnya dan besarnya tersebut dapat diketahui setelah penelitian sudah dilakukan. Dalam penelitian kali ini variabel terikatnya adalah distribusi temperatur api difusi dengan variasi bentuk *swirl vanes* dan penempatan *thermocouple* dari alat ukur temperatur.

### 3.2.3 Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol adalah variabel yang dikendalikan atau dibuat konstan sehingga hubungan variabel bebas terhadap variabel terikat tidak terpengaruh oleh faktor luar yang tidak diteliti. Variabel yang dikontrol pada penelitian ini adalah waktu pengukuran temperatur di tiap-tiap titik.

## 3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

#### 1. Ruang bakar (*burner*)

Ruang bakar ini digunakan untuk tempat proses pembakaran dan tempat untuk mengamati temperatur saat proses pembakaran berlangsung. Ruang bakar ini memiliki dimensi ukuran.

#### 2. Tabung gas Metana ( $\text{CH}_4$ )

Tabung gas metana ini digunakan untuk menampung bahan bakar gas metana ( $\text{CH}_4$ ).

#### 3. Tabung gas Nitrogen ( $\text{N}_2$ )

Tabung gas nitrogen ini digunakan untuk menampung gas Nitrogen ( $\text{N}_2$ ).

#### 4. *Flowmeter*

Untuk mengukur besar kecepatan aliran bahan bakar.

#### 5. *Centrifugal fan*

*Centrifugal fan* digunakan untuk memasok kebutuhan udara dengan spesifikasi sebagai berikut:

- a. Model : *electric blower*
- b. Ukuran : 2''
- c. Tegangan : 220 V
- d. Arus : 1 A
- e. Putaran : 3600 rpm

#### 6. *Thermocouples*

*Thermocouples* digunakan untuk mengukur distribusi temperatur pada api difusi, Jenis *thermocouple* yang digunakan adalah *thermocouple* jenis K dengan temperatur maksimum 1370°C.

#### 7. *Swirl vanes*

*Swirl vanes* digunakan untuk mengubah aliran aksial dari udara (udara primer) menjadi aliran udara yang bersifat radial. Bentuk dan dimensi *swirl vanes* terlampir.

#### 8. Kamera SLR

Kamera SLR Digunakan untuk mengambil nyala api, baik gambar nyala api difusi pada pemasangan variasi *swirl vanes*. Kamera SLR yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- a. *Merk* : Canon
- b. *Model* : 1100 D
- c. *Resolution* : 10 Mega Pixels
- d. *Video* : 24p/s
- e. *File Formats* : JPEG

#### 9. *Tripod*

*Tripod* digunakan untuk tempat kamera ketika proses pengambilan gambar agar gambar yang dihasilkan oleh kamera tajam dan juga sebagai alat untuk menjaga jarak anatar kamera dengan objek tidak berpinda-pindah.

#### 10. *Blower*

*Blower* digunakan untuk mencampur udara dan nitrogen dan juga alat untuk mengalirkannya.

#### 11. Pipa saluran udara

Pipa saluran udara primer ini digunakan untuk saluran dari udara sebelum melewati *swirl vanes* dengan ukuran diameter pipa sebesar 1”

#### 12. Pipa saluran Nitrogen (N<sub>2</sub>)

Pipa saluran udara sekunder ini digunakan untuk saluran campuran nitrogen (N<sub>2</sub>) dan udara dengan ukuran diameter pipa sebesar 2”.

#### 13. Pipa saluran bahan bakar

Pipa saluran bahan bakar ini digunakan untuk saluran bahan bakar metana (CH<sub>4</sub>) untuk menyuplai bahan bakar dalam proses pembakaran, pipa ini meliki ukuran diameter pipa sebesar 8 mm dan ketebalan pipa 2 mm.

14. *Stop Valve* (kran)

*Stop Valve* (kran) digunakan untuk mengatur kapasitas aliran bahan bakar, udara dan nitrogen yang akan digunakan.

## 15. Manometer

Manometer digunakan untuk mengukur kecepatan udara.

16. *Data Logger*

Perangkat sensor yang akan menyimpan data temperatur dari *thermocouples* di computer. *Data Logger* digunakan sebagai alat untuk mengubah data analog dari *thermocouple* menjadi data digital untuk komputer. *Data Logger* yang dipakai pada penelitian ini menggunakan *Advantech*.

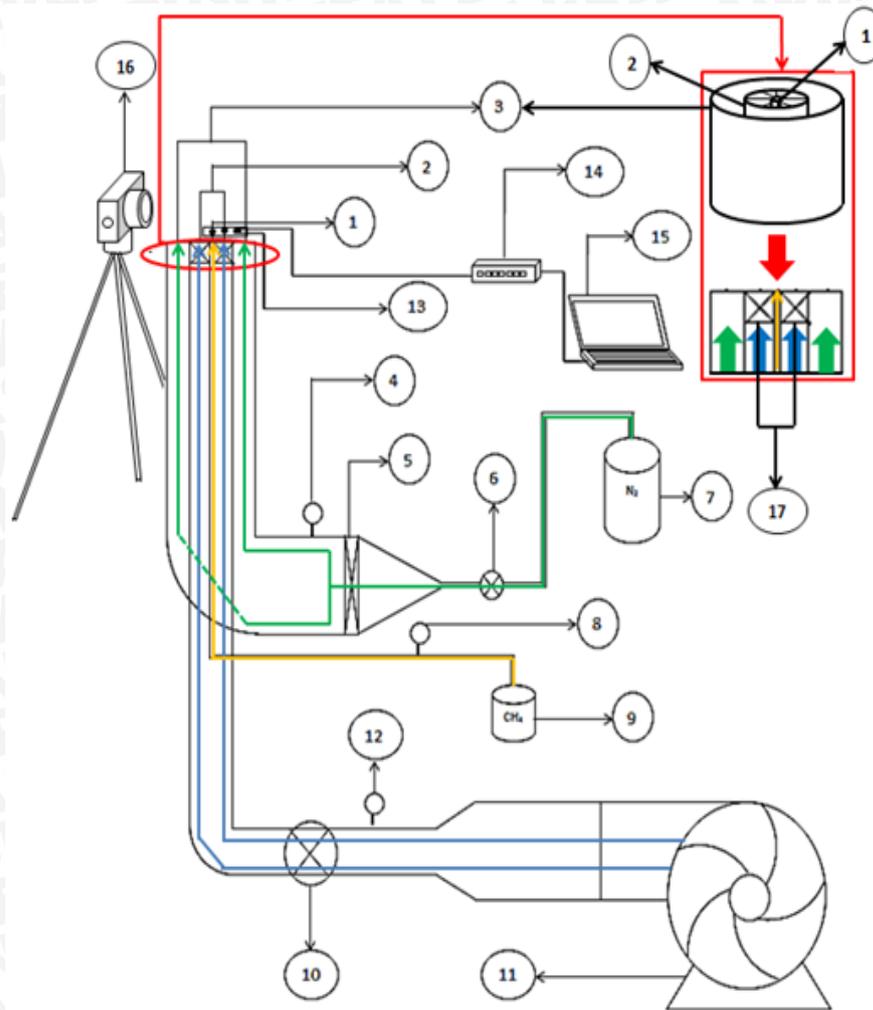
- a. Merk : Advantech
- b. *Channels* : 8
- c. *Input Type* : mV, V dan MA
- d. *Input Range* : *Thermocouple type J, K, T, E, R, S, dan B*
- e. *Sampling Rate* : 10 *samples*
- f. *Accuracy* :  $\pm 0,1 \%$
- g. *Zero Drift* :  $\pm 0,3 \text{ uV} / ^\circ\text{C}$
- h. *Spand Drift* :  $\pm 25 \text{ ppm} / ^\circ\text{C}$
- i. CRM @ 50/60 Hz : 92 dB
- j. *Input Impedance* : 1,8 M

## 17. Komputer

Komputer digunakan untuk memvisualisaikan data digital dari data logger kedalam bentuk grafik atau table.

### 3.4 Instalasi Penelitian

Skema susunan alat yang digunakan proses dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:



Keterangan :

1. Pipa saluran bahan bakar
2. Pipa saluran udara
3. Pipa saluran Nitrogen
4. Manometer
5. Blower
6. Stop valve nitrogen ( $N_2$ )
7. Tabung gas nitrogen ( $N_2$ )
8. Flowmeter bahan bakar metana ( $CH_4$ )
9. Tabung gas metana ( $CH_4$ )
10. Stop Valve saluran udara ( $CH_4$ )
11. Centrifugal Fan
12. Manometer
13. Thermocouples
14. Data Loger
15. Komputer
16. Kamera
17. Swirl Vanes

Keterangan warna : — Aliran udara  
 — Aliran Bahan Bakar ( $CH_4$ )  
 — Aliran Nitrogen ( $N_2$ )

Gambar 3.1 Skema Instalasi Alat

## 3.5 Prosedur Penelitian

### 3.5.1 Visualisasi Api

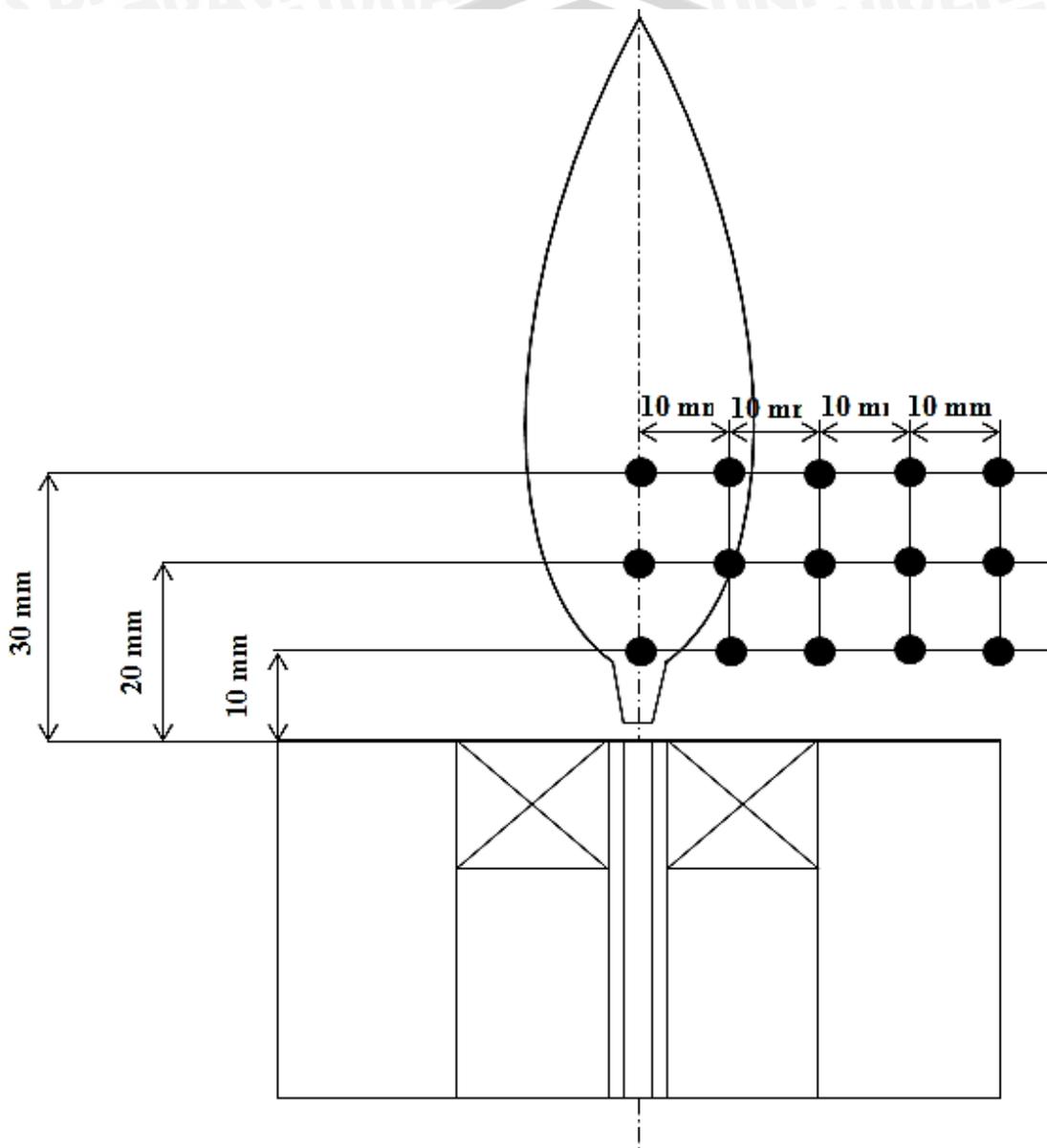
Untuk mendapatkan data penelitian yang sesuai dengan yang kita inginkan, maka langkah-langkah yang kita gunakan dalam penelitian kali ini yang pertama adalah memastikan dan mempersiapkan semua alat yang kita perlukan saat penelitian. Setelah semua alat siap maka pasang *swirl vanes* dengan tipe alur *twist*. langkah selanjutnya mengatur kecepatan sentrifugal fan dengan mengatur bukaan stop valve pada kecepatan aliran udara yang telah ditentukan sebesar 0,9 m/s sebagai suplai aliran udara aksial. Serta atur kecepatan blower untuk aliran udara dan nitrogen aksial sebesar 0,5 m/s. Setelah aliran udara diatur semua kemudian buka *stop valve* untuk saluran bahan bakar dan susuaikan kecepatan aliran yang pertama langkah berikutnya adalah beri pemantik api

pada *burner* sebagai energi aktivasi untuk proses pembakaran. Pastikan nyala api sudah terlihat stabil, ambil gambar nyala api difusi pada kondisi tertentu dengan kamera. Setelah itu, didapatkan data dari bentuk alur *swirl vanes* tipe alur A dengan kecepatan aliran bahan bakar yang pertama. Kemudian atur lagi kecepatan aliran bahan bakar yang kedua langkah berikutnya adalah beri pemantik api pada *burner* sebagai energi aktivasi untuk proses pembakaran. Pastikan nyala api sudah terlihat stabil, ambil gambar nyala api difusi pada kondisi tertentu dengan kamera. Setelah itu, didapatkan data dari bentuk alur *swirl vanes* tipe alur *twist* dengan kecepatan aliran bahan bakar yang kedua dan seterusnya hingga kecepatan bahan bakar ke-12 yaitu 15,92 m/s. Baru setelah didapatkan gambar api difusi *swirl vanes twist* dengan 12 parameter kecepatan ganti dengan variasi kecepatan udara dan langkahnya seperti pengambilan data variasi kecepatan bahan bakar tadi. Setelah semua parameter kecepatan udara dan bahan bakar terpenuhi ganti bentuk *swirl vanes* tipe melengkung dan miring  $30^\circ$ . Langkah-langkah yang digunakan seperti langkah-langkah yang sebelumnya.

### 3.5.2 Distribusi Temperatur

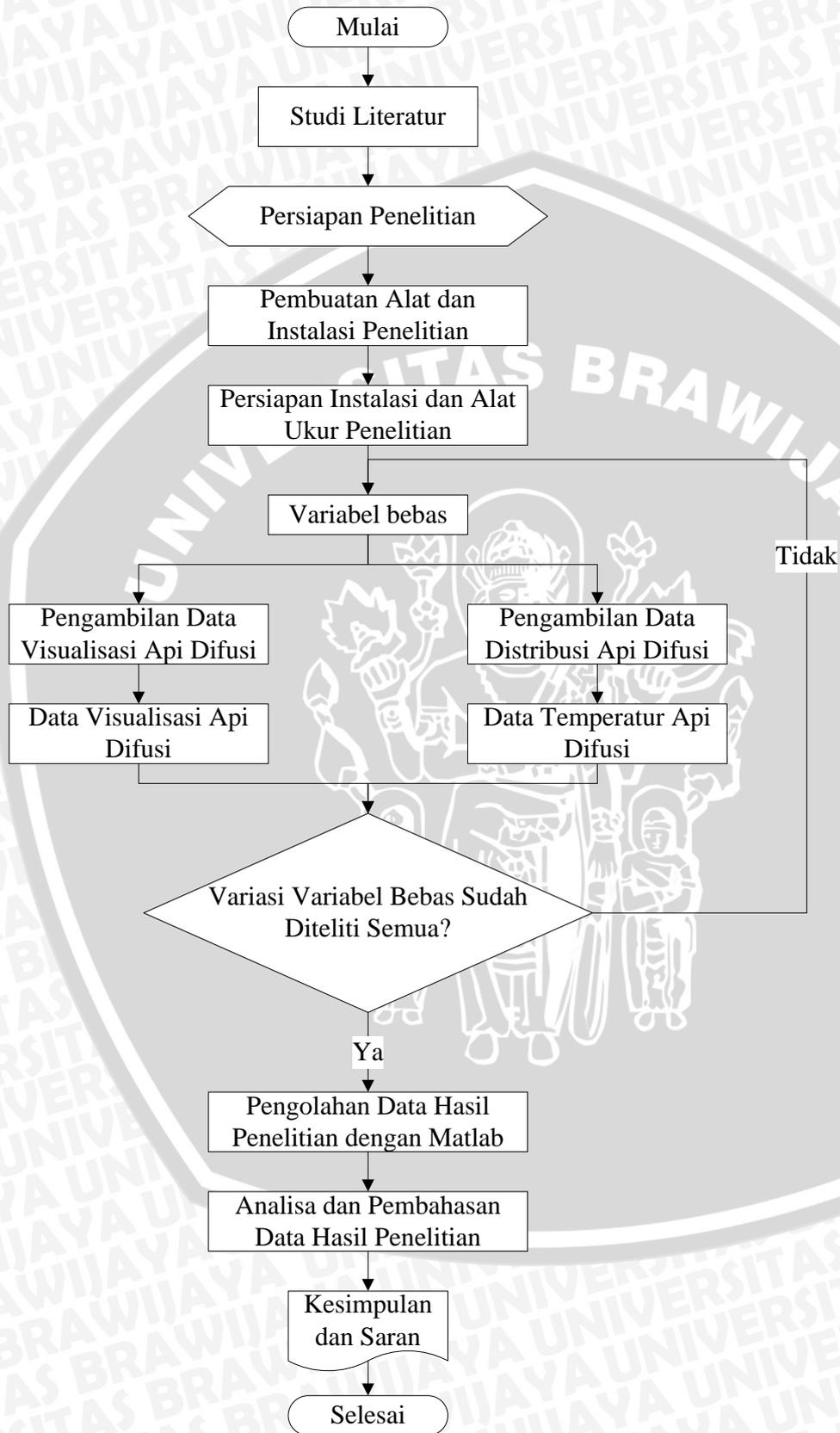
Untuk mendapatkan data penelitian yang sesuai dengan yang kita inginkan, maka langkah-langkah yang kita gunakan dalam penelitian kali ini yang pertama adalah memastikan dan mempersiapkan semua alat yang kita perlukan saat penelitian. Setelah semua alat siap maka pasang *swirl vanes* dengan tipe *twist*. langkah selanjutnya mengatur kecepatan sentrifugal fan dengan mengatur bukaan stop valve pada kecepatan aliran udara yang telah ditentukan sebesar 0,9 m/s sebagai suplai aliran udara aksial. Serta atur kecepatan blower untuk aliran udara dan nitrogen aksial sebesar 0,5 m/s. Setelah aliran udara diatur semua kemudian buka *stop valve* untuk saluran bahan bakar dan susuaikan kecepatan aliran yang pertama langkah berikutnya adalah beri pemantik api pada *burner* sebagai energi aktivasi untuk proses pembakaran. Pastikan nyala api sudah terlihat stabil, setelah itu ambil data temperature api difusi pada setiap titik pengukuran api sesuai pada gambar 3.2 dengan menggunakan *thermocouples*. Setiap titik pengambilan data diambil selama 10 detik untuk memperoleh temperatur yang konstan. Setelah pengambilan data temperatur selesai dilakukan, kemudian dilanjutkan pada kecepatan bahan bakar tertentu. Data Temperatur yang telah didapatkan kemudian nilainya akan dirata rata. Pada setiap titik jarak horizontal, nilai temperatur vertikalnya akan dirata rata untuk kemudian dilihat distribusi temperatur pada grafik. Nilai temperatur jarak vertikal pada jarak horizontal didapatkan menggunakan interpolasi menggunakan *software origin* hingga akhirnya

didapatkan data temperatur. Setelah mengetahui distribusi temperatur dari grafik kemudian dilihat bagaimana kontur dari distribusi temperatur pada setiap variasi bentuk *swirl* pada kecepatan bahan bakar tertentu dengan melihat warna yang tersebar pada visualisasi api. Ganti dengan variasi bentuk *swirl* vanes tipe melengkung dan miring  $30^\circ$ . Langkah-langkah yang digunakan seperti langkah-langkah yang sebelumnya.



Gambar 3.2 Titik Pengukuran Distribusi Temperatur Pada Api Difusi

### 3.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.3 Diagram Alir Penelitian

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Penelitian

Data yang diperoleh dalam penelitian pengaruh bentuk *swirl vanes* terhadap distribusi temperatur dan visualisasi ini berupa kecepatan aliran udara diukur dengan manometer melalui *orifice* udara, kecepatan aliran nitrogen ( $N_2$ ) diukur dengan manometer melalui *orifice* nitrogen ( $N_2$ ). Dengan prinsip perbedaan tekanan pada penampang saluran akibat melalui *orifice*, maka dapat kita tentukan kecepatan aliran dengan persamaan kontinuitas dan persamaan Bernoulli. Kecepatan aliran bahan bakar diukur dengan *flowmeter* bahan bakar. Serta data hasil temperatur yang didapat dari titik pengukuran temperatur yang diukur menggunakan *thermocouples*. Dari data temperatur akan diperoleh nilai rata-rata temperatur sehingga diketahui distribusi temperturnya. Selain itu, didapat data hasil visualisasi yang diperoleh dari pengambilan foto saat api menyala.

### 4.2 Perhitungan Data

#### a. Perhitungan Kecepatan Udara

- Diketahui:  $\rho_{ud}$  = massa jenis udara ( $1,208 \text{ kg/m}^3$ )  
 $\rho_{air}$  = 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 ( $0,000506451 \text{ m}^2$ )  
 $C$  = Koefisien kontraksi dari grafik hubungan kecepatan dan bilangan Reynold (munson)

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \dot{m}_{udara} &= 1,208 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot 5,067 \times 10^{-4} \text{ (m}^2) \cdot 0,1442 \text{ (m/s)} \\ &= 5,21 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Bila udara keluar pada diameter 0,0127 m, maka kecepatan udaranya adalah:

$$v = \frac{0,882 \times 10^{-4}}{1,208 \times 0,00056} = 3,41 \text{ m/s}$$

#### b. Perhitungan Kecepatan Bahan Bakar

Diketahui :  $Q$  = debit bahan bakar (L/menit)  
 $A$  = luas penampang saluran bahan bakar ( $1,25 \times 10^{-5}$ )  
 $v$  = kecepatan bahan bakar (m/s)

Kecepatan bahan bakar pada debit 1 L/menit

$$Q = 1 \frac{L}{menit} = 1 \frac{0,001}{60} = 1,67 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = A \cdot v$$

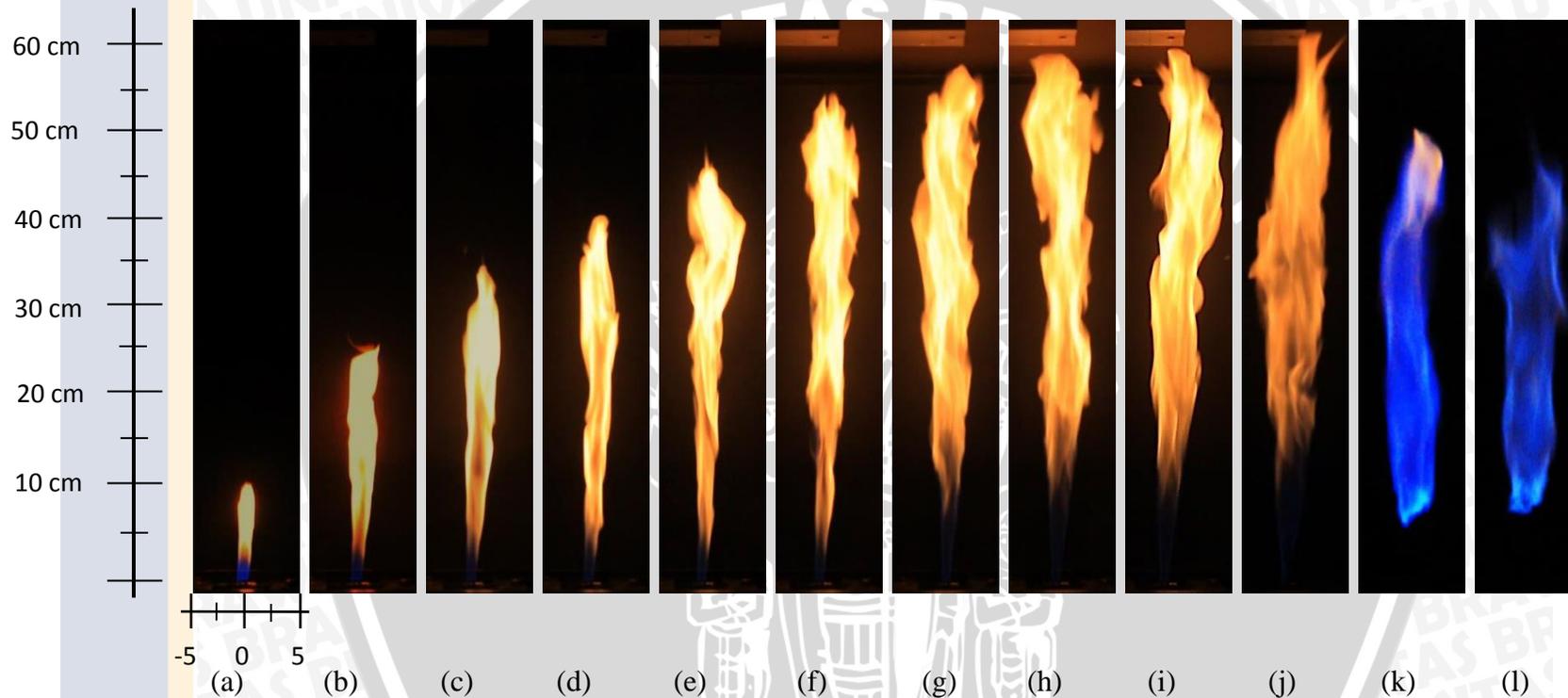
$$v = \frac{Q}{A} = \frac{1,67 \times 10^{-5}}{1,25 \times 10^{-5}} = 1,32 \text{ m/s}$$

### 4.3 Visualisasi Api

Visualisasi api disini digunakan untuk mengetahui karakteristik dari api yang dilihat dari tinggi, warna dan bentuk api pada beberapa perubahan kondisi. Untuk penelitian kali perbedan perubahan kondisi disini dilihat dari perubahan kecepatan bahan bakar, perubahan kecepatan udara dan perbedaan bentuk *swirl vanesnya*.

### 4.3.1 Kecepatan Udara Konstan Kecepatan Bahan Bakar Divariasikan

#### 4.3.1.1 Swirl Tipe Twist



Gambar 4.1 Visualisasi api swirl tipe twist dengan kecepatan udara 0,9 m/s dan variasi kecepatan bahan bakar

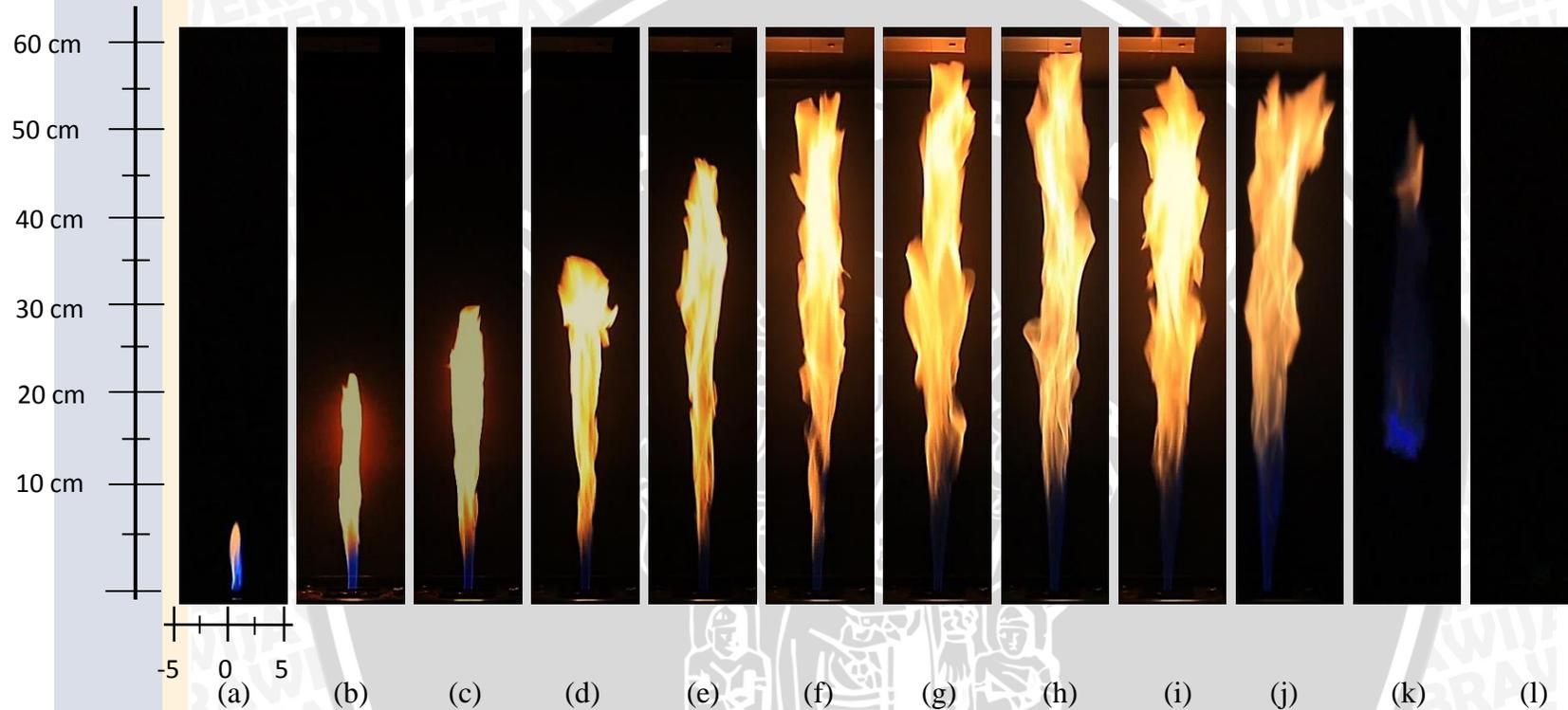
- |              |               |               |
|--------------|---------------|---------------|
| (a) 1.32 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s | (j) 13.26 m/s |               |

Pada gambar diatas kita dapat melihat visualisasi api dengan menggunakan *swirl* tipe *twist* dengan menggunakan kecepatan udara konstan dan variasi kecepatan bahan bakar yang divariasikan. Gambar 4.1 merupakan visualisasi api kecepatan udara 0,9 m/s yang ditunjukkan pada manometer. Pada gambar 4.1 ini kita dapat melihat bahwa kecepatan bahan bakar dari 1.32, 2.65, 3.98, 5.30, 6.63, 7.96, 9,29, 10.61, 11.94, 13.26, 14.59, dan 15.92 m/s terus mengalami peningkatan tinggi api. Berarti ini telah sesuai dengan teori bahwa panjang api tersebut berbanding lurus dengan kecepatan bahan bakar yakni panjang api meningkat dengan peningkatan kecepatan bahan bakanya. Akan tetapi semakin cepat kecepatan bahan bakar ujung api akan semakin tidak stabil. Dan juga semakin cepat kecepatan bahan bakar maka tinggi api yang berwarna biru juga akan semakin tinggi.

Ketidak stabilan api ini menunjukkan bahwa ada perubahan aliran pada daerah transisi dari laminer ke turbulen. Ketidak stabilan api tersebut akan semakin menyebar dan mendekat ke ujung saluran bahan bakar seiring dengan bertambahnya kecepatan seperti pada kecepatan bahan bakar 13.26 m/s yang dapat kita lihat api tidak stabil dari ujung bawah api sampai ujung atas api. Setelah api mengalami ketidak stabilan diseluruh bagian api maka tinggi api akan cenderung semakin memendek seiring bertambahnya kecepatan bahan bakar dan juga api akan semakin menjauhi mulut bahan bakar, seperti yang ditunjukkan oleh kecepatan bahan bakar 14.59 sampai kecepatan bahan bakar 15.92 m/s.

Selain itu warna api semakin didominasi warna biru, itu diakarenakan penambahan kecepatan bahan bakar akan menyebabkan aliran semakin turbulen. Dari keseluruhan variasi bahan bakar dapat diketahui bahwa kondisi turbulen mulai terjadi pada kecepatan aliran 13.26, 14.59, dan 15.92 m/s dengan besar bilangan reynold berturut-turut yaitu 4243.2, 4668.8, dan 5095.4. Dimana semakin besar aliran turbulen menyebabkan proses difusi yang terjadi semakin cepat dan reaksi bahan bakar dan udara yang semakin baik, hal inilah yang menyebabkan api semakin biru. Akan tetapi, pada keepayan 14,59 m/s api semakin manjauh dari mulut saluran bahan bakar ini menandakan bahwa api mengalami kondisi *Lift Off* yang dikarenakan kecepatan bahan bakar lebih besar daripada kecepatan udara. Jika sudah masuk kondisi ini bisa dipastikan bahwa jika kecepatan bahan bakar terus ditambah akan menyebabkan api semakin menjauh dari mulut saluran bahan bakar dan kemudian api akan mati.

### 4.3.1.2 Swirl Tipe Melengkung



Gambar 4.2 Visualisasi api *swirl* tipe melengkung dengan kecepatan udara 0,9 m/s dan variasi kecepatan bahan bakar

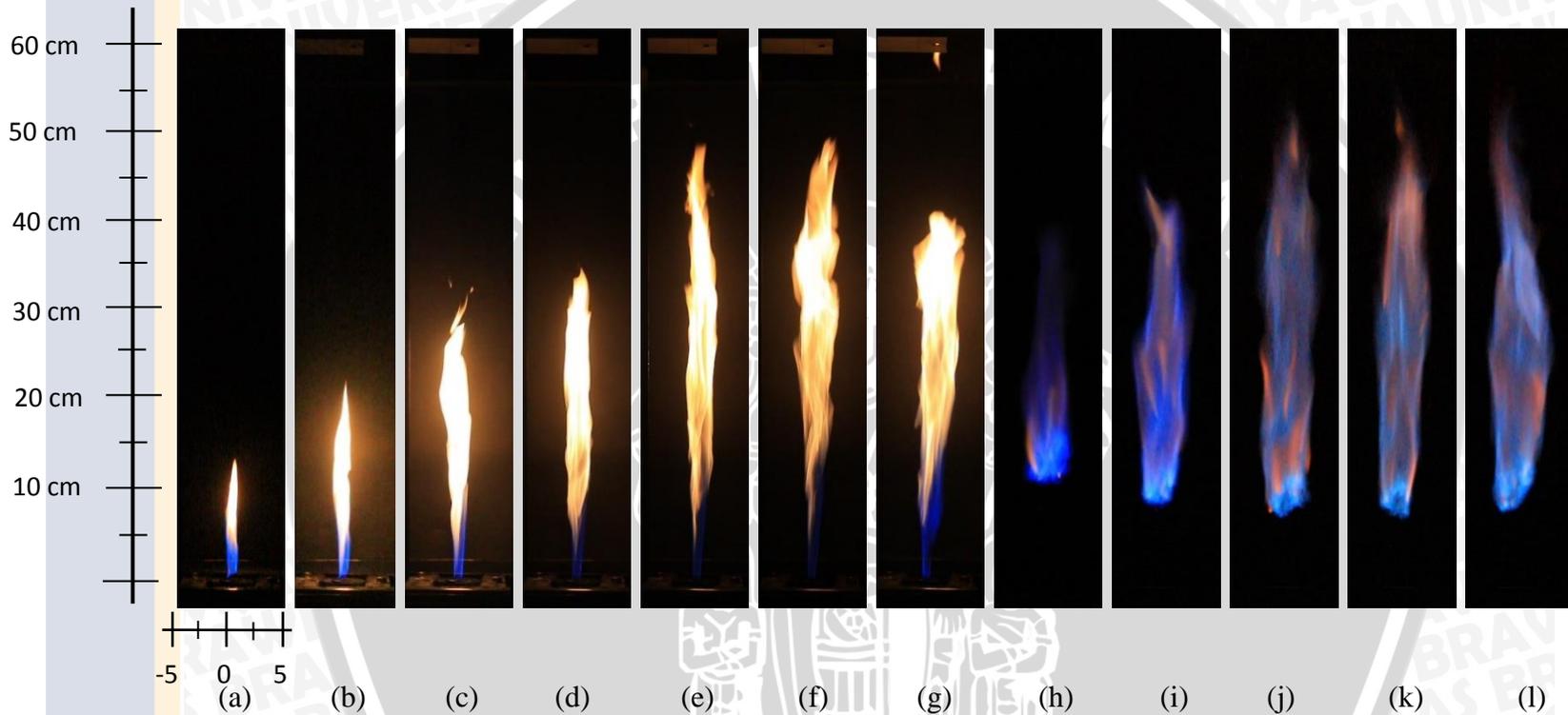
- |              |               |
|--------------|---------------|
| (a) 1.32 m/s | (g) 9,26 m/s  |
| (b) 2.65 m/s | (h) 10.61 m/s |
| (c) 3.98 m/s | (i) 11.94 m/s |
| (d) 5.30 m/s | (j) 13.26 m/s |
| (e) 6.63 m/s | (k) 14.59 m/s |
| (f) 7.96 m/s | (l) 15.92 m/s |

Pada gambar diatas kita dapat melihat visualisasi api dengan menggunakan *swirl* tipe melengkung dengan menggunakan kecepatan udara konstan dan variasi kecepatan bahan bakar yang berbeda. Gambar 4.2 merupakan visualisasi api kecepatan udara 0,9 m/s yang ditunjukkan pada manometer. Pada gambar 4.2 ini kita dapat melihat bahwa kecepatan bahan bakar 1.32, 2.65, 3.98, 5.30, 6.63, 7.96, 9,29 dan 10.61 m/s terus mengalami peningkatan tinggi api. Berarti ini telah sesuai dengan teori bahwa panjang api tersebut berbanding lurus dengan kecepatan bahan bakar yakni panjang api meningkat dengan peningkatan kecepatan bahan bakarnya. Akan tetapi, pada kecepatan bahan bakar 10.61 m/s sampai dengan seterusnya api semakin memendek dan semakin tidak stabil. Dari data visualisasi ini dapat diambil kesimpulan bahwa semakin cepat kecepatan bahan bakar ujung api akan semakin tidak stabil. Dan juga semakin cepat kecepatan bahan bakar maka tinggi api yang berwarna biru juga akan semakin tinggi.

Ketidak stabilan api ini menunjukkan bahwa ada perubahan aliran pada daerah transisi dari laminar ke turbulen. Ketidak stabilan api tersebut akan semakin menyebar dan mendekati ke ujung saluran bahan bakar seiring dengan bertambahnya kecepatan seperti pada kecepatan bahan bakar 10,61 m/s yang dapat kita lihat api tidak stabil dari ujung bawah api sampai ujung atas api. Setelah api mengalami ketidak stabilan diseluruh bagian api maka tinggi api akan cenderung semakin memendek seiring bertambahnya kecepatan bahan bakar, seperti yang ditunjukkan oleh kecepatan bahan bakar 11.94 m/s sampai kecepatan bahan bakar 13.26 m/s.

Selain itu warna api semakin didominasi warna biru, itu diakarenakan penambahan kecepatan bahan bakar akan menyebabkan aliran semakin turbulen. Dari keseluruhan variasi bahan bakar dapat diketahui bahwa kondisi turbulen mulai terjadi pada kecepatan aliran 13.26, 14.59, dan 15.92 m/s dengan besar bilangan reynold berturut-turut yaitu 4243.2, 4668.8, dan 5095.4. Dimana semakin besar aliran turbulen menyebabkan proses difusi yang terjadi semakin cepat dan reaksi bahan bakar dan udara yang semakin baik, hal inilah yang menyebabkan api semakin biru. Akan tetapi, pada kecepatan bahan bakar 14.59 m/s api semakin menjauh dari mulut saluran bahan bakar ini menandakan bahwa api mengalami kondisi *Lift Off* yang dikarenakan kecepatan bahan bakar lebih besar daripada kecepatan udara. Jika sudah masuk kondisi ini bisa dipastikan bahwa jika kecepatan bahan bakar terus ditambah akan menyebabkan api semakin menjauh dari mulut saluran bahan bakar dan kemudian api akan mati. Seperti yang ditunjukkan pada kecepatan bahan bakar 15.92 m/s yang sudah tidak bisa menyala lagi berbeda dengan *swirl* tipe *twist* yang masih dapat menyala hingga kecepatan bahan bakar 15.92 m/s.

4.2.1.3 Swirl Tipe Miring 30°



Gambar 4.3 Visualisasi api swirl tipe miring sudut 30° dengan kecepatan udara 0,9 m/s dan variasi kecepatan bahan bakar

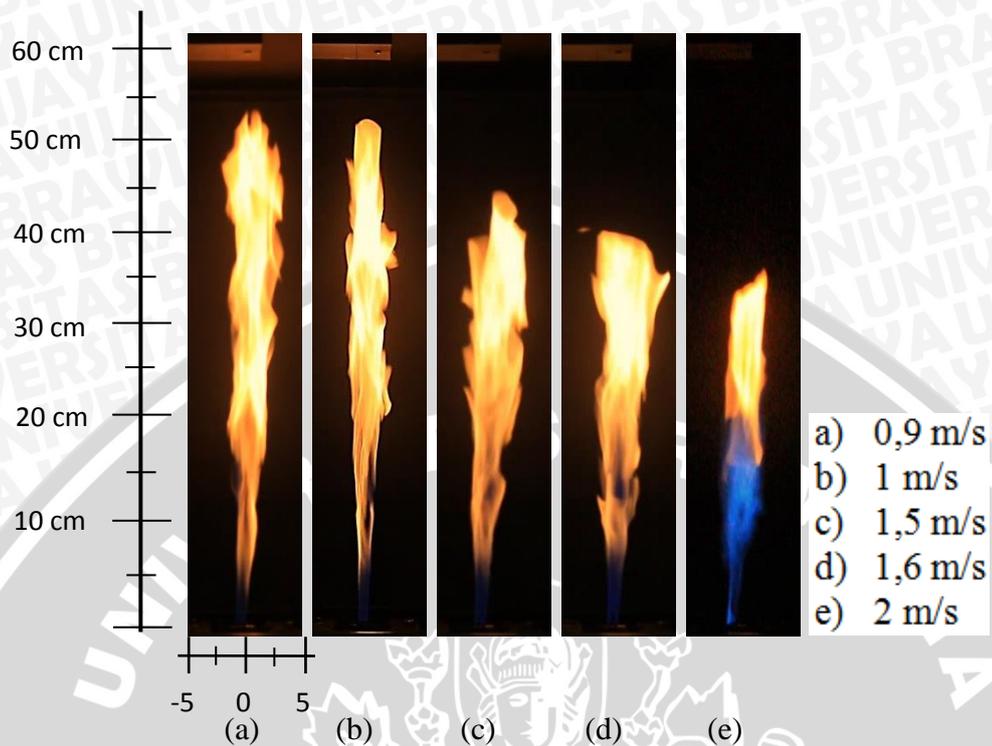
- |              |               |
|--------------|---------------|
| (a) 1.32 m/s | (g) 9,26 m/s  |
| (b) 2.65 m/s | (h) 10.61 m/s |
| (c) 3.98 m/s | (i) 11.94 m/s |
| (d) 5.30 m/s | (j) 13.26 m/s |
| (e) 6.63 m/s | (k) 14.59 m/s |
| (f) 7.96 m/s | (l) 15,92 m/s |

Pada gambar diatas kita dapat melihat visualisasi api dengan menggunakan *swirl* tipe miring dengan sudut kemiringan  $30^\circ$  yang menggunakan kecepatan udara konstan dan variasi kecepatan bahan bakar. Gambar 4.3 merupakan visualisasi api kecepatan udara 0,9 m/s yang ditunjukkan pada manometer. Pada gambar 4.3 ini kita dapat melihat bahwa kecepatan bahan bakar 1.32, 2.65, 3.98, 5.30, 6.63 dan 7.96 m/s terus mengalami peningkatan tinggi api. Berarti ini telah sesuai dengan teori bahwa panjang api tersebut berbanding lurus dengan kecepatan bahan bakar yakni panjang api meningkat dengan peningkatan kecepatan bahan bakarnya. Akan tetapi pada kecepatan bahan bakar 9,29 m/s semakin memendek dan semakin tidak stabil. Berbeda dengan *swirl* tipe *twist* yang mengalami pemendekan tinggi api pada kecepatan bahan bakar 13.26 m/s. Dari data visualisasi ini dapat diambil kesimpulan bahwa semakin cepat kecepatan bahan bakar ujung api akan semakin tidak stabil. Dan juga semakin cepat kecepatan bahan bakar maka tinggi api yang berwarna biru juga akan semakin tinggi. Ketidak stabilan api ini menunjukkan bahwa ada perubahan aliran pada daerah transisi dari laminar ke turbulen.

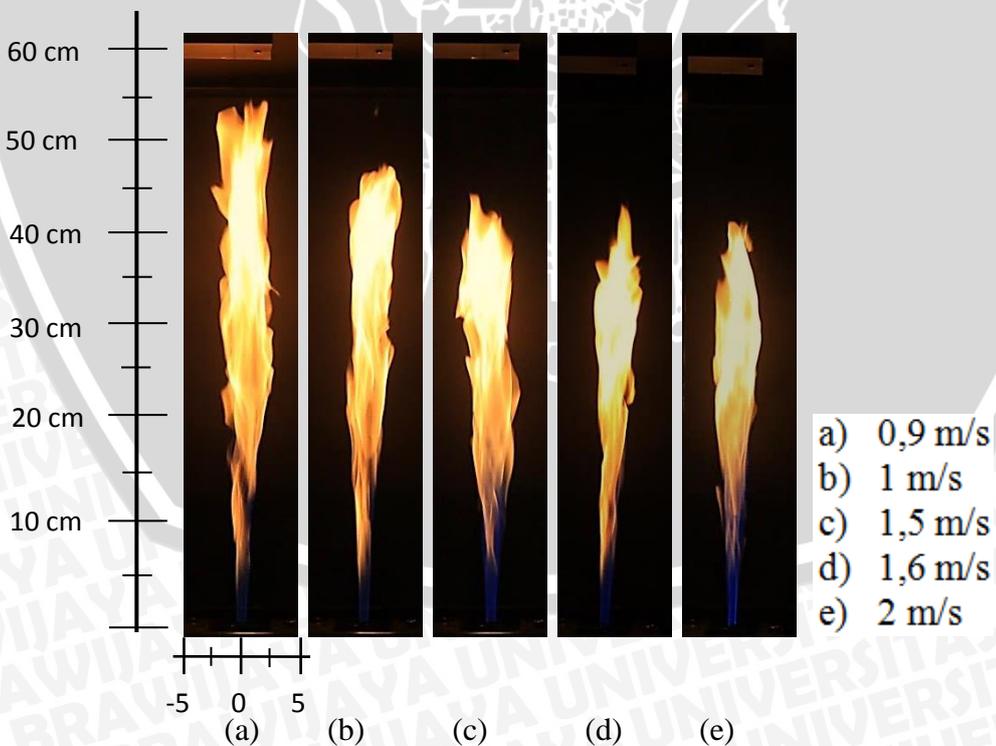
Ketidak stabilan api tersebut akan semakin menyebar dan mendekat ke ujung saluran bahan bakar seiring dengan bertambahnya kecepatan seperti pada kecepatan bahan bakar 9,29 m/s yang dapat kita lihat api tidak stabil dari ujung bawah api sampai ujung atas api. Setelah api mengalami ketidak stabilan diseluruh bagian api maka tinggi api akan cenderung semakin memendek seiring bertambahnya kecepatan bahan bakar.

Selain itu warna api semakin didominasi warna biru, itu dikarenakan penambahan kecepatan bahan bakar akan menyebabkan aliran semakin turbulen. Dari keseluruhan variasi bahan bakar dapat diketahui bahwa kondisi turbulen mulai terjadi pada kecepatan aliran 13.26, 14.59, dan 15.92 m/s dengan besar bilangan reynold berturut-turut yaitu 4243.2, 4668.8, dan 5095.4. Dimana semakin besar aliran turbulen menyebabkan proses difusi yang terjadi semakin cepat dan reaksi bahan bakar dan udara yang semakin baik, hal inilah yang menyebabkan api semakin biru. Akan tetapi, pada kecepatan bahan bakar 10.61, 11.94, 13.26, 14.59, dan 15.92 m/s api semakin jauh dari mulut saluran bahan bakar ini menandakan bahwa api mengalami kondisi *Lift Off* yang dikarenakan kecepatan bahan bakar lebih besar daripada kecepatan udara. jika sudah masuk kondisi ini bisa dipastikan bahwa jika kecepatan bahan bakar terus ditambah akan menyebabkan api akan mati.

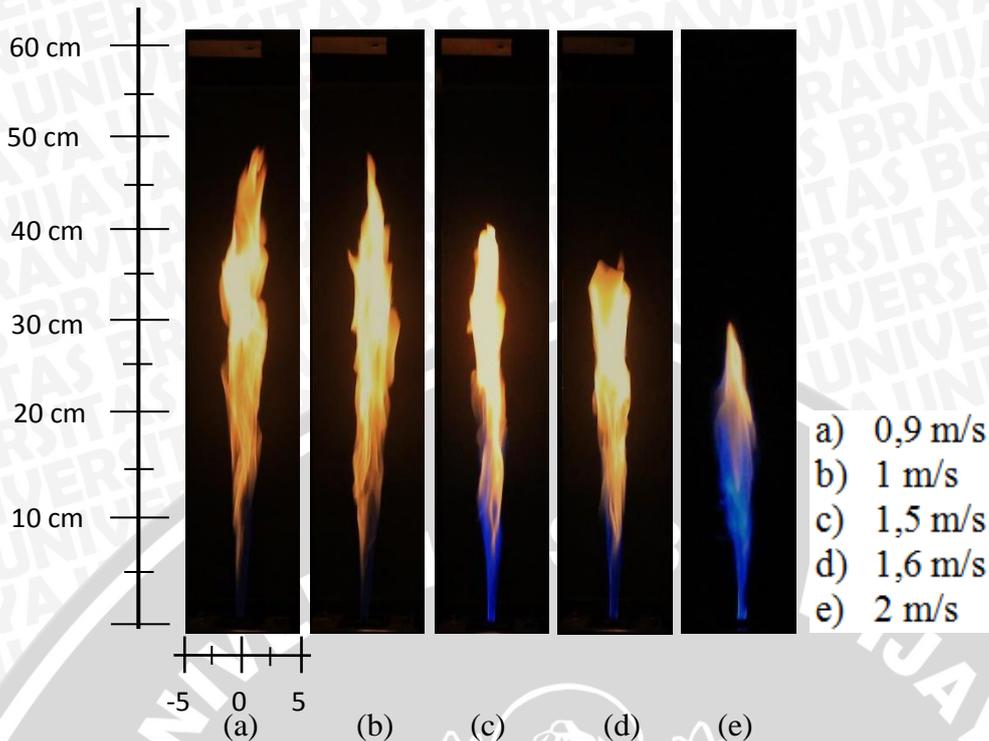
### 4.3.2 Kecepatan Bahan Bakar Kostan Kecepatan Udara Divariaskan



Gambar 4.4 Visualisasi api swirl tipe twist dengan debit bahan bakar 7.96 m/s dan variasi kecepatan udara



Gambar 4.5 Visualisasi api swirl tipe melengkung dengan debit bahan bakar 7.96 m/s dan variasi kecepatan udara



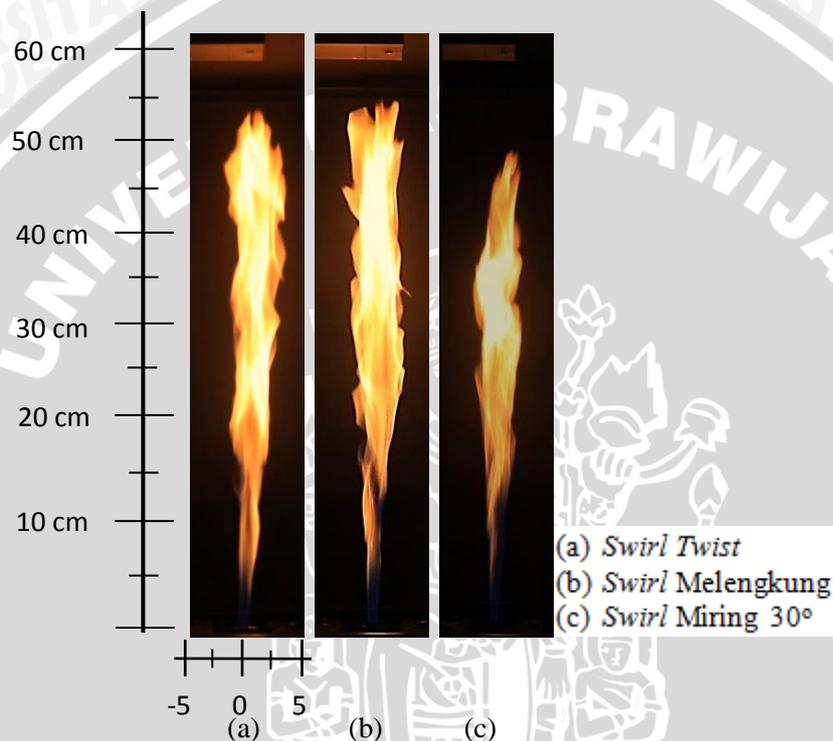
Gambar 4.6 Visualisasi api *swirl* tipe miring sudut  $30^\circ$  dengan debit bahan bakar  $7.96 \text{ m}^3/\text{s}$  dan variasi kecepatan udara

Pada gambar diatas kita dapat melihat visualisasi api dari *swirl* tipe *twist*, melengkung, dan miring sudut  $30^\circ$  dengan kecepatan bahan bakar  $7.96 \text{ m}^3/\text{s}$  dan kecepatan udara yang divariasikan yakni  $0.9, 1, 1.5, 1.6$  dan  $2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Dari gambar diatas kita dapat melihat bahwa semakin besar kecepatan atau debit udara maka api semakin memendek berbanding terbalik dengan kecepatan bahan bakar tadi jika semakin tinggi kecepatan maka api akan semakin tinggi. Itu dikarenakan, masa jenis atau densitas bahan bakar yaitu  $\text{CH}_4$  lebih kecil dari pada udara. Jika bahan bakar ( $\text{CH}_4$ ) tidak segera bereaksi maka bahan bakar akan terus naik atau sering disebut dengan efek *buoyancy*. Itulah sebabnya, jika semakin besar kecepatan atau debit dari bahan bakar maka semakin cepat pula udara dan bahan bakar untuk bertemu dan bereaksi. Jika semakin cepat bereaksi maka bahan bakar tidak perlu naik terlalu tinggi untuk bertemu dengan udara. Dan juga selain itu, bahan bakar yang terlalu lama dan terlalu tinggi bertemu dan bereaksi dengan udara maka semakin tinggi pula titik api akan terbentuk.

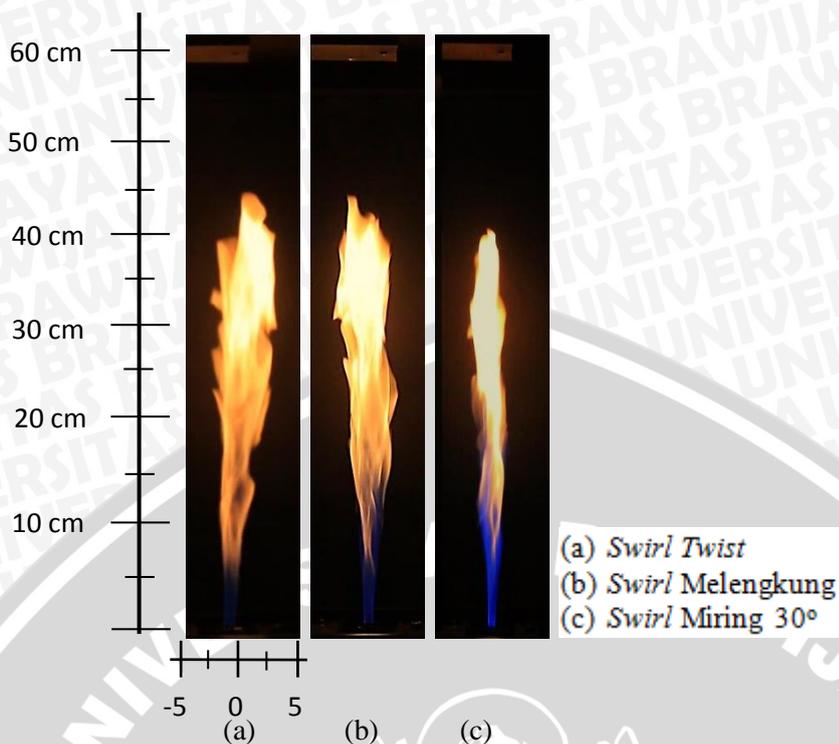
Selain itu pada gambar 4.4 sampai 4.6 diatas juga dapat kita lihat bawa semakin tinggi kecepatan udara maka semakin banyak pula dominasi warna biru pada api. Ini berarti bahwa pembakaran berlangsung semakin optimal. Itu dikarenakan, komposisi campuran bahan bakar dan udara mendekati sempurna. Sehingga bisa diperkirakan pula seiring bertambahnya kecepatan udara maka temperatur api juga akan semakin meningkat. Akan

tetapi, tidak sepenuhnya jika kecepatan udara semakin bertambah maka pembakaran akan berlangsung semakin baik. Karena dalam komposisi pencampuran udara dan bahan bakar ada batas maksimal komposisi udara, dapat kita lihat bahwa pada kecepatan udara 2 m/s api sudah tidak menyala ini menandakan dengan komposisi kecepatan udara 2 m/s sudah jauh dari stoikhiometri.

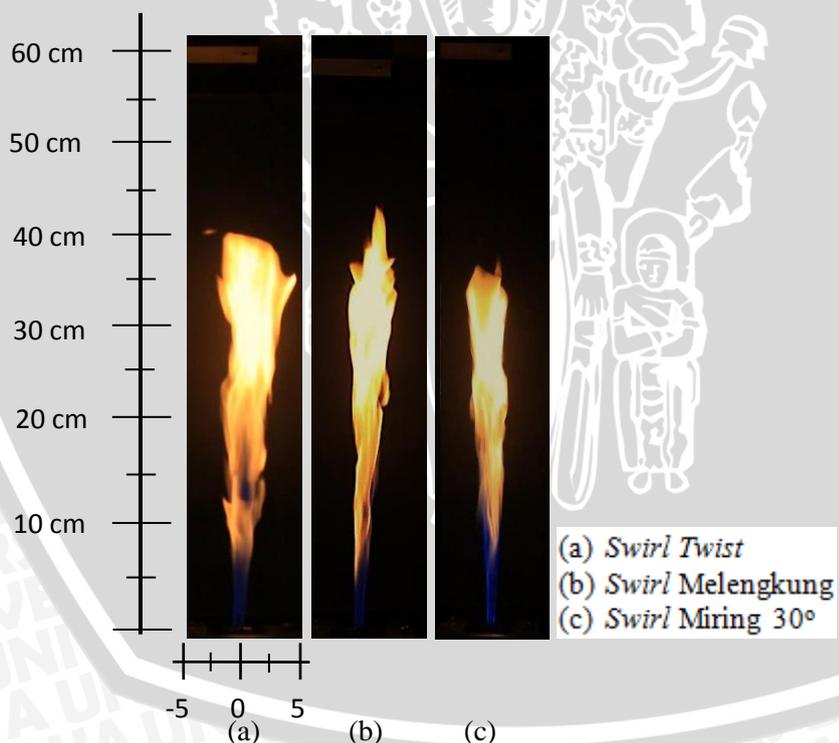
### 4.3 Perbandingan Visualisasi Api Antar *Swirl*



Gambar 4.7 Variasi kecepatan bahan bakar 7.96 m/s dan kecepatan udara 0,9 m/s

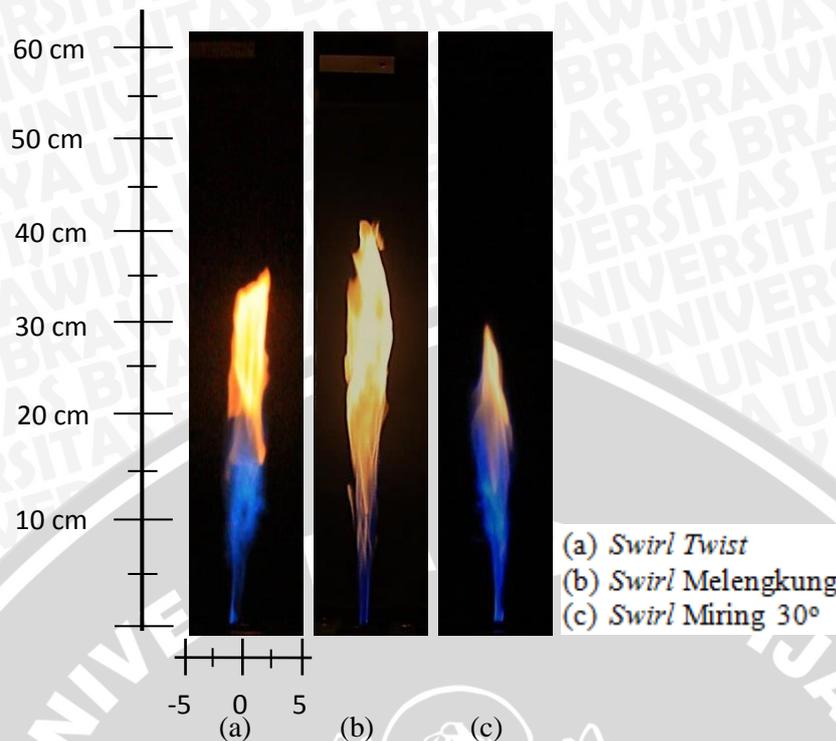


Gambar 4.8 Variasi kecepatan bahan bakar 7.96 m/s dan kecepatan udara 1,5 m/s



Gambar 4.9 Variasi kecepatan bahan bakar 7.96 m/s dan kecepatan udara 1,6 m/s



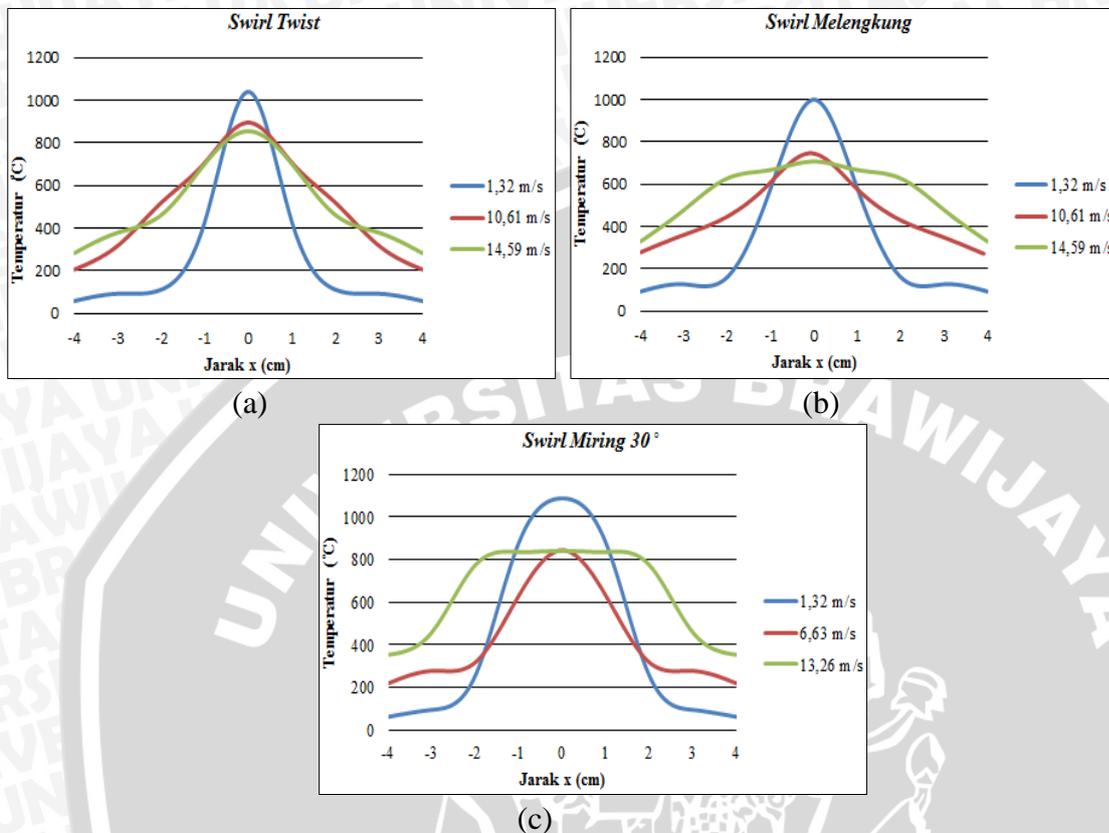


Gambar 4.10 Variasi kecepatan bahan bakar 7.96 m/s dan kecepatan udara 2 m/s

Pada gambar 4.7, 4.8, 4.9 dan 4.10 adalah visualisasi perbandingan antara bentuk *swirl twist*, lengkung dan miring dari berbagai perbandingan dengan variasi kecepatan udara tersebut dapat kita lihat bahwa *swirl* dengan bentuk melengkung memiliki tinggi api yang paling tinggi yang kemudian diikuti bentuk *swirl twist* dan miring. Hal ini disebabkan oleh turbulensi yang dihasilkan tiap bentuk *swirl* berbeda, dimana semakin besar turbulensi yang dihasilkan suatu hambatan maka semakin besar pula zona resirkulasi di daerah yang terjadi turbulensi tersebut. Apabila semakin besar zona resirkulasinya maka bahan bakar dan udara akan tercampur lebih merata. Jika udara dan bahan bakar tercampur dengan cepat maka bahan bakar dan udara tidak perlu naik terlalu tinggi untuk bereaksi dan menghasilkan titik nyala api. Jadi, bentuk *swirl* itu dapat mempengaruhi karakteristik api. Jika dilihat dari tinggi apinya maka turbulensi yang paling tinggi yang disebabkan oleh *swirl* adalah *swirl miring*, *swirl twist* dan *swirl melengkung*.

## 4.4 Distribusi Temperatur

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



Gambar 4.11 Grafik temperatur api difusi pada variasi kecepatan bahan bakar

Pada gambar 4.11 kita dapat melihat perbedaan dari temperatur dari setiap *swirl* dengan beberapa variasi kecepatan bahan bakar. Disini ada kecenderungan bahwa pada setiap kenaikan kecepatan bahan bakar berpengaruh pada temperatur api. Jika kecepatan bahan bakar semakin tinggi maka temperatur rata-ratanya akan semakin tinggi dan temperaturnya terdistribusi lebih merata. Ini diakibatkan karena semakin besar kecepatan bahan bakar maka akan meningkatkan pula perbedaan kecepatan bahan bakar dan kecepatan udara. Semakin besar perbedaan kecepatan maka akan meningkatkan potensi terbentuknya olakan atau turbulensi pada pertemuan udara dan bahan bakar. Jika semakin besar turbulensi maka akan menghasilkan panas hasil pembakaran yang tersebar ke burner lebih merata, karena semua proses pencampuran maupun penjalaran dibantu oleh gerakan pusaran-pusaran aliran makro turbulen.

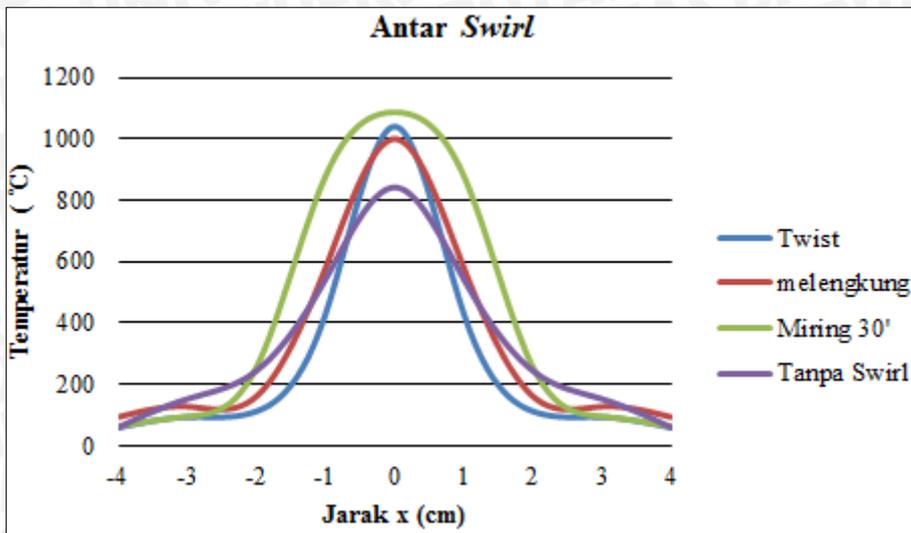
Selain itu turbulensi juga berperan dalam percepatan pencampuran bahan bakar dan udara, hal ini mengakibatkan proses peretemuan bahan bakar dan udara semakin tinggi sehingga akan mempercepat reaksi pembakarannya, akibatnya titik api dapat terbentuk

tidak hanya ditengah saja sehingga panasnya hampir sama pada tiap titik pengambilan temperatur.

Dapat dilihat pada gambar a, b, dan c hampir menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu temperatur rata-rata paling tinggi pada titik 0 terdapat pada kecepatan bahan bakar 1.32 m/s. Hal ini dikarenakan pada kecepatan bahan bakar yang paling rendah, pangkal api masih menempel pada mulut *burner* sehingga temperatur sangat tinggi. Selain itu pada mulut *burner*, bahan bakar metana yang keluar dari saluran bahan bakar langsung bereaksi dengan udara yang telah mengalami pemanasan awal karena adanya efek penambahan *swirl* pada saluran udara. Hal inilah yang menyebabkan pada titik 0 yaitu bagian tengah *burner* cenderung menunjukkan temperatur yang paling tinggi, dan pada jarak  $x$  yang semakin jauh semakin menurun.

Selain itu pada gambar a,b, dan c juga dapat dilihat bahwa pada titiki 0 pada kecepatan bahan bakar yang paling besar menunjukkan temperatur yang paling rendah dibandingkan kecepatan bahan bakar yang lain. Hal ini dikarenakan pada kecepatan bahan bakar yang paling tinggi pangkal api telah menjauhi mulut *burner* dimana api mengalami fenomena *Lift Off*. *Lift Off* terjadi karena kecepatan bahan bakar yang semakin cepat dan massa jenis bahan bakar yang lebih rendah dibandingkan udara cenderung bergerak ke atas, ketika kecepatan bahan bakar semakin cepat maka bahan bakar yang keluar dari *burner* tidak sempat berdifusi dengan udara sehingga pangkal api semakin menjauhi mulut *burner*, namun semakin menjauhi titik 0, temperatur mulai semakin tinggi karena terdapat reaksi antara bahan bakar dan udara, dan apabila dibandingkan dengan kecepatan bahan bakar yang lain pada titik yang sama kecepatan bahan bakar yang paling tinggi memiliki temperatur yang paling tinggi dibandingkan kecepatan bahan bakar yang lebih rendah.

#### 4.4.2 Distribusi Temperatur Api Difusi pada Variasi Bentuk Swirl

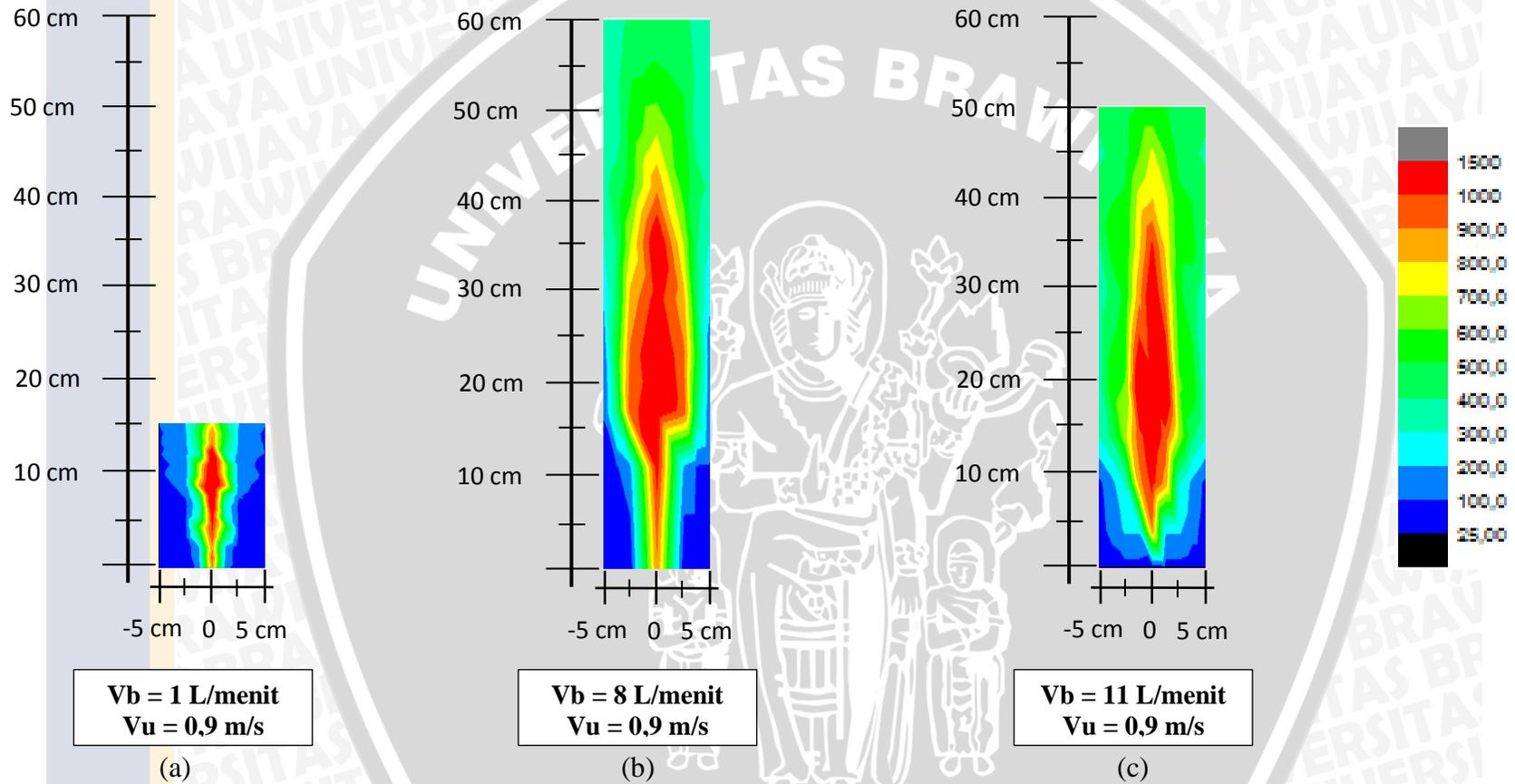


Gambar 4.12 Grafik temperatur api difusi pada variasi bentuk *swirl* dengan kecepatan bahan bakar 1,32 m/s dan kecepatan udara 0,9 m/s

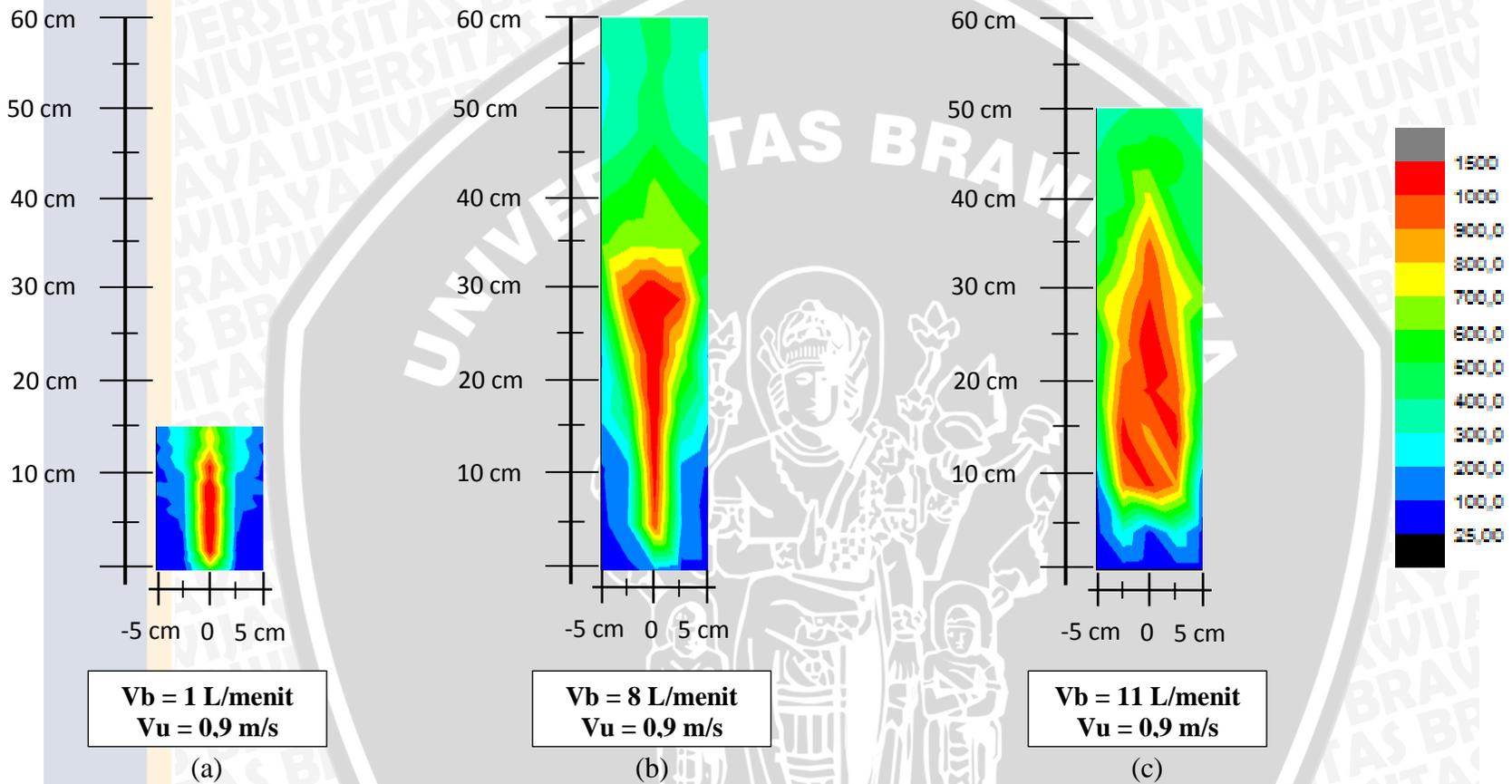
Pada Gambar 4.12 dapat dilihat bahwa pada kecepatan yang sama distribusi temperatur pada sumbu y yang paling tinggi ditunjukkan pada *swirl* tipe miring 30° kedua *swirl* tipe *twist* dan terakhir *swirl* tipe melengkung. Hal ini menunjukkan bahwa bentuk sudu pada *swirl vanes* berpengaruh terhadap distribusi temperatur api difusi. Karena bentuk sudu *swirl vanes* berpengaruh terhadap aliran yang dihasilkan oleh api sehingga secara langsung berhubungan dengan temperatur yang dihasilkan api difusi.

Pada penelitian kali ini bentuk sudu *swirl vanes* yang menimbulkan turbulensi paling tinggi adalah sudu *swirl vanes* miring 30° kedua sudu *swirl vanes twist* dan yang terakhir sudu *swirl vanes* melengkung. Jika semakin banyak turbulensi yang terjadi maka semakin besar juga resirkulasi yang terjadi. Resirkulasi berpengaruh pada pencampuran bahan bakar dan udara. Ketika bahan bakar dan udara telah bercampur dengan udara maka campuran tersebut akan kembali ke mulut *burner* untuk memanaskan gas bahan bakar yang baru keluar dari saluran bahan bakar sehingga mengalami pemanasan awal sebelum bercampur dengan udara, hal ini akan memperbaiki kualitas campuran bahan bakar dan udara. Pada pembahasan selanjutnya akan dilihat kontur distribusi temperatur pada api difusi sehingga memperjelas pembahasan mengenai distribusi temperatur yang ada.

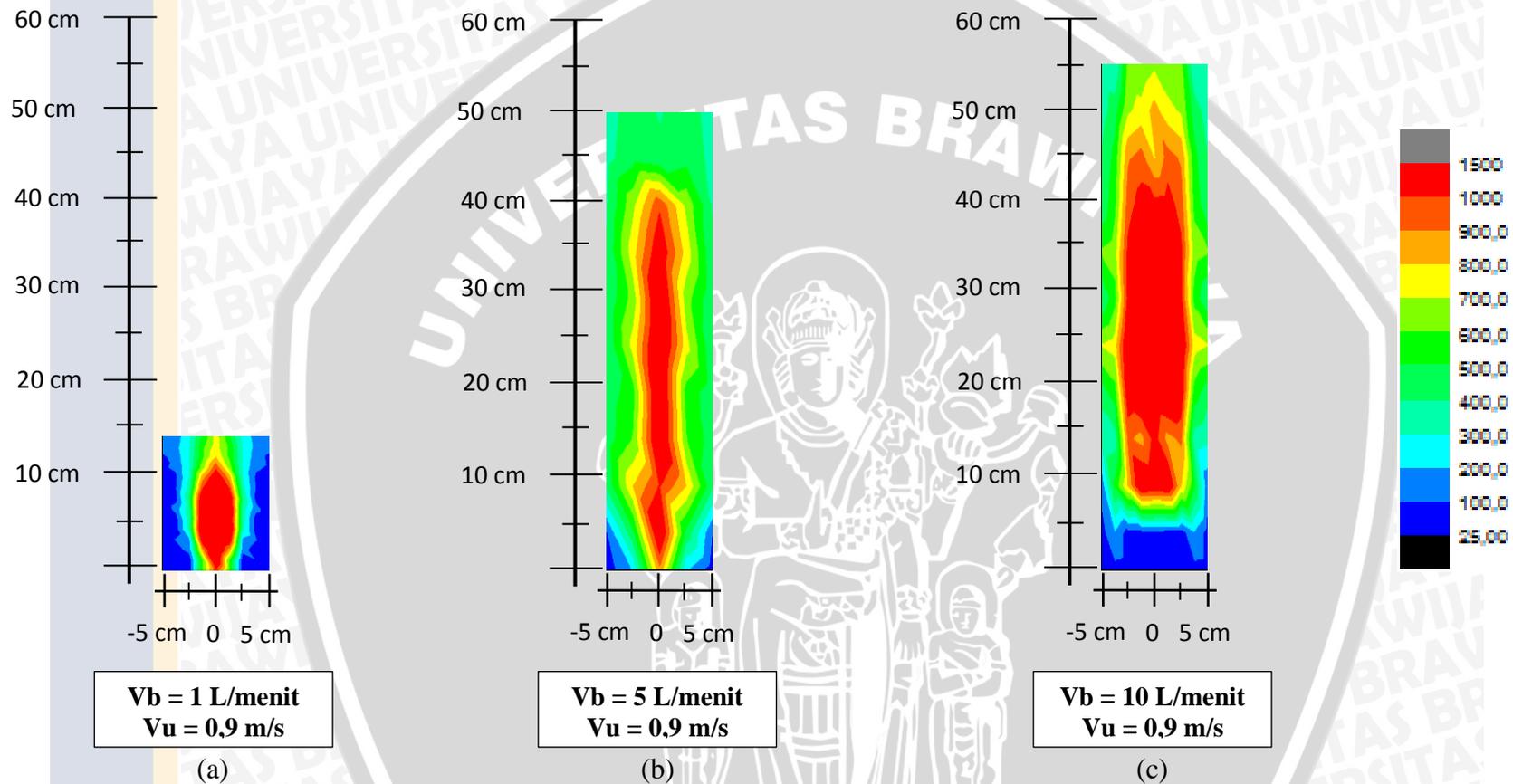
### 4.4.3 Pengaruh Variasi Kecepatan Bahan Bakar Terhadap Kontur Distribusi Temperatur



Gambar 4.13 Distribusi temperatur *swirl twist* dengan variasi kecepatan bahan bakar (a) 1,32 m/s (b) 10,61 m/s (c) 14,59 m/s



Gambar 4.14 Distribusi temperatur *swirl* melengkung dengan variasi kecepatan bahan bakar (a) 1,32 m/s (b) 10,61 m/s (c) 14,59 m/s



Gambar 4.15 Distribusi temperatur *swirl* miring  $30^\circ$  dengan variasi kecepatan bahan bakar (a) 1,32 m/s (b) 6,63 m/s (c) 13,26 m/s

Gambar 4.13, 4.14 dan 4.15 menunjukkan *plotting* distribusi temperatur dari variasi bentuk *swirl twist*, *swirl* melengkung dan *swirl* miring  $30^\circ$  pada kecepatan bahan bakar tertentu. Dapat dilihat dari semua gambar terdapat kecenderungan bahwa semakin tinggi kecepatan bahan bakar maka temperatur api akan semakin meningkat, dapat terlihat dari gambar distribusi temperatur, warna merah yang menunjukkan temperatur yang paling tinggi memiliki luasan yang lebih besar pada kecepatan bahan bakar paling besar dibandingkan kecepatan bahan bakar yang lebih kecil. Hal ini dikarenakan penambahan kecepatan aliran bahan bakar akan meningkatkan turbulensi. Pada keadaan turbulensi semakin banyak atom-atom bahan bakar dan udara yang bertumbukan dengan kecepatan yang tinggi sesuai dengan prinsip *transport phenomena* maka hal ini dapat meningkatkan temperatur. Selain kecenderungan meningkatnya temperatur api seiring meningkatnya kecepatan bahan bakar dapat dilihat juga bahwa temperatur pada bagian tengah api, tempat di mana bahan bakar keluar selalu memiliki temperatur yang lebih tinggi. Semakin menjauhi bagian tengah dari saluran bahan bakar, temperatur semakin menurun. Hal ini dikarenakan kecepatan bahan bakar di dekat saluran bahan bakar lebih tinggi dibandingkan dengan daerah di sekitar saluran bahan bakar. Sesuai dengan dasar teori bahwa semakin tinggi kecepatan bahan bakar maka akan menyebabkan turbulensi yang menghasilkan temperatur yang lebih tinggi.

Dari gambar 4.14, 4.15 dan 4.16 dapat dilihat pula bahwa pemasangan bentuk *swirl* sangat berpengaruh pada distribusi temperatur api difusi. Pada gambar 4.15 pemasangan *swirl* sudu melengkung dengan kecepatan bahan bakar 1,32 m/s, temperatur api paling tinggi terdapat pada arah aksial dari saluran bahan bakar saja. Kemudian pada gambar 4.14 pemasangan *swirl* sudu *twist* dengan kecepatan bahan bakar yang sama, terlihat bahwa temperatur mulai tersebar tidak hanya pada arah aksial saja. Pada gambar 4.16 pemasangan *swirl* sudu miring  $30^\circ$  dengan kecepatan bahan bakar yang sama menunjukkan distribusi temperatur yang lebih merata dimana luasan warna merah semakin melebar ke arah tangensial, selain itu pada *plotting* distribusi temperatur *swirl* sudu miring  $30^\circ$  menunjukkan dominasi warna merah sehingga hal ini juga menunjukkan bahwa temperatur pada *swirler* sudu miring  $30^\circ$  terdistribusi secara merata dan tinggi dibandingkan *swirl* sudu *twist* dan melengkung.

Hal ini terjadi dikarenakan *swirl vanes* disini bertindak sebagai lintasan yang membelokkan arah aliran udara. Di mana setiap belokan pada lintasan fluida akan menghasilkan gesekan dan tumbukan antar molekul. Dapat kita lihat disini bahwa belokan yang paling menghasilkan gesekan dan tumbukan antara molekul yang paling besar adalah

sudu miring  $30^\circ$ , sudu tipe *twist* dan tipe melengkung. Dan jika gesekan dan tumbukan antara molekul itu besar maka olakan fluida udara yang dihasilkan juga akan semakin tinggi. Apabila semakin banyak olakan fluida udara saat keluar dari *swirl vanes*, maka pencampuran antara bahan bakar dan udara menjadi lebih baik dan menghasilkan efek resirkulasi yang menyebabkan aliran turbulen dan meningkatkan temperatur rata-rata yang dilepaskan oleh api difusi.



## BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil pembahasan visualisasi dan distribusi api, maka kesimpulan yang bisa diambil dari penelitian ini adalah Kecepatan bahan bakar dan udara dapat mempengaruhi visualisasi tinggi api dan distribusi temperatur api. Semakin tinggi kecepatan bahan bakar maka tinggi api semakin akan meningkat namun akan kembali turun ketika melebihi batas maksimumnya. Akan tetapi, distribusi temperturnya tetap semakin merata. Semakin tinggi kecepatan udara maka tinggi api semakin menurun. Akan tetapi, distribusi temperturnya juga semakin merata.

Bentuk *swirl* dapat mempengaruhi tinggi visualisasi api dan distribusi temperatur api. Bentuk *swirl* yang memiliki rata-rata visualisasi tinggi api dari yang tertinggi ke rendah secara berurutan yaitu *swirl* melengkung, *swirl twist* dan *swirl* miring 30°. Bentuk *swirl* yang memiliki rata-rata distribusi temperatur api dari yang paling seragam yaitu *swirl* miring 30°, *swirl twist* dan *swirl* melengkung.

### 5.2 Saran

Setelah penelitian dilakukan, maka saran yang perlu diperhatikan adalah sebagai berikut :

1. Pada penelitian selanjutnya sebaiknya pada ujung *burner* ditambahkan saluran pembuangan *exhaust gas* yang terhubung ke luar ruangan laboratorium, agar tidak tertalu mencemari udara dalam laboratorium.
2. Pada penelitian selanjutnya sebaiknya menggunakan bahan bakar yang divariasikan agar kita dapat mengetahui karakteristik pembakaran api difusi menggunakan *swirl vanes* pada berbagai macam bahan bakar.
3. Pada penelitian selanjutnya sebaiknya pada pengambilan data gambar visualisasi api menggunakan kamera dengan spesifikasi lensa yang tinggi agar gambar lebih fokus.

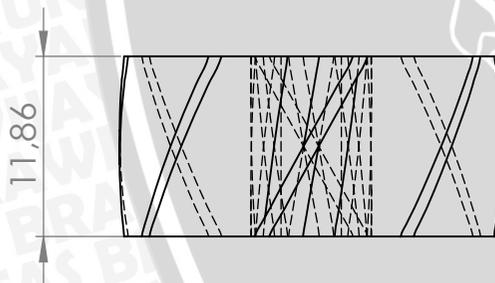
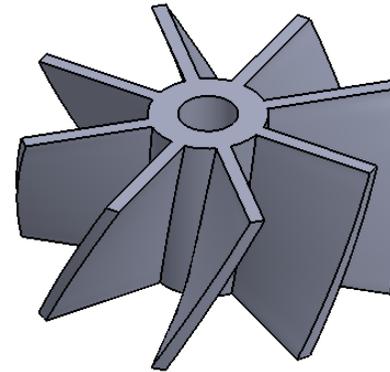
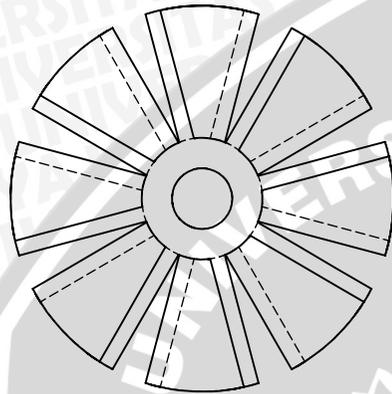
## DAFTAR PUSTAKA

- Chomiak, Jerzy, 1990. *Combustion A Study in Theory, Fact and Application, Energy and Engineering Science Series*, New York : Gordon and Breach Science.
- Echekki, Tarek., Mastorakos, Epaminondas, 2011. *Turbulent Combustion Modeling, Fluid Mechanics and Its Applications*, Springer Science & Business Media B.V.
- El-Mahallawy, Fawzy., El-Din Habik, Saad, 2002. *Fundamentals And Technology Of Combustion*, United Kingdom: Elsevier.
- Glassman, Irvin., Yetter, Richard A., 2008. *Combustion fourth edition*, United Kingdom: Elsevier.
- Holman, J.P., 1985. *Metode Pengukuran Teknik*, Jakarta: Erlangga.
- Kuo, Kenneth K, 1986. *Principles of Combustion*, New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Lilley, David G, 1997, *Swirl Flow in Combustion: A Review*, AIAA.
- Microcal, Origin, and LabTalk., 1999. *Tutorial Manual*, Microsoft Corporation
- Peters, Norbert, 2010. *Combustion Theory*, CEFRC Summer School, Germany : Aachen University.
- R. Munson, Bruce., F. Young, Donald., H. Okiishi, Theodore, 2005. *Mekanika Fluida Edisi Keempat*, Jakarta: Erlangga.
- Rohmat, Tri Agung., Sahrudin, Rahmat., Saptoadi Harwin., 2010. *Pengaruh Swirl Vanes Pada Aliran Udara Sekunder Terhadap Api Difusi Yang Terbentuk Di Aliran Sembur Double Concentric*, Palembang: Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9, Lembaga Penelitian Mechanical and Industrial Engineering Dept. Universitas Gadjah Mada.
- Taufik, 2008. *Pengaruh Bentuk Swirl Vanes Terhadap Visualisasi Dan Distribusi Suhu Api Difusi*, Skripsi tidak dipublikasikan, Depok: Universitas Indonesia.
- Takahashi, F., et al., 1996, *Structure of Turbulent Hydrogen Jet Diffusion flames With or Without Swirl*, Journal of Heat Transfer, ASME.
- Tjokroawidjojo, Soetiari., 1986, *Bahan Bakar dan Proses-Proses Kimia Pembakaran*. Malang: Universitas Brawijaya
- Uji Widihartono, Bagus. 2007, *Pengaruh variasi sudut alur swirl nozzle terhadap distribusi temperatur api difusi*. Skripsi tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Wardana, I. N. G. 2008, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.

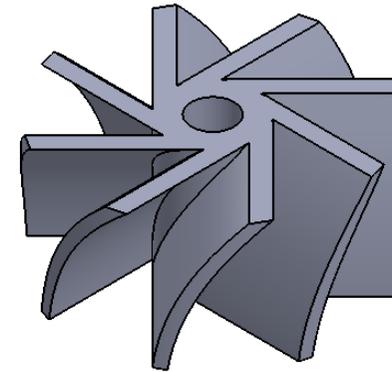
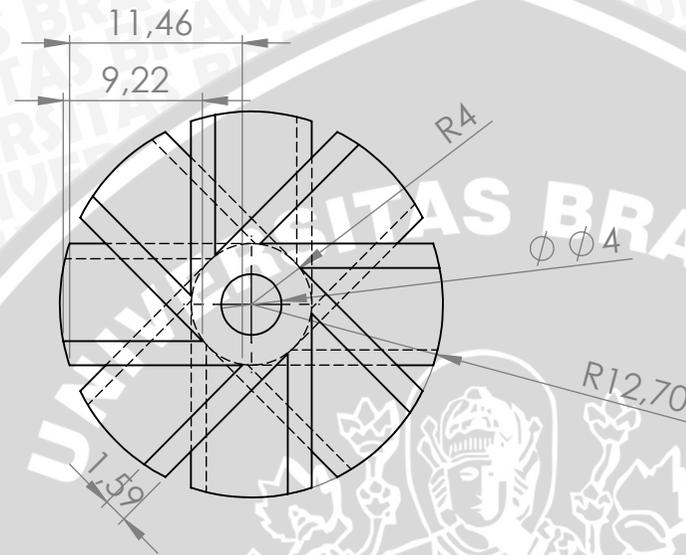
Widodo I, A. S., 2004, *Pengaruh Posisi dan Sudut Kemiringan Swirl Terhadap Kestabilan Pancaran Api ifusi Double Concentric*, Malang: Jurnal ilmu-ilmu Teknik Vol. 16 No. 2, Lembaga Penelitian Universitas Brawijaya.

Wijayanti I, W., 2005, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.

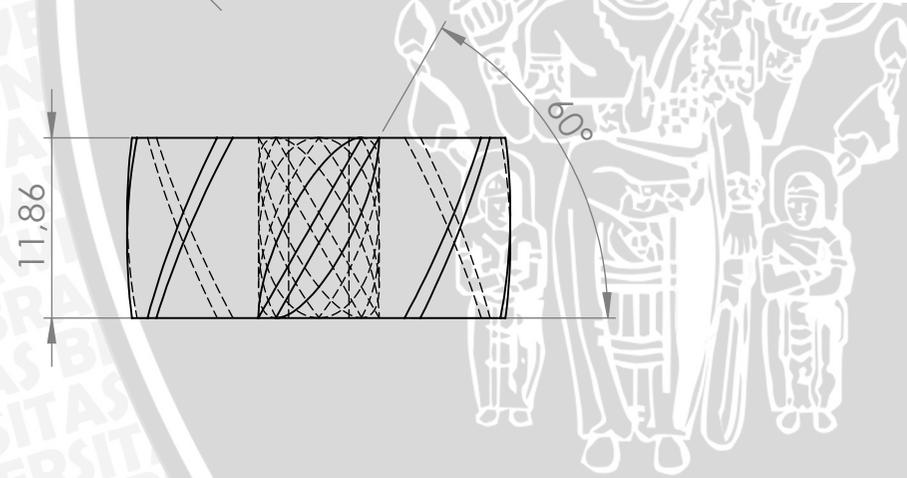
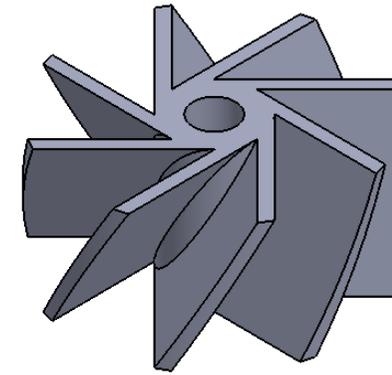
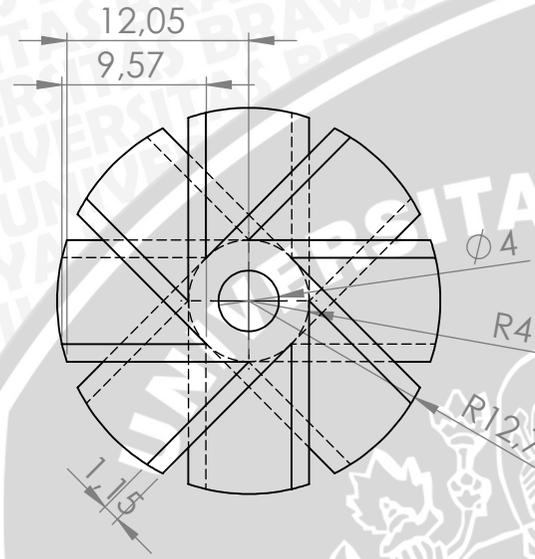




ISOMETRI 	SKALA : 2:1	DIGAMBAR : FAJAR WASIS SATRIO U.	KETERANGAN:		
	SATUAN : mm	DEPARTEMEN : TEKNIK MESIN			
	TANGGAL : 15-07-2016	DIPERIKSA : WIDYA WIJAYANTI			
JURUSAN MESIN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS BRAWIJAYA		SWIRL TWIST		001	A4

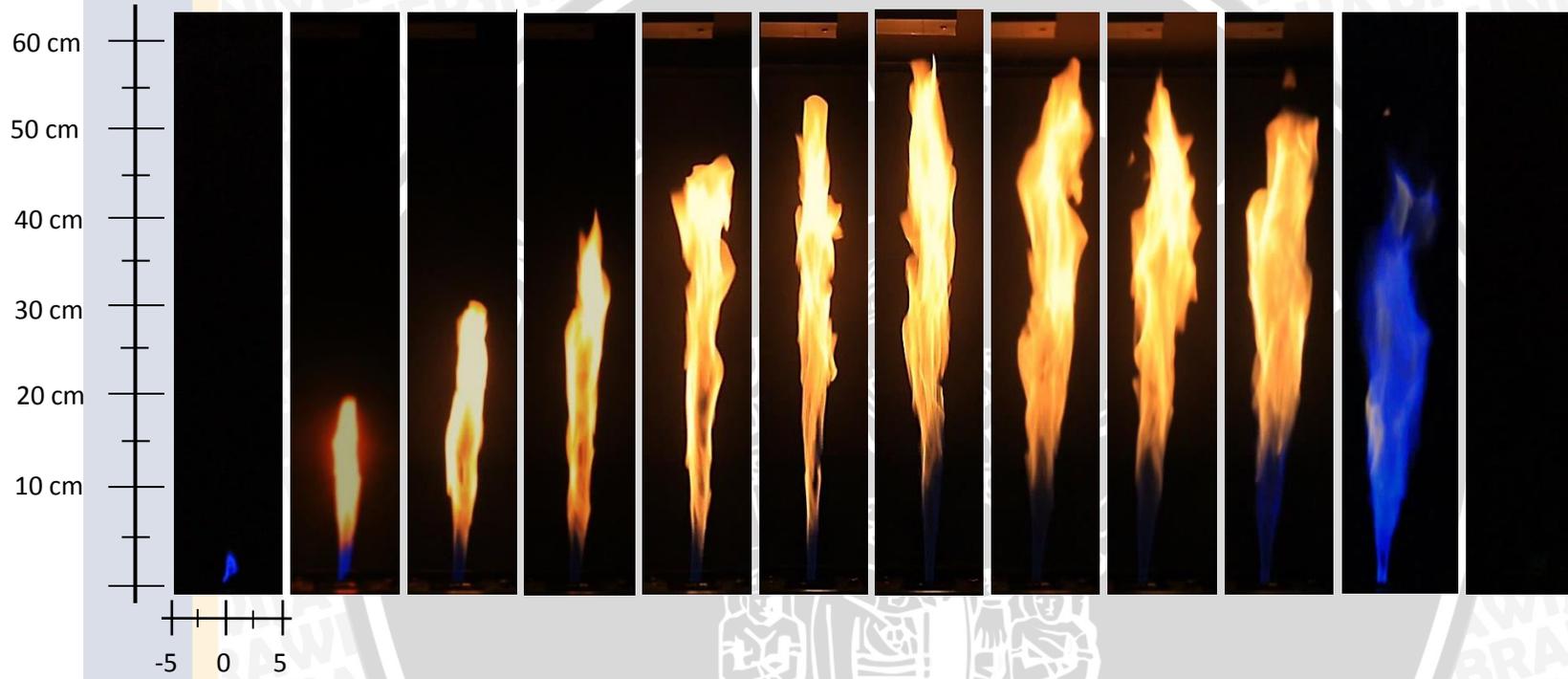


	ISOMETRI	SKALA : 2:1	DIGAMBAR : FAJAR WASIS SATRIO U.	KETERANGAN:		
		SATUAN : mm	DEPARTEMEN : TEKNIK MESIN			
		TANGGAL : 15-07-2016	DIPERIKSA : WIDYA WIJAYANTI			
JURUSAN MESIN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS BRAWIJAYA			SWIRL MELENGKUNG		002	A4



ISOMETRI 	SKALA : 2:1	DIGAMBAR : FAJAR WASIS SATIOU.	KETERANGAN:		
	SATUAN : mm	DEPARTEMEN : TEKNIK MESIN			
	TANGGAL : 15-07-2016	DIPERIKSA : WIDYA WIJAYANTI			
JURUSAN MESIN FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS BRAWIJAYA		SWIRL MIRING 30 DERAJAT		003	A4

Visualisasi Api Swirl Tipe Twist dengan Kecepatan Udara 1 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan

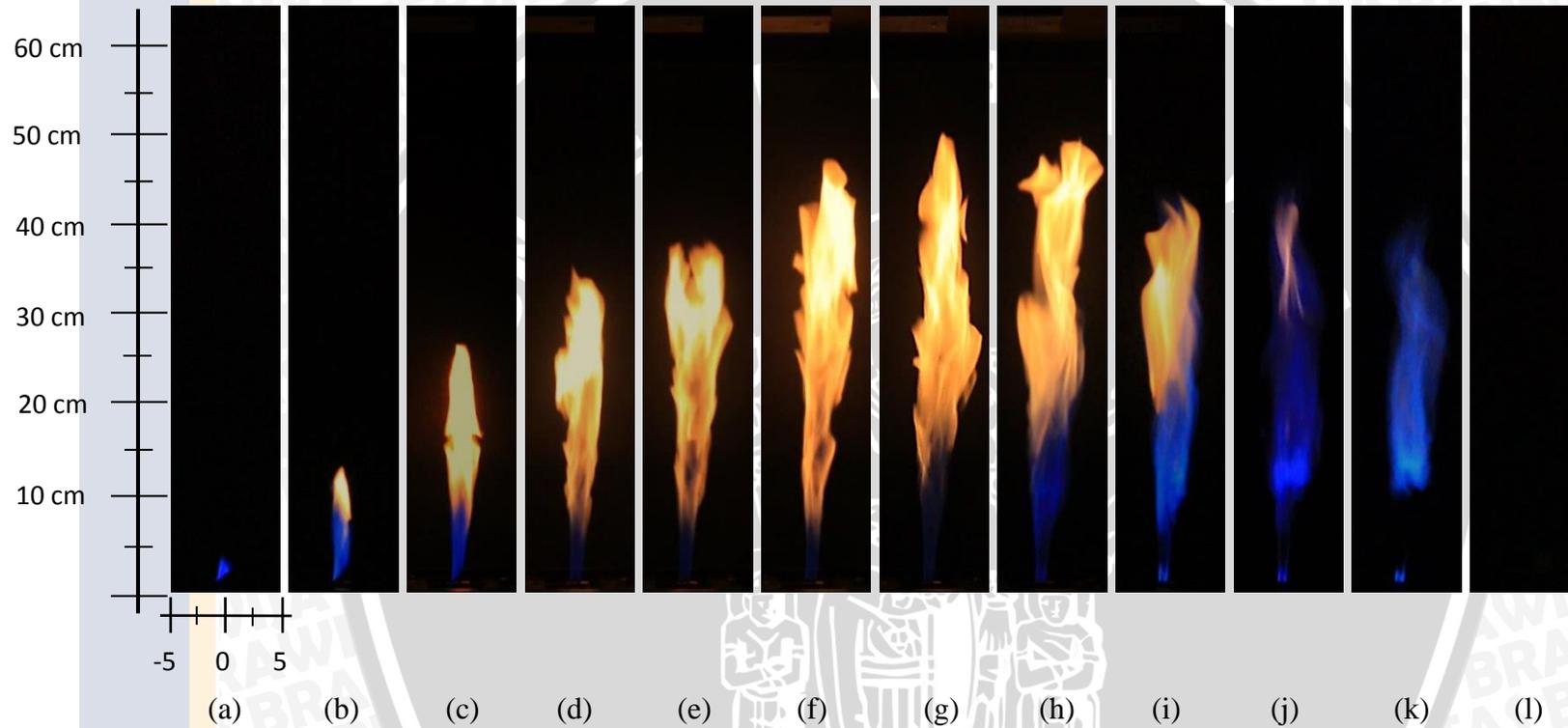
- (a) 1.320 m/s
- (b) 2.65 m/s
- (c) 3.98 m/s
- (d) 5.30 m/s
- (e) 6.63 m/s

- (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

(l)

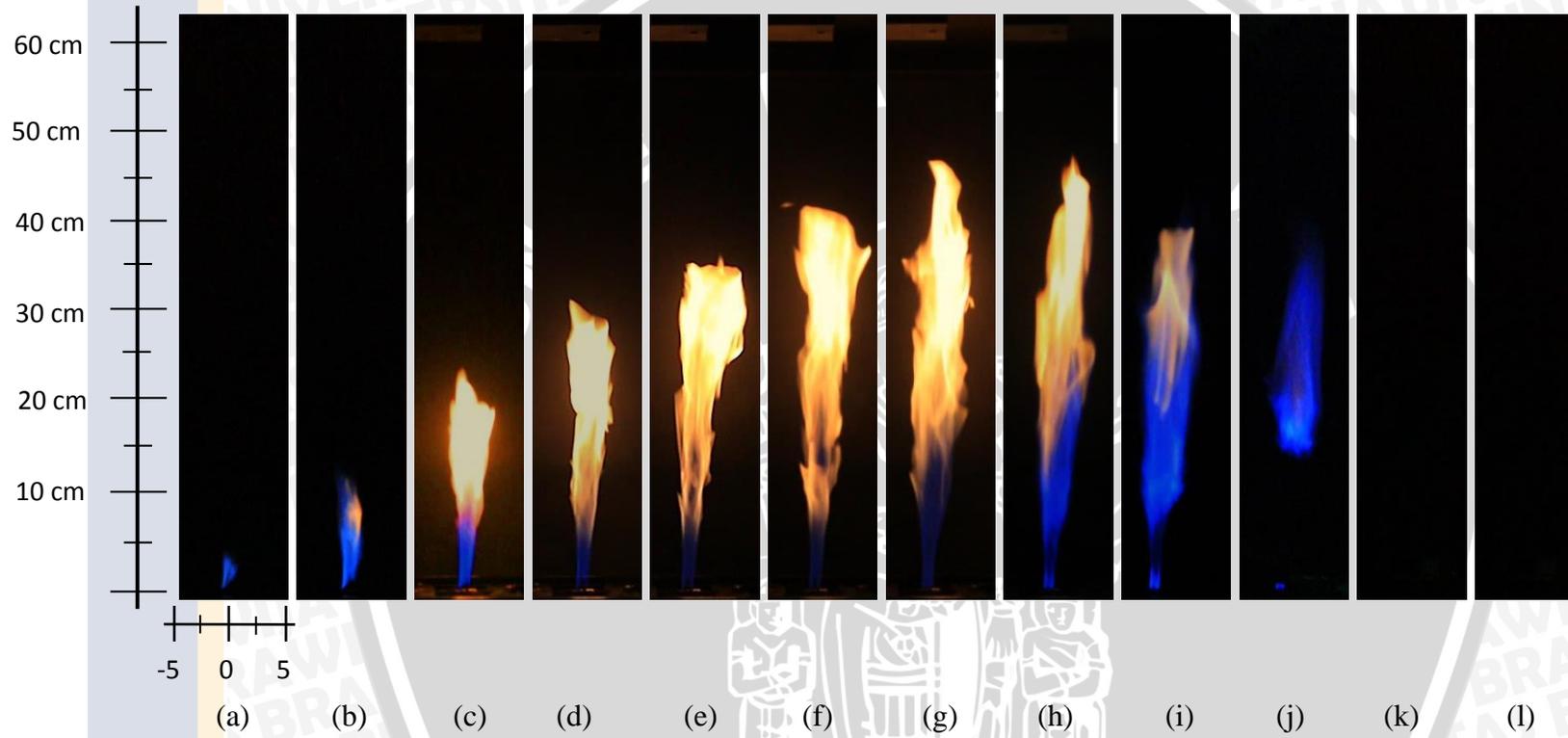
Visualisasi Api Swirl Tipe Twist dengan Kecepatan Udara 1,5 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

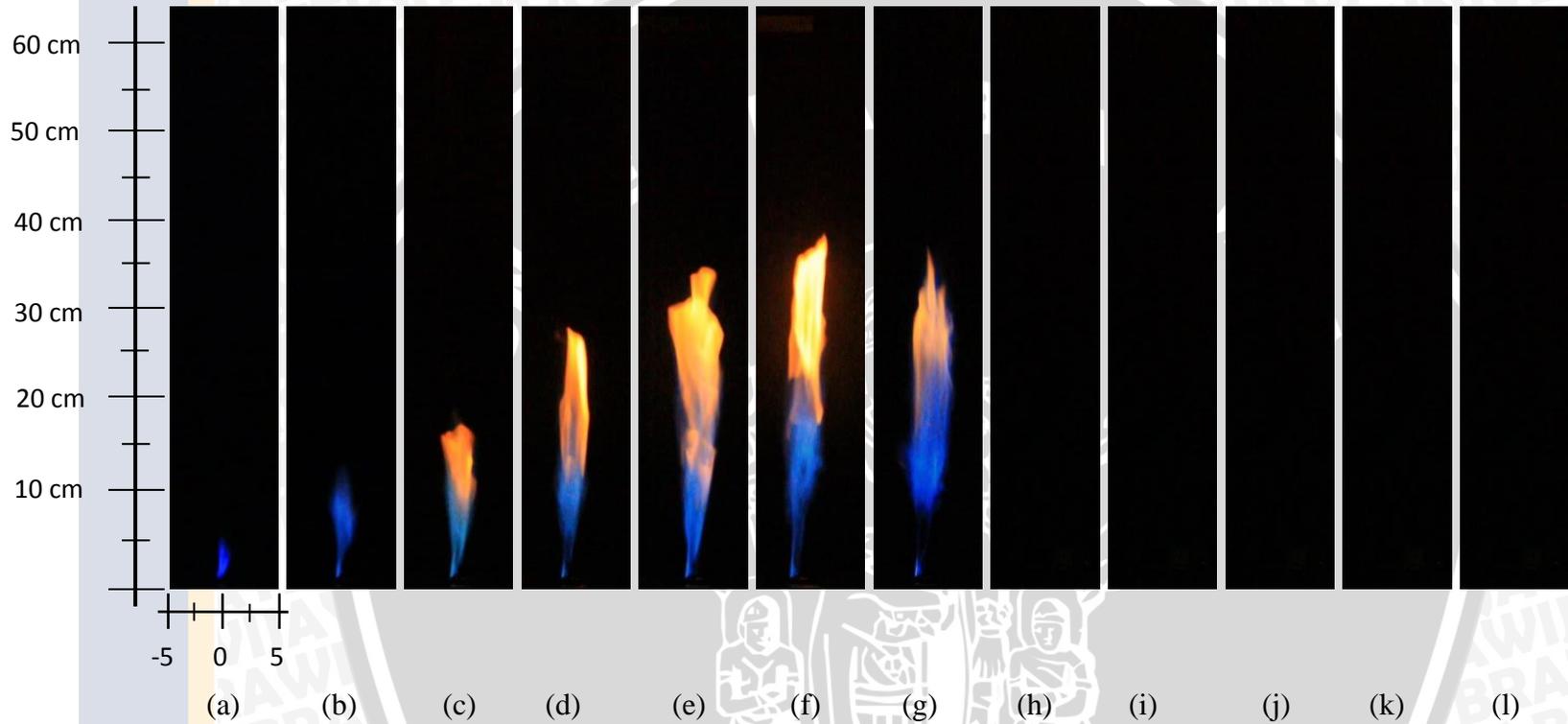
### Visualisasi Api Swirl Tipe Twist dengan Kecepatan Udara 1,6 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



**Keterangan**

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

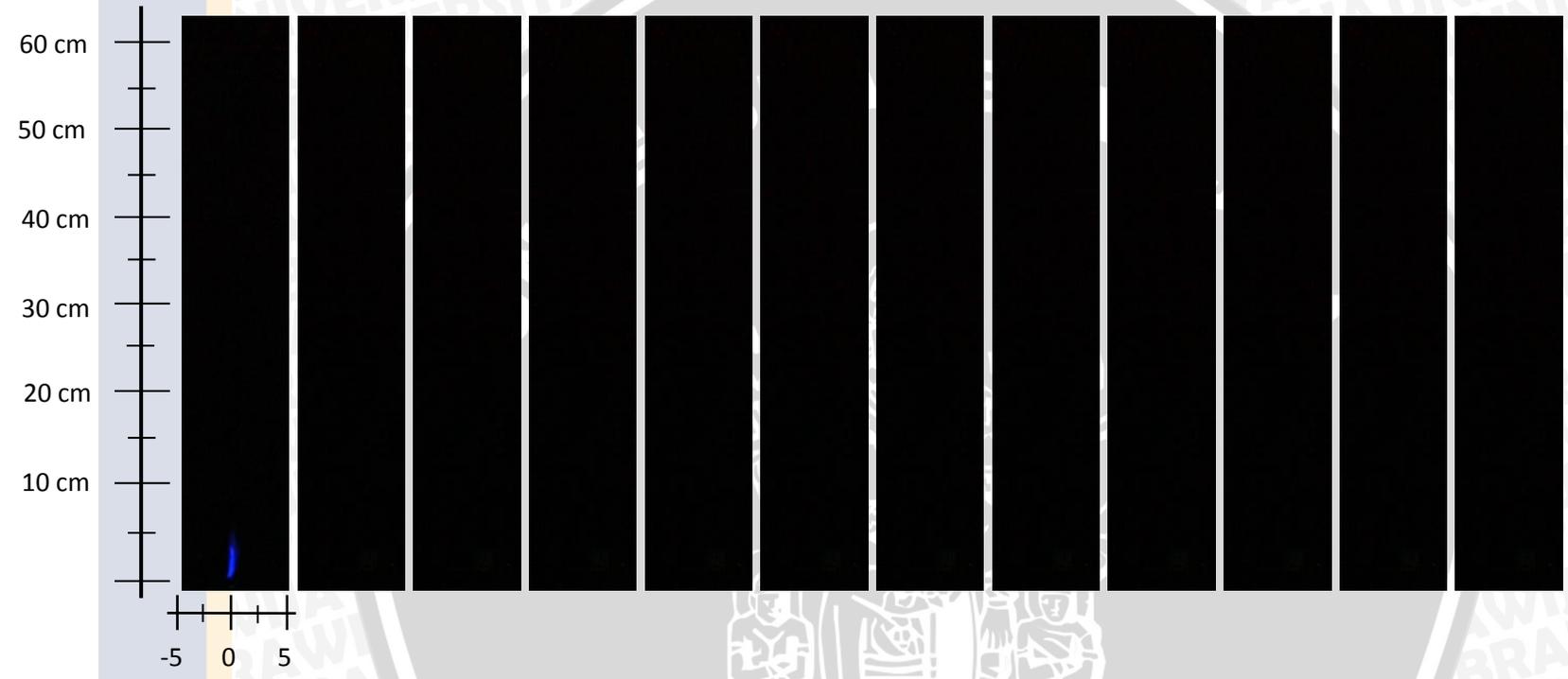
Visualisasi Api Swirl Tipe Twist dengan Kecepatan Udara 2 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

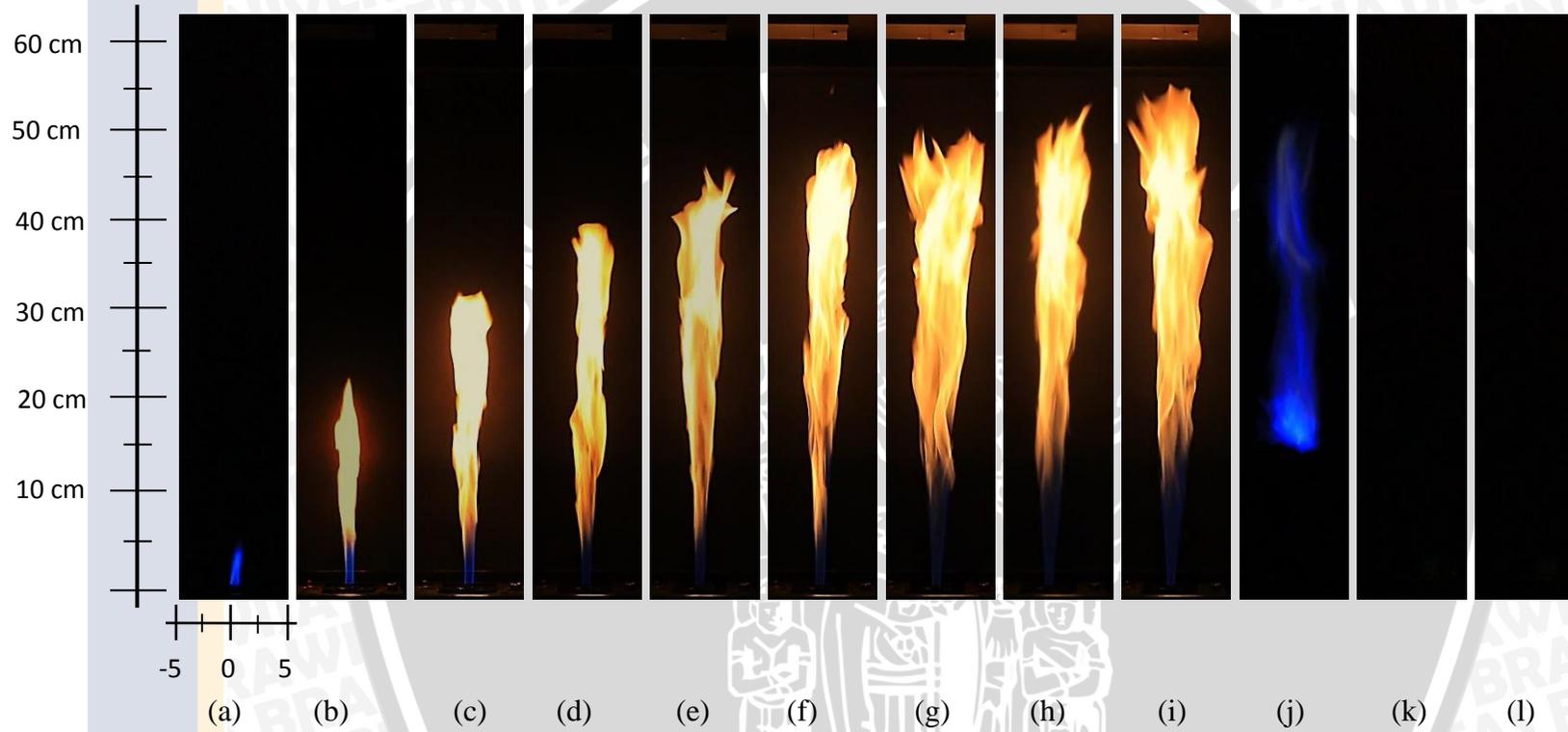
Visualisasi Api Swirl Tipe Twist dengan Kecepatan Udara 2,6 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan:

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

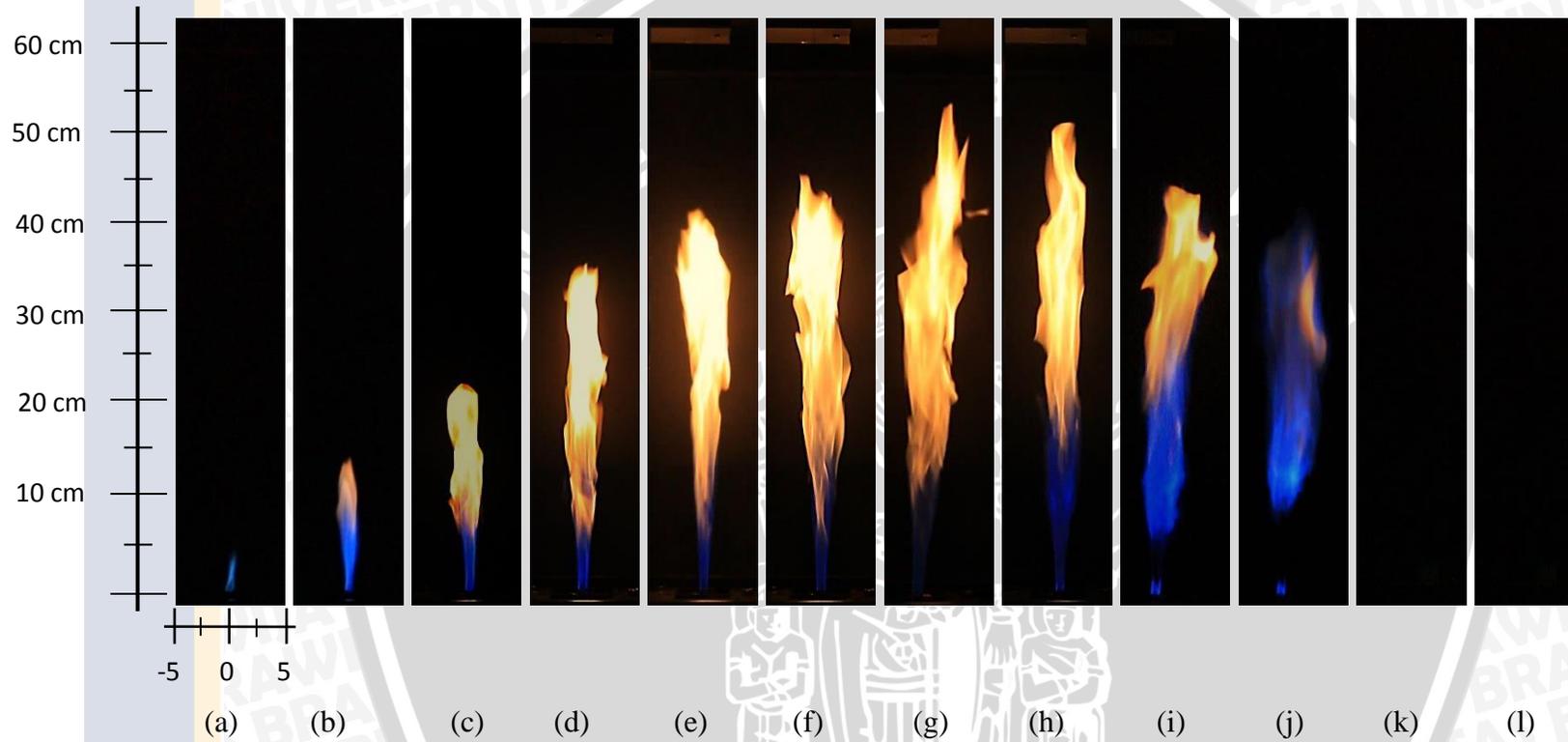
Visualisasi Api Swirl Tipe Melengkung dengan Kecepatan Udara 1 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan:

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

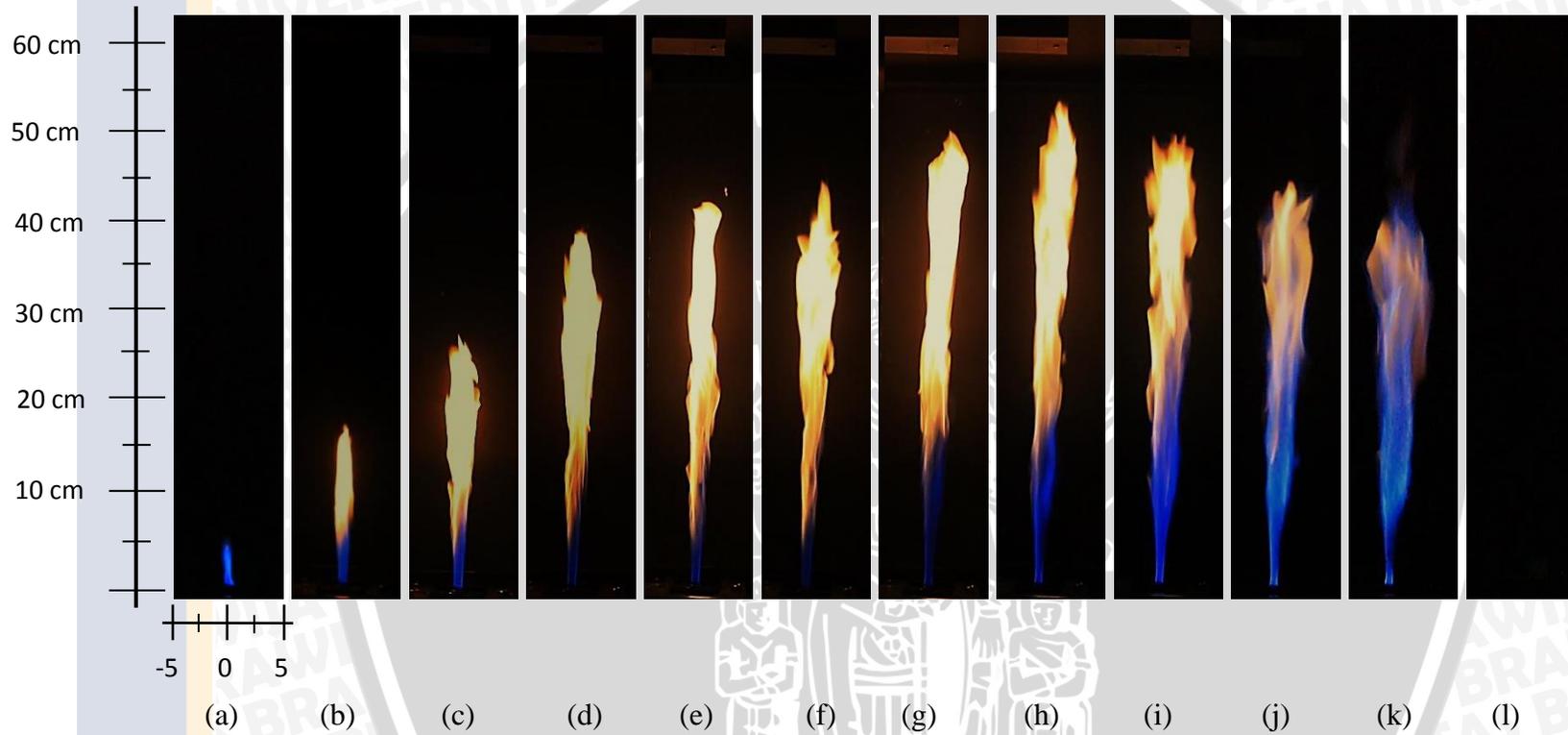
Visualisasi Api Swirl Tipe Melengkung dengan Kecepatan Udara 1,5 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan:

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

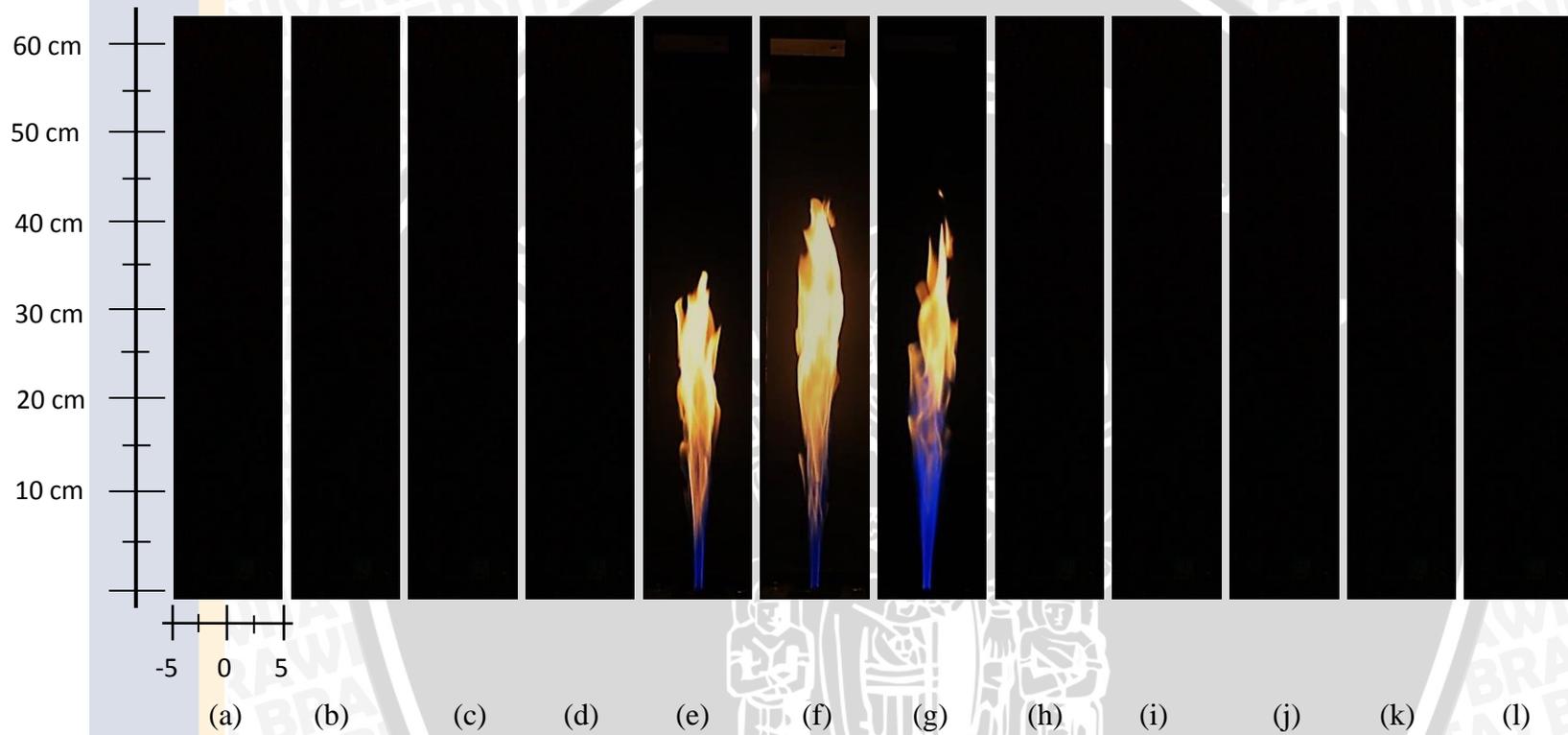
Visualisasi Api Swirl Tipe Melengkung dengan Kecepatan Udara 1,6 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



**Keterangan:**

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

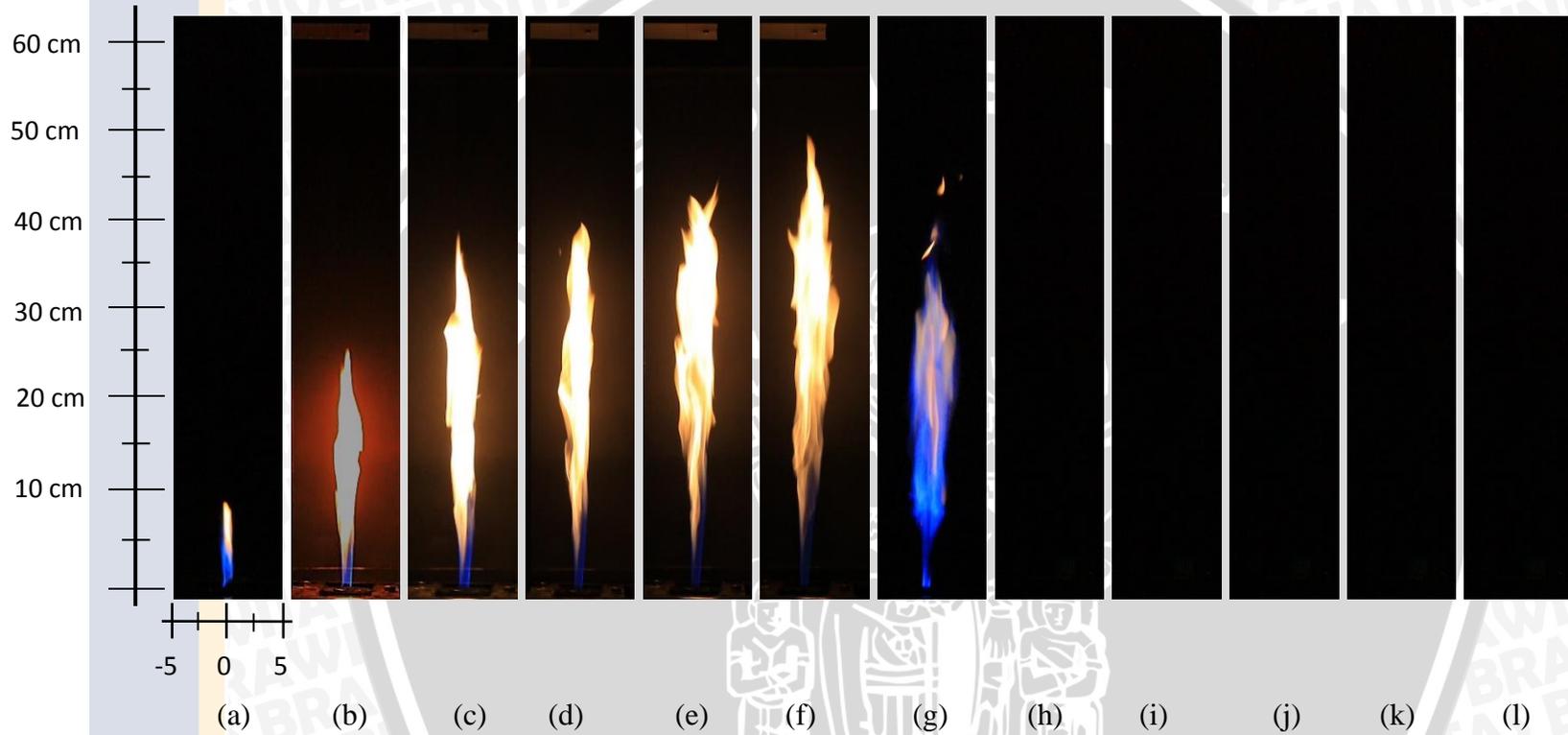
Visualisasi Api Swirl Tipe Melengkung dengan Kecepatan Udara 2 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan:

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

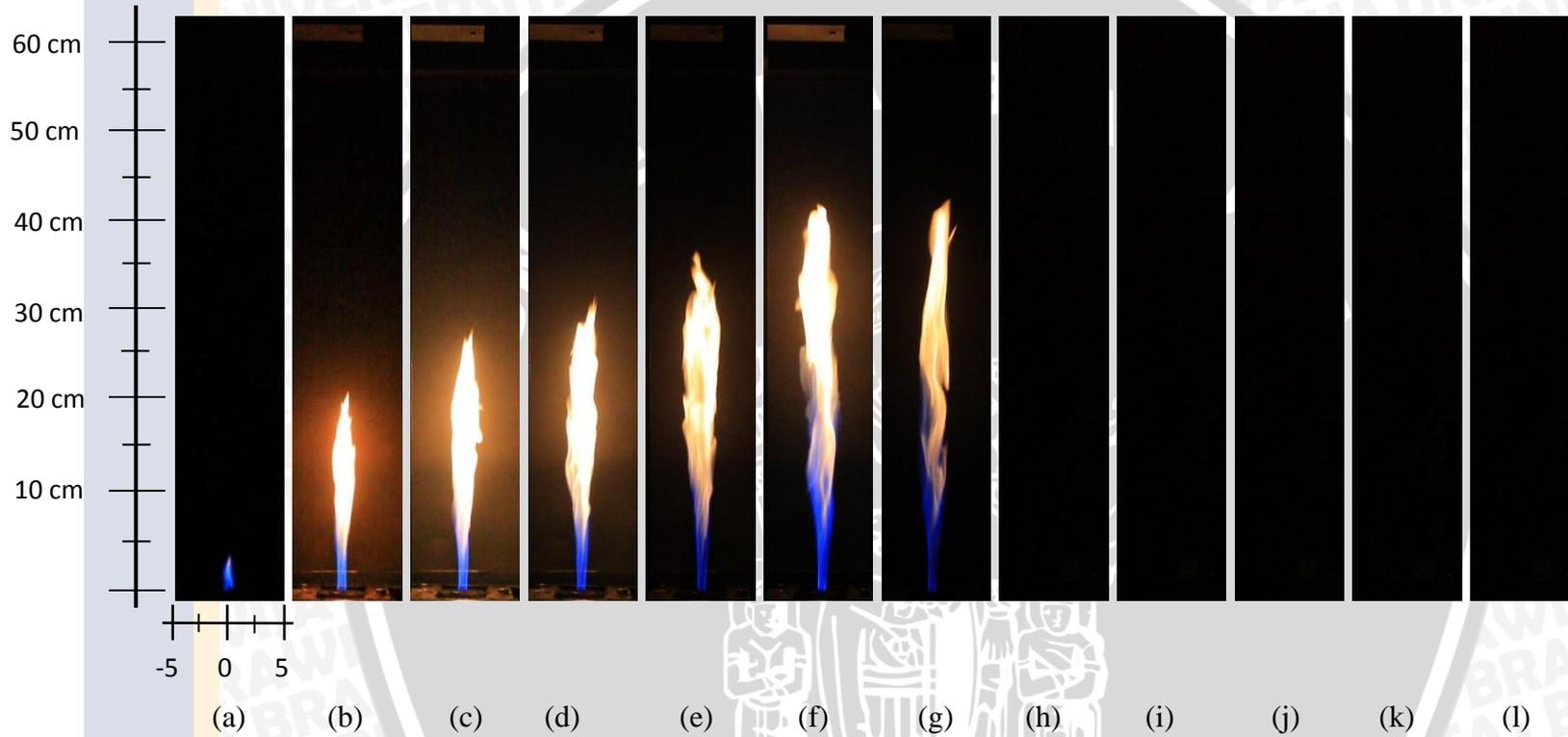
Visualisasi Api Swirl Tipe Mirirng 30° dengan Kecepatan Udara 1 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan:

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

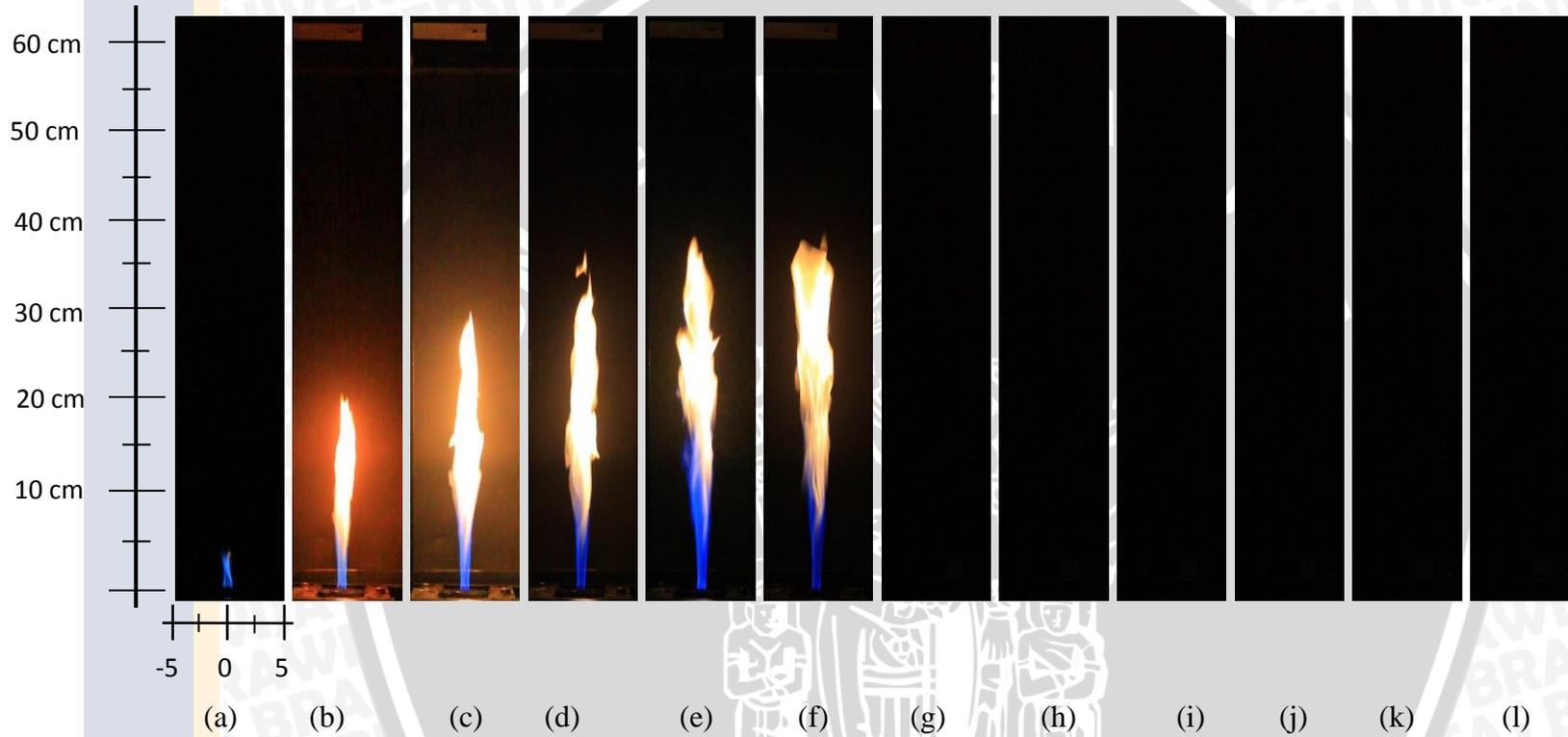
Visualisasi Api Swirl Tipe Mirirng 30° dengan Kecepatan Udara 1,5 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan:

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

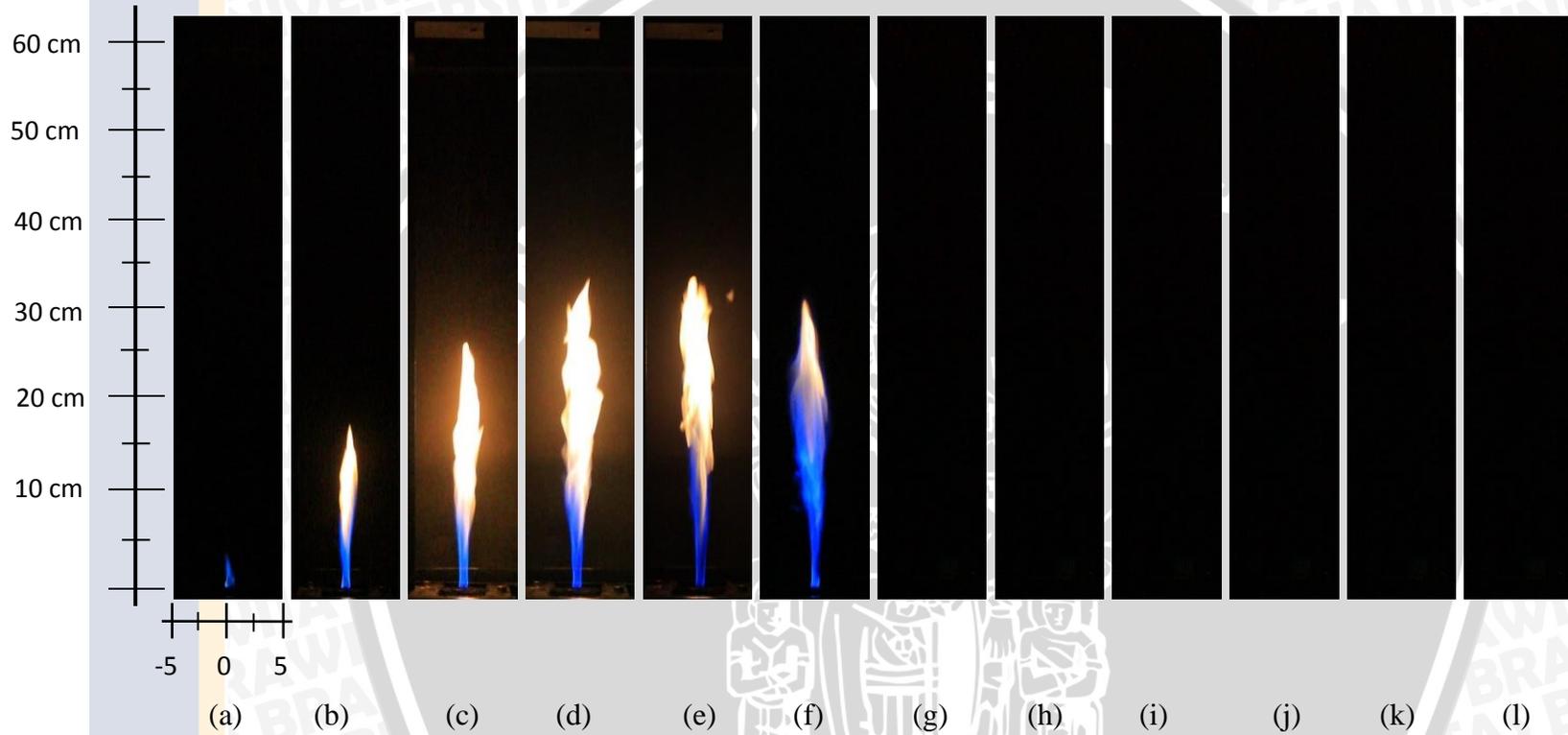
Visualisasi Api Swirl Tipe Mirirng 30° dengan Kecepatan Udara 1,6 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan:

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

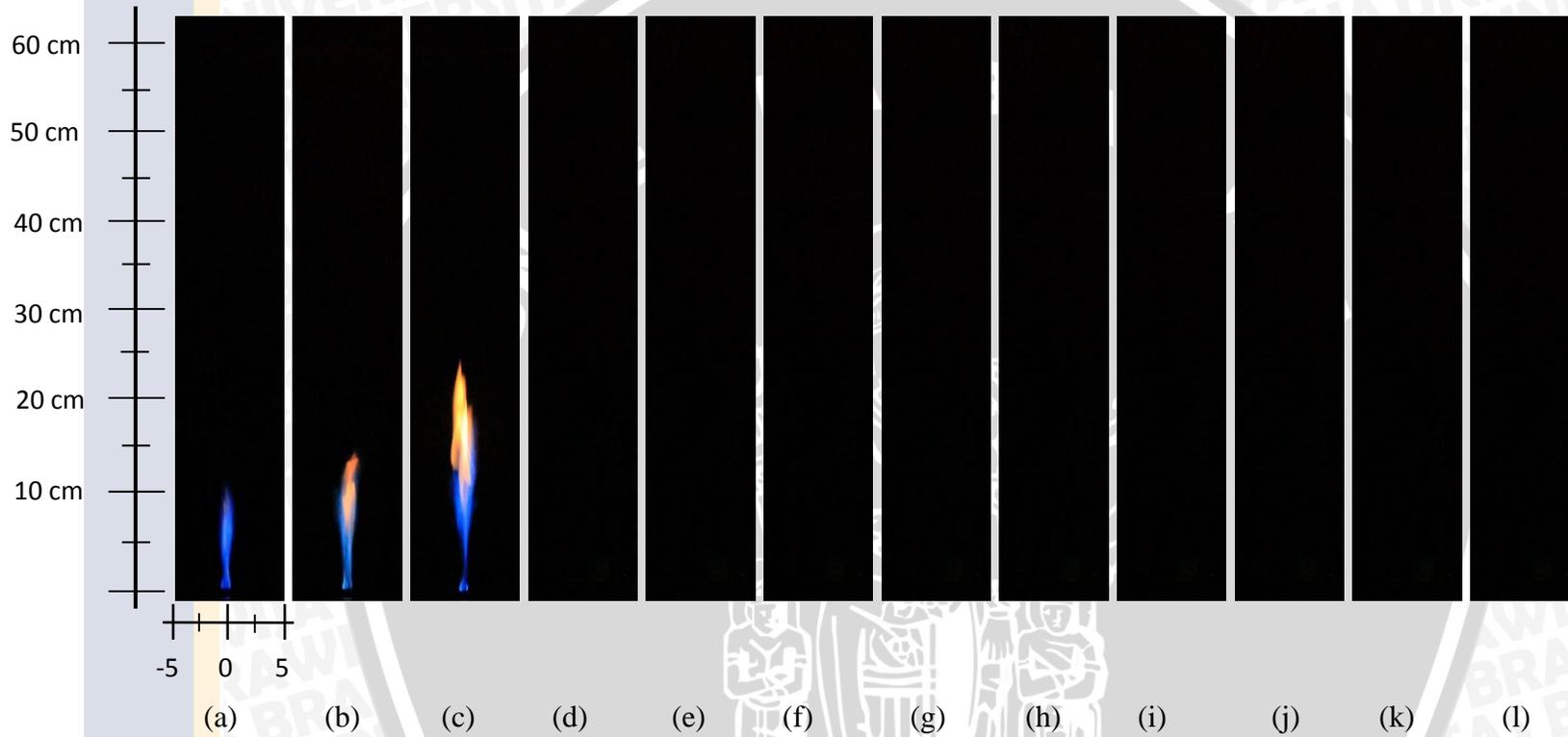
Visualisasi Api Swirl Tipe Mirirng 30° dengan Kecepatan Udara 2 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan:

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

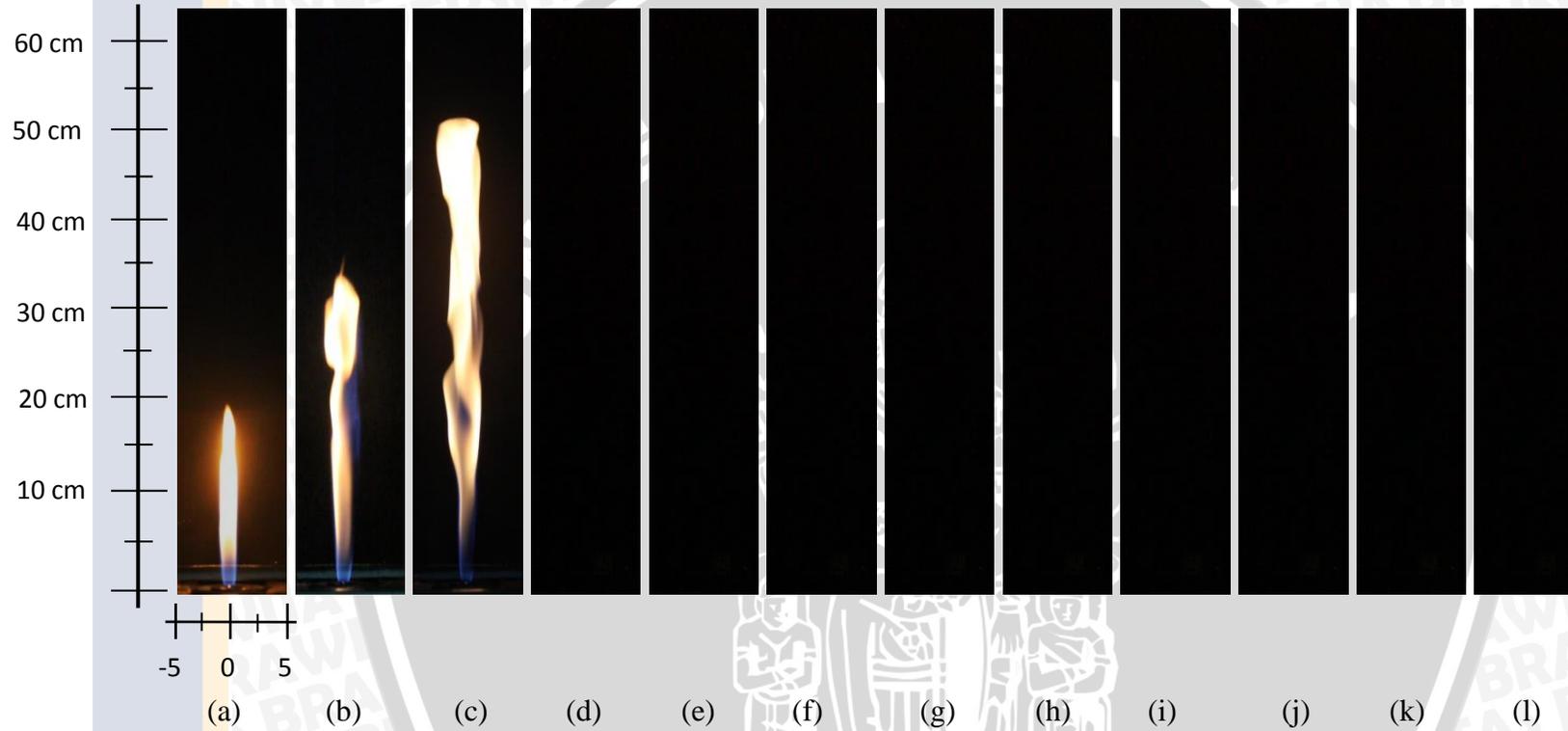
Visualisasi Api Swirl Tipe Mirirng 30° dengan Kecepatan Udara 2,6 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan:

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (a) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (b) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (c) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (d) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (e) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

Visualisasi Api Tanpa Swirl dengan Kecepatan Udara 0,9 m/s dan Variasi Kecepatan Bahan Bakar



Keterangan:

- |               |               |               |
|---------------|---------------|---------------|
| (f) 1.320 m/s | (f) 7.96 m/s  | (k) 14.59 m/s |
| (g) 2.65 m/s  | (g) 9.29 m/s  | (l) 15.92 m/s |
| (h) 3.98 m/s  | (h) 10.61 m/s |               |
| (i) 5.30 m/s  | (i) 11.94 m/s |               |
| (j) 6.63 m/s  | (j) 13.26 m/s |               |

Jenis Swirler : Swirl Twist  
 Kecepatan Bahan Bakar : 1,32 m/s  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s

X \ Y	Peletakan Sensor <i>Thermocouple</i> Arah Horizontal				
	X = 0 mm	X = 10 mm	X = 20 mm	X = 30 mm	X = 40 mm
Y = 10 mm	891.8239	136.587	35.72993	37.85496	36.83471
Y = 20 mm	960.4713	182.2162	30.20673	47.29601	37.47797
Y = 30 mm	888.4331	180.2128	39.88553	43.10199	40.44959
Y = 40 mm	975.6477	414.3573	77.59749	55.67648	41.41948
Y = 50 mm	1021.113	566.3447	78.80055	47.66225	41.56836
Y = 60 mm	1061.01	324.5905	86.16871	59.88997	43.63975
Y = 70 mm	1178.687	295.4356	76.92983	86.6139	46.57518
Y = 80 mm	1214.077	409.5214	106.8566	76.225	46.09181
Y = 90 mm	1247.915	836.2003	152.3617	95.71974	50.80514
Y = 100 mm	1229.344	684.9346	132.5553	132.9471	73.40617
Y = 110 mm	1184.376	678.7159	135.2918	107.8385	64.6303
Y = 120 mm	1179.018	368.5641	158.9189	122.2696	94.56264
Y = 130 mm	912.1372	447.285	184.5284	172.2116	83.87687
Y = 140 mm	897.9192	493.525	185.7504	135.0476	78.76789
Y = 150 mm	762.8406	441.9375	202.393	173.2211	104.738
Rata-rata	347.0351				

Jenis Swirler : *Swirl Twist*  
 Kecepatan Bahan Bakar : 10.61 m/s  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s

X \ Y	Peletakan Sensor <i>Thermocouple</i> Arah Horizontal			
	X = 0 mm	X = 20 mm	X = 30 mm	X = 40 mm
Y = 10 mm	891.8239	35.72993	77.01083	63.08523
Y = 60 mm	947.2557	86.16871	83.28452	69.63298
Y = 120 mm	1061.01	179.8681	90.27086	77.01083
Y = 180 mm	1091.731	961.0855	415.2506	104.3647
Y = 240 mm	1138.964	919.5353	507.1848	118.1513
Y = 300 mm	1054.445	831.3098	423.3213	208.4377
Y = 360 mm	1135.142	695.06	407.3214	286.5328
Y = 420 mm	878.6123	549.3371	437.8961	374.6
Y = 480 mm	688.7456	523.6796	358.9943	328.3116
Y = 540 mm	513.7119	486.4054	375.0942	321.3926
Y = 600 mm	452.0166	455.4815	328.3207	316.2014
Rata-rata	485.1998			

Jenis Swirler : Swirl Twist  
 Kecepatan Bahan Bakar : 14.59 m/s  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s

X \ Y	Peletakan Sensor <i>Thermocouple</i> Arah Horizontal				
	X = 0 mm	X = 10 mm	X = 20 mm	X = 30 mm	X = 40 mm
Y = 10 mm	41.41611	62.61375	69.11693	43.51637	37.21853
Y = 50 mm	895.2478	219.1802	219.1802	137.1358	56.35462
Y = 100 mm	1036.761	858.7401	311.9023	173.0315	75.69645
Y = 150 mm	1050.154	959.3749	621.6433	439.5042	176.9805
Y = 200 mm	1058.902	1170.649	613.9476	566.5603	336.0482
Y = 250 mm	1127.764	969.7022	741.6983	422.2507	436.6427
Y = 300 mm	1127.424	866.8058	525.1026	435.5622	342.3867
Y = 350 mm	1026.158	776.9012	528.9321	540.0655	381.4003
Y = 400 mm	805.6492	737.2592	519.4063	498.0166	464.1651
Y = 450 mm	723.5722	594.482	470.6712	428.4053	376.8351
Y = 500 mm	518.1727	506.8755	465.7912	490.5087	433.4421
Rata-rata	536.5986				



Jenis Swirler : Swirl Melengkung  
 Kecepatan Bahan Bakar : 1,32 m/s  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s

Y \ X	Peletakan Sensor <i>Thermocouple</i> Arah Horizontal		
	X = 0 mm	X = 20 mm	X = 40 mm
Y = 10 mm	688.0406	32.54561	26.28203
Y = 20 mm	857.4229	47.39245	28.08905
Y = 30 mm	1109.505	40.854	28.86591
Y = 40 mm	1128.035	297.4956	33.60839
Y = 50 mm	1152.344	62.02942	31.98814
Y = 60 mm	1184.918	88.65438	531.6048
Y = 70 mm	1148.827	111.2286	55.18122
Y = 80 mm	1194.479	142.7395	55.18122
Y = 90 mm	1191.507	153.5464	78.31125
Y = 100 mm	998.3837	175.7284	53.4201
Y = 110 mm	1058.594	237.8137	71.12804
Y = 120 mm	930.8088	250.6738	105.5426
Y = 130 mm	760.3865	251.437	77.87709
Y = 140 mm	813.2679	243.7779	106.5841
Y = 150 mm	786.0938	278.8662	119.3345
Rata-rata	424.2466		

Jenis *Swirler* : *Swirl* Melengkung  
 Kecepatan Bahan Bakar : 10.61 m/s  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s

X \ Y	Peletakan Sensor <i>Thermocouple</i> Arah Horizontal		
	X = 0 mm	X = 20 mm	X = 40 mm
Y = 10 mm	137.57	63.17	69.59
Y = 60 mm	982.94	196.10	63.40
Y = 120 mm	1070.70	172.75	86.82
Y = 180 mm	1114.90	446.44	223.07
Y = 240 mm	1128.27	698.87	183.42
Y = 300 mm	1157.58	993.55	421.68
Y = 360 mm	664.58	660.96	577.84
Y = 420 mm	624.81	511.88	457.26
Y = 480 mm	461.22	363.02	296.78
Y = 540 mm	416.23	364.47	270.46
Y = 600 mm	458.00	355.55	339.53
Rata-rata	485.86		

Jenis *Swirler* : *Swirl* Melengkung  
 Kecepatan Bahan Bakar : 14.59 m/s  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s

X \ Y	Peletakan Sensor <i>Thermocouple</i> Arah Horizontal		
	X = 0 mm	X = 20 mm	X = 40 mm
Y = 10 mm	35.86274	55.20876	62.77058
Y = 50 mm	69.90092	284.7769	67.36125
Y = 100 mm	1023.262	886.2107	92.90976
Y = 150 mm	871.4793	1040.935	354.2097
Y = 200 mm	1012.951	955.903	480.2557
Y = 250 mm	1096.729	849.7901	414.7127
Y = 300 mm	997.1411	795.1142	641.4058
Y = 350 mm	949.9241	648.3635	408.2194
Y = 400 mm	742.8122	480.0625	424.186
Y = 450 mm	540.0322	529.8728	404.945
Y = 500 mm	446.1527	381.6543	285.2948
Rata-rata	555.467		



Jenis Swirler : Swirl Miring 30°  
 Kecepatan Bahan Bakar : 1,32 m/s  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s

X \ Y	Peletakan Sensor <i>Thermocouple</i> Arah Horizontal				
	X = 0 mm	X = 10 mm	X = 20 mm	X = 30 mm	X = 40 mm
Y = 10 mm	816.7578	587.778	27.04329	24.18161	64.89604
Y = 20 mm	1167.963	541.7097	28.02567	47.26634	31.14334
Y = 30 mm	1266.23	133.5232	133.5232	37.67824	30.27222
Y = 40 mm	1278.696	1144.543	200.7171	53.25169	31.06343
Y = 50 mm	1282.866	1289.138	320.2863	38.02745	31.59743
Y = 60 mm	1294.45	1218.817	1161.88	40.58818	32.37185
Y = 70 mm	1258.149	1228.042	353.4257	65.01673	29.05991
Y = 80 mm	1281.984	1174.441	439.4858	46.91684	30.04721
Y = 90 mm	1242.883	635.4069	344.7084	90.36551	46.72405
Y = 100 mm	1103.975	830.1832	314.2361	112.5508	53.48303
Y = 110 mm	945.6834	645.1062	301.2905	113.5781	77.9368
Y = 120 mm	833.9524	561.9055	287.0425	142.6707	74.73124
Y = 130 mm	715.8693	5407.931	303.2575	181.0499	148.7993
Y = 140 mm	725.4168	555.3814	320.7674	98.08908	172.6989
Rata-rata	537.8647				

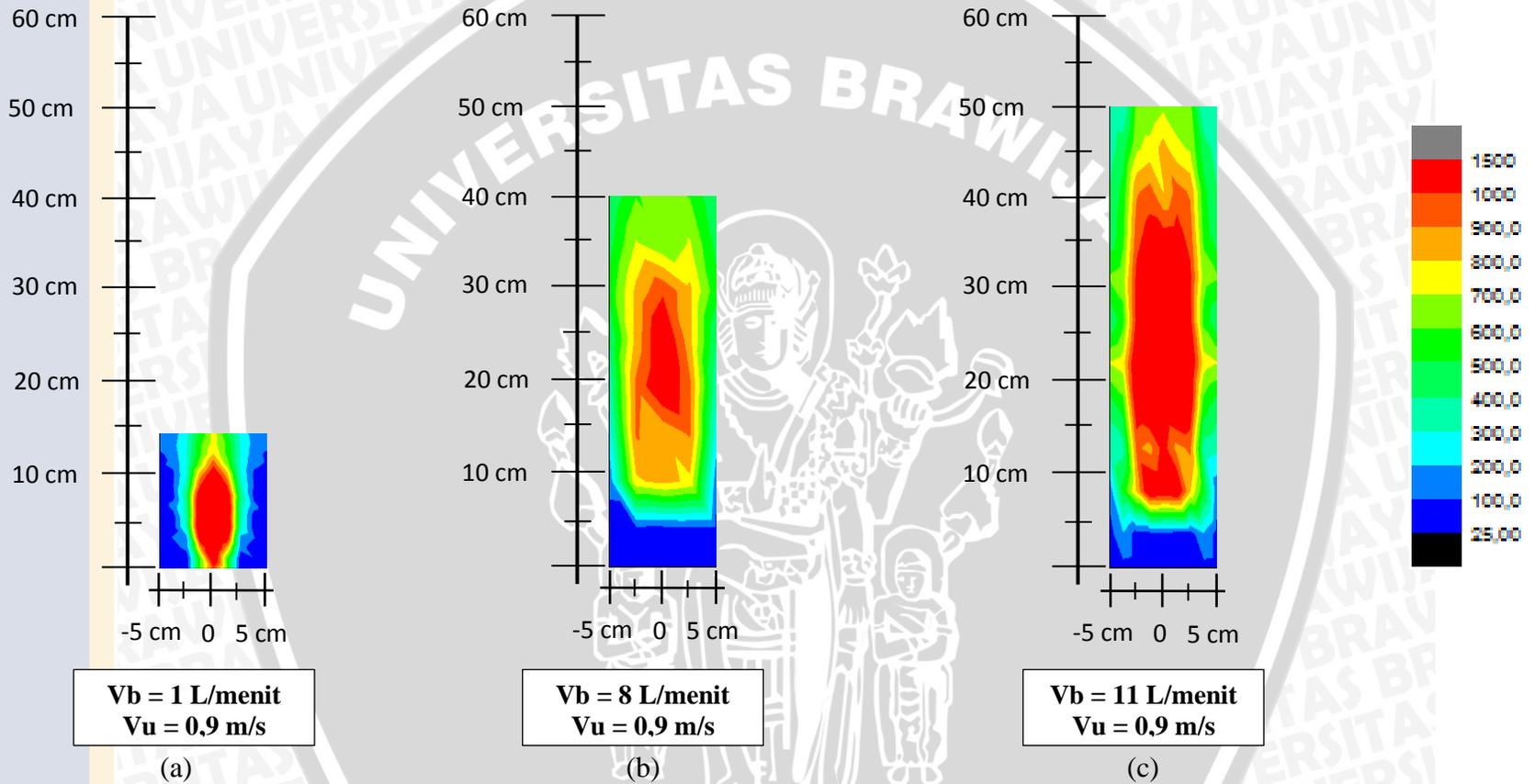
Jenis Swirl : Swirl Miring 30°  
 Kecepatan Bahan Bakar : 6.63 m/s  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s

X \ Y	Peletakan Sensor <i>Thermocouple</i> Arah Horizontal				
	X = 0 mm	X = 10 mm	X = 20 mm	X = 30 mm	X = 40 mm
Y = 10 mm	833.8022	246.9397	40.83683	52.30666	40.80874
Y = 50 mm	1072.849	637.6885	56.90467	108.4461	70.07493
Y = 100 mm	983.3081	1115.281	250.89	182.8814	108.5959
Y = 150 mm	1244.518	713.2287	422.5591	539.6678	397.5135
Y = 200 mm	1088.296	692.8644	317.6674	321.9733	272.9999
Y = 250 mm	1010.037	810.3519	345.0288	272.8258	149.4178
Y = 300 mm	787.2052	559.1127	448.6688	276.7609	257.4395
Y = 350 mm	765.8309	656.2158	474.3143	336.792	252.9705
Y = 400 mm	650.1708	596.9211	425.8122	312.3424	279.7993
Y = 450 mm	410.6943	468.5106	388.7067	337.6934	294.1303
Y = 500 mm	438.7975	450.0844	332.2349	317.4761	298.8906
Rata-rata	634.077				

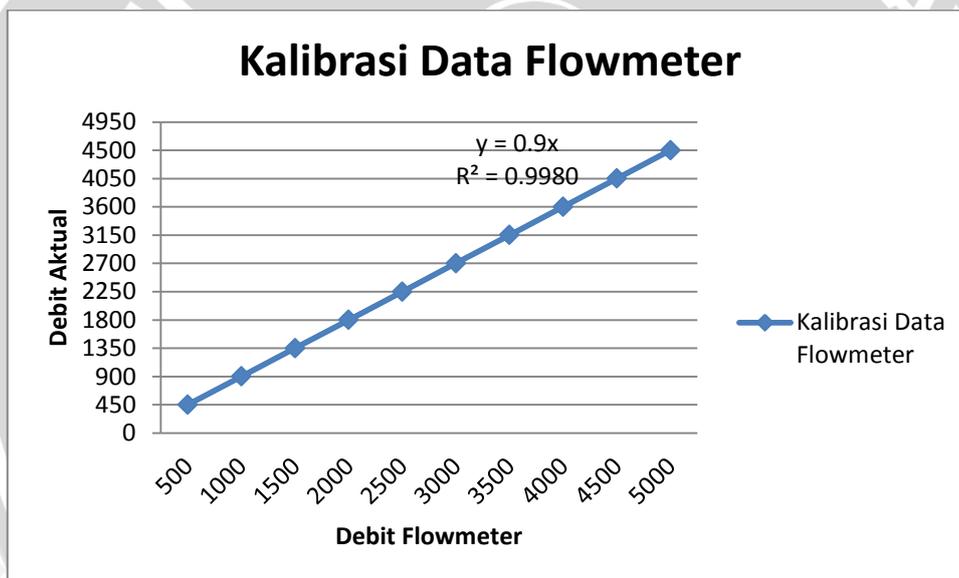
Jenis *Swirler* : *Swirl Miring 30°*  
 Kecepatan Bahan Bakar : 13.26 m/s  
 Kecepatan Udara : 0,9 m/s

X \ Y	Peletakan Sensor <i>Thermocouple</i> Arah Horizontal				
	X = 0 mm	X = 10 mm	X = 20 mm	X = 30 mm	X = 40 mm
Y = 10 mm	27.27372	43.3282	53.97474	57.9867	61.55507
Y = 50 mm	64.01221	56.30591	53.01133	191.5078	59.89078
Y = 100 mm	1113.373	1154.616	805.6403	522.1596	129.1803
Y = 150 mm	1048.551	864.5138	919.5335	356.0633	321.5938
Y = 200 mm	1117.755	1173.812	1100.608	553.4682	444.5748
Y = 250 mm	1071.474	1161.878	1161.583	748.7426	703.7563
Y = 300 mm	1144.853	1083.92	1031.848	562.3325	404.5382
Y = 350 mm	1161.483	1140.635	1029.166	653.4254	611.0964
Y = 400 mm	1035.562	1054.111	954.0997	572.0582	419.0676
Y = 450 mm	792.4664	941.3575	885.3754	533.1691	404.3131
Y = 500 mm	838.5205	737.4896	683.1821	451.5644	356.3914
Y = 550 mm	677.7113	614.3092	623.61	303.9064	329.2613
Rata-rata	662.9586				

Kontur distribusi temperatur *swirl* miring 30° dengan variasi kecepatan bahan bakar (a) 1,32 m/s (b) 10,61 m/s (c) 14,59 m/s



Debit Aktual	Debit Flowmeter
450	500
900	1000
1350	1500
1800	2000
2250	2500
2700	3000
3150	3500
3600	4000
4050	4500
4500	5000



## 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°C

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