

**PENGARUH JUMLAH SUDU SWIRL VANES TERHADAP  
VISUALISASI DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI**

**SKRIPSI**

**KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**RADISSA DZAKY ISSAFIRA  
NIM. 125060201111025**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA**

**FAKULTAS TEKNIK**

**MALANG**

**2016**

**LEMBAR PENGESAHAN**  
**PENGARUH JUMLAH SUDU SWIRL VANES TERHADAP**  
**VISUALISASI DAN DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI**

**SKRIPSI**  
**TEKNIK MESIN KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



**RADISSA DZAKY ISSAFIRA**  
**NIM. 125060201111025**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing  
pada tanggal 15 Agustus 2016

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

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

Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng  
NIP. 19890102 201504 2 002

Mengetahui  
Ketua Jurusan/Ketua Program Studi

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





# UNIVERSITAS BRAWIJAYA



*For the love of my life  
My beloved father and mother*

## 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 oleh 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.

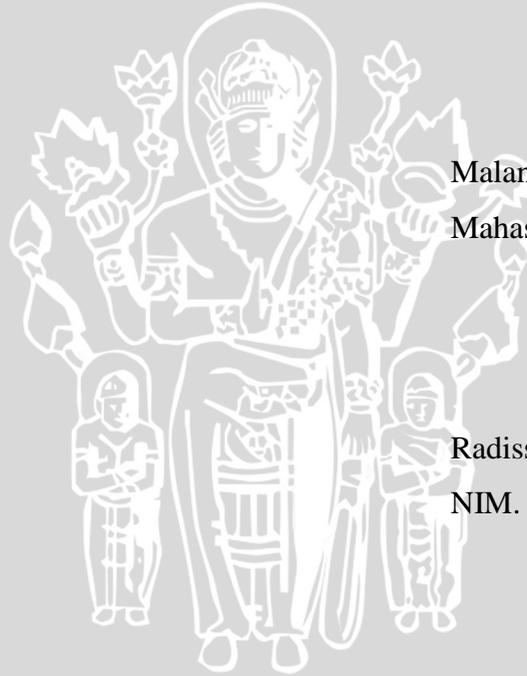
Apabila ternyata di dalam naskah Skripsi ini dapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2013, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 14 Juli 2016

Mahasiswa,

Radissa Dzaky Issafira

NIM. 125060201111025



**JUDUL SKRIPSI :**  
**PENGARUH JUMLAH SUDU *SWIRL VANES* TERHADAP VISUALISASI DAN  
 DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI**

Nama Mahasiswa : Radissa Dzaky Issafira  
 NIM : 125060201111025  
 Program Studi : Teknik Mesin  
 Konsentrasi : Konversi Energi

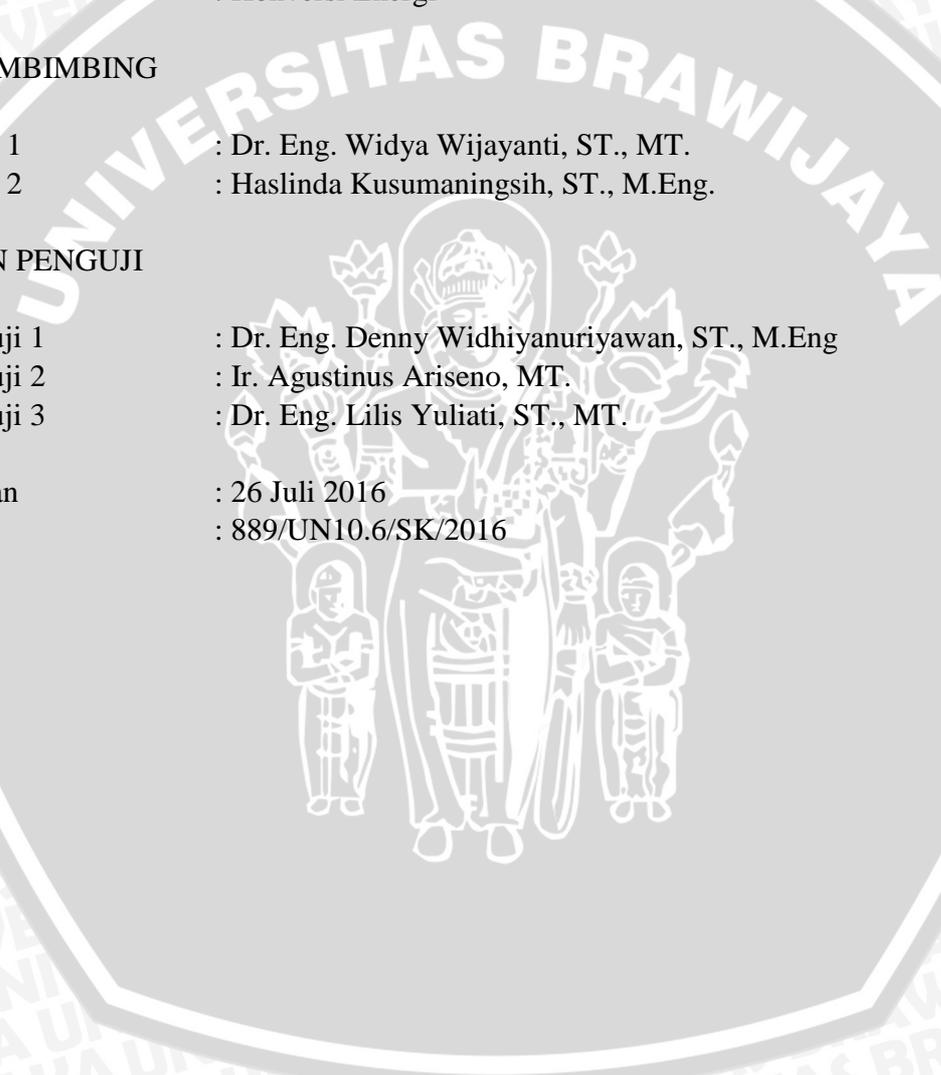
**KOMISI PEMBIMBING**

Pembimbing 1 : Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT.  
 Pembimbing 2 : Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng.

**TIM DOSEN PENGUJI**

Dosen Penguji 1 : Dr. Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST., M.Eng  
 Dosen Penguji 2 : Ir. Agustinus Ariseno, MT.  
 Dosen Penguji 3 : Dr. Eng. Lilis Yuliati, ST., MT.

Tanggal Ujian : 26 Juli 2016  
 SK Penguji : 889/UN10.6/SK/2016



## KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Allah, Penguasa semesta alam. Berkat limpahan rahmat dan kasih sayang-Nya, penulis dapat menyelesaikan naskah skripsi dengan judul “Pengaruh Jumlah Sudu *Swirl Vanes* terhadap Visualisasi dan Distribusi Temperatur Api Difusi”. Penulisan skripsi ini diajukan untuk memenuhi salah satu syarat kelulusan dalam jenjang perkuliahan Stata I Universitas Brawijaya.

Demikian juga tidak lupa semoga sholawat serta salam senantiasa tercurah kepada kekasih pilihan Allah, Muhammad SAW. Semoga rahmat, barakah dan inayah-Nya selalu bergema pada sanak kerabat, sahabat, para tabi’in dan orang-orang yang mengikuti jejak mereka sampai pada hari kiamat. Dari hidup dan kehidupan merekalah kita semua memperoleh pelajaran yang berharga.

Selanjutnya kami ucapkan terima kasih yang sebanyak-banyaknya kepada:

1. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng., Dr.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
2. Purnami, ST., MT selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya
3. Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT., selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya dan Dosen Pembimbing I skripsi yang telah senantiasa memberikan bimbingan yang sangat bermanfaat serta motivasi tiada henti dalam penyusunan skripsi;
4. Francisca Gayuh U. D., ST., MT., selaku Ketua Kelompok Dasar Keahlian konsentrasi Teknik Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya;
5. Haslinda Kusumaningsih, ST., M.Eng., selaku dosen pembimbing II skripsi yang telah memberikan bimbingan dan ilmu yang sangat berguna dalam penyusunan skripsi;
6. Ayah Ir. H. Rudi Istoyo dan Ibunda Hj. Mamik Srimulyani.,S.Pd.,M.Pd yang tidak pernah lelah memberikan motivasi untuk penulis, kesabaran yang tidak pernah sirna untuk mendengarkan keluhan dari penulis, serta do’a yang selalu dipanjatkan untuk kelancaran pengerjaan skripsi penulis, terima kasih banyak;

7. Kakak dan adik tersayang Radina Anggun Nurisma dan Faidza Fariq Arrifa yang selalu memberikan keceriaan dan semangat dalam masa masa penulis menyelesaikan skripsi;
8. Teman seperjuangan skripsi *swirl vanes* Fajar Wasis Satrio Utomo, Annisa Rakhma Ramadhani, dan Rayvandi Ardiansyah yang tidak pernah putus asa dan selalu semangat menyelesaikan skripsi ini hingga akhir;
9. Rizki Ernawati, Tria Puspa Sari, Zumrotul Ida, Tamaryska Setyayunita, Annisa Rakhma Ramadhani, yang selalu memberikan semangat dan bantuan tiada henti, mendengarkan keluhan dari penulis, dan banyak berbagi cerita bersama selama di Bumi Biru Abang Arek Mesin selama 4 tahun ini;
10. Princess Mesin 2012, ciwi-ciwi mesin yang telah bersama melalui masa-masa senang dan sedih bersama selama 4 tahun ini, terima kasih atas dukungan untuk penulis dalam menyelesaikan penelitian ini, semoga kita semua sukses;
11. Dulur-dulur ADM12AL, semoga kita tidak pernah lelah untuk saling menyemangati satu sama lain;
12. Rekan-rekan Asisten Laboratorium Pengujian Bahan, Andi, Ndoy, Edo, Iko, Safira, Andre, Bonang, Izhar, Padang, Ira yang telah memberikan motivasi pada penulis;
13. Rekan-rekan Asisten Fluida Bachrul, Elga, Zain, Joseph, Mustafa yang tidak pernah lelah membantu penelitian penulis.

Semoga Allah SWT memberikan balasan yang berlipat ganda kepada semuanya. Demi perbaikan selanjutnya, saran dan kritik yang membangun akan penulis terima dengan senang hati. Sehingga pada akhirnya skripsi ini dapat bermanfaat untuk menambah wawasan bagi kita semua.

Malang, 14 Juli 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 .....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Penelitian-penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Pembakaran.....	6
2.3 Pembakaran Difusi.....	7
2.3.1 Nyala Api Difusi Laminar .....	9
2.3.2 Nyala Api Difusi Turbulen .....	10
2.4 Kestabilan Api .....	11
2.5 Resirkulasi .....	12
2.6 <i>Swirl Vanes</i> .....	13
2.6.1 Visualisasi Api.....	15
2.6.2 Distribusi Temperatur .....	16
2.7 Transport Fenomena.....	18
2.8 Konservasi Massa dan Energi.....	19
2.9 Pembakaran Gas .....	21
2.10 Pembakaran Gas Metana (CH <sub>4</sub> ) .....	22
2.11 Nitrogen .....	23
2.12 <i>Origin Lab</i> .....	24
2.13 Hipotesa .....	25



### BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	27
3.2 Variabel Penelitian.....	27
3.3 Alat dan Bahan Penelitian.....	28
3.4 Instalasi Penelitian .....	31
3.5 Prosedur Penelitian .....	31
3.5.1 Distribusi Temperatur .....	31
3.5.2 Visualisasi Api.....	33
3.6 Diagram Alir Penelitian .....	34

### BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Penelitian.....	35
4.2 Perhitungan Data.....	35
4.3 Pembahasan .....	37
4.3.1 Visualisasi Api Difusi.....	37
4.3.1.1 Pengaruh Variasi Kecepatan Bahan Bakar terhadap Visualisasi Api Difusi .....	37
4.3.1.2 Pengaruh Variasi Kecepatan Udara terhadap Visualisasi Api Difusi .....	41
4.3.2 Distribusi Temperatur Api Difusi.....	44
4.3.2.1 Distribusi Temperatur Api Difusi pada Variasi Kecepatan Bahan Bakar.....	44
4.3.2.2 Distribusi Temperatur Api Difusi pada Variasi Jumlah Sudu <i>Swirl</i> <i>Vanes</i> .....	46
4.3.2.3 Pengaruh Variasi Kecepatan Bahan Bakar terhadap Kontur Distribusi Temperatur .....	47

### BAB V PENUTUP

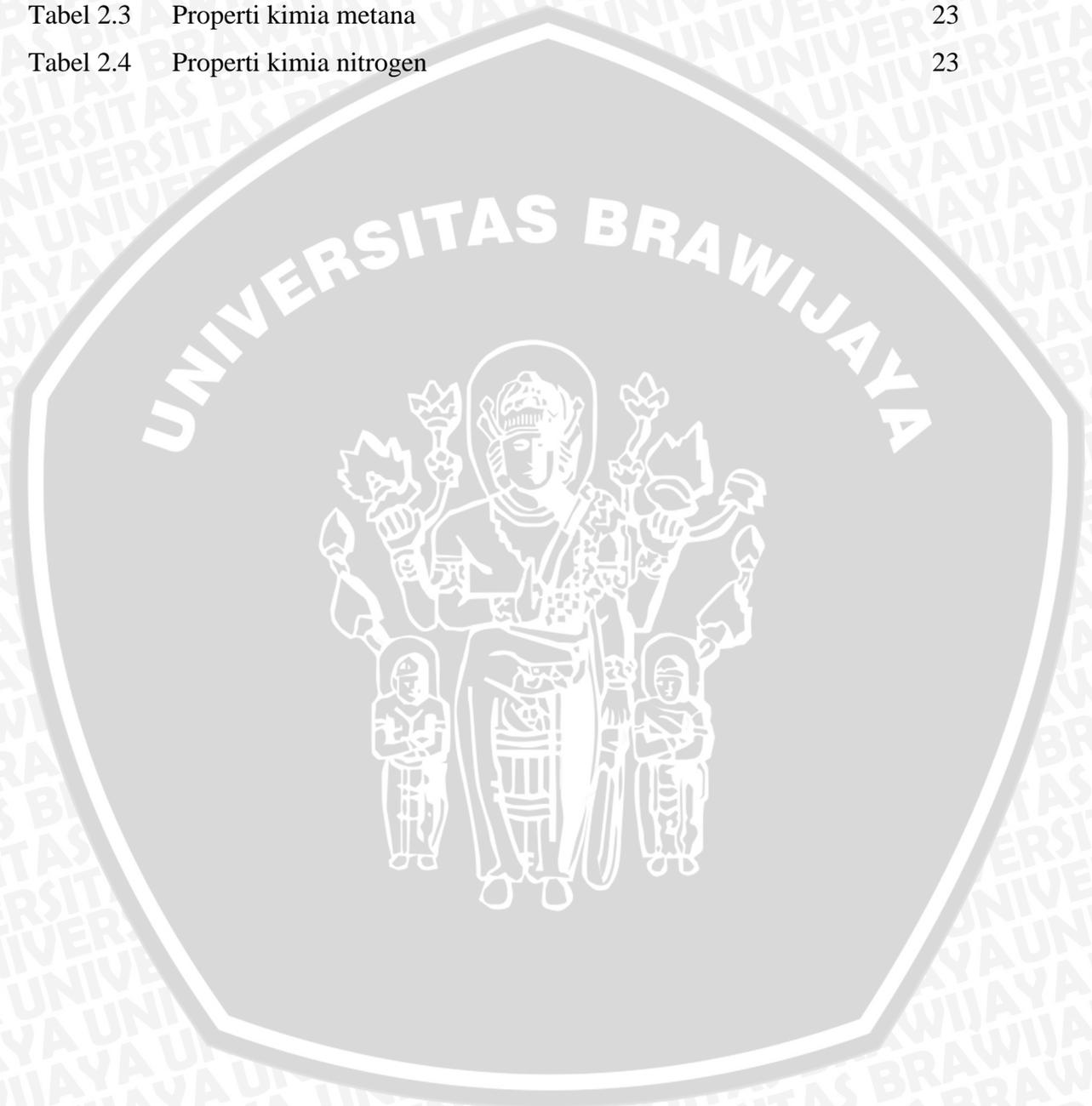
5.1 Kesimpulan.....	51
5.2 Saran .....	51

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

LAMPIRAN .....	xii
----------------	-----

**DAFTAR TABEL**

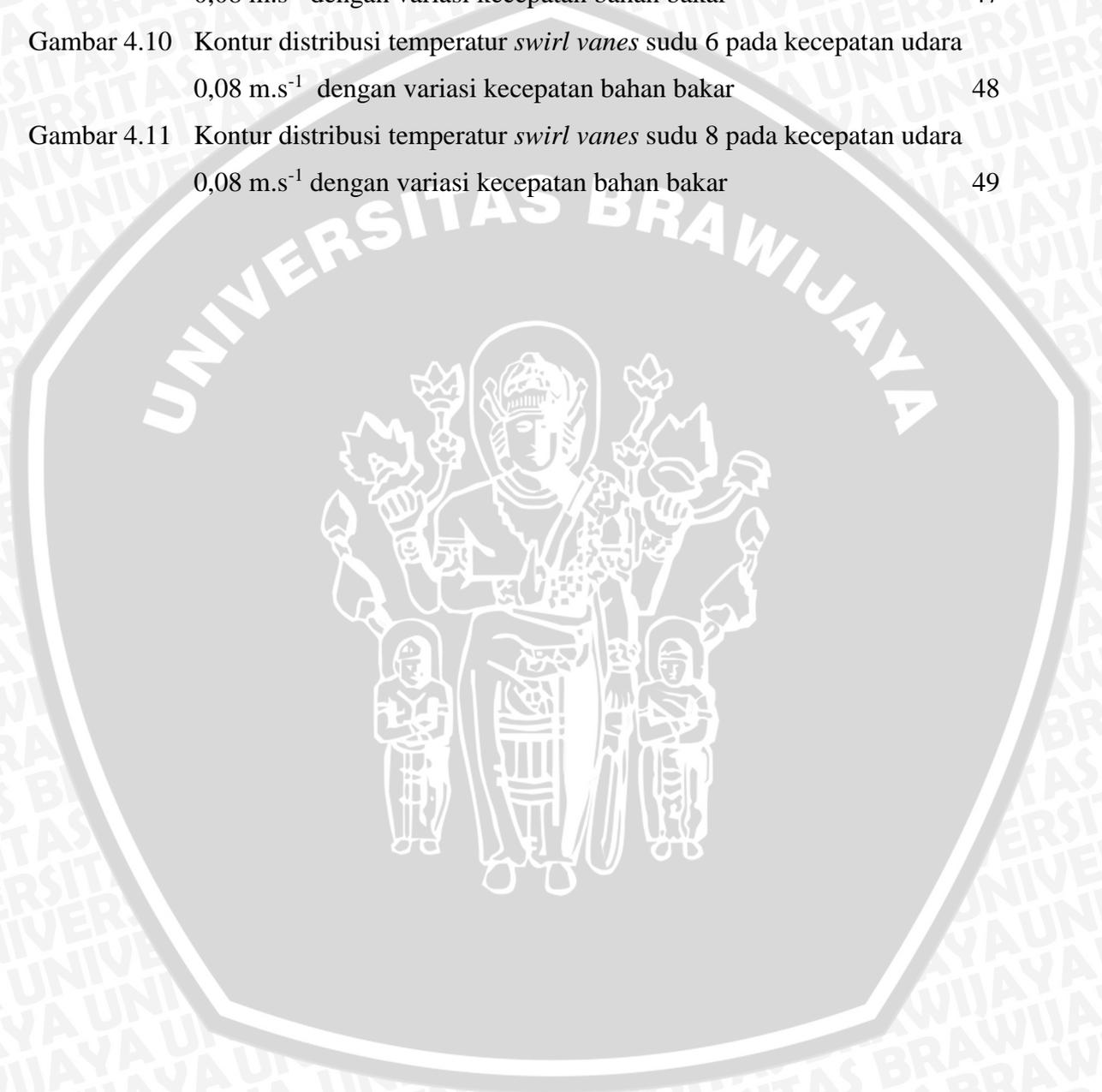
No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Angka reynolds transisi bahan bakar	8
Tabel 2.2	Sifat-sifat bahan bakar gas	21
Tabel 2.3	Properti kimia metana	23
Tabel 2.4	Properti kimia nitrogen	23



## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Perubahan tinggi api dengan penambahan kecepatan aliran	8
Gambar 2.2	Potongan daerah aliran api difusi laminar	9
Gambar 2.3	<i>Over ventilated</i> dan <i>under ventilated</i> api difusi	9
Gambar 2.4	Efek olakan pada aliran turbulen pada permukaan nyala	10
Gambar 2.5	Diskripsi rata rata terhadap waktu $\underline{u}$ dan fluktuasi, $u'$ dari sebuah parameter untuk aliran turbulen	11
Gambar 2.6	Zona resirkulasi dan daerah pancaran api	12
Gambar 2.7	Aliran resirkulasi yang disebabkan oleh pusaran kuat	14
Gambar 2.8	Campuran bahan bakar, udara, dan hasil pembakaran api difusi	14
Gambar 2.9	Visualisasi api difusi dengan penambahan <i>swirler</i> sudut $30^\circ$ dan $60^\circ$	15
Gambar 2.10	Distribusi temperatur api difusi dengan penambahan <i>swirler</i>	17
Gambar 2.11	Distribusi temperatur pada <i>burner</i> dengan diameter $d_0 = 12.65$ mm dan $rc = 12130$	17
Gambar 2.12	Struktur kimia metana	22
Gambar 2.13	<i>Plotting range</i> dari <i>worksheet excel</i> menjadi grafik 2D pada <i>Software Origin</i>	24
Gambar 3.1	Instalasi penelitian	31
Gambar 3.2	Titik pengukuran distribusi temperatur pada api difusi	32
Gambar 4.1	Visualisasi api pada kecepatan udara $0,08 \text{ m.s}^{-1}$ dengan pemasangan <i>swirl vanes</i> sudu 4 pada berbagai variasi kecepatan bahan bakar	37
Gambar 4.2	Visualisasi api pada berbagai variasi kecepatan bahan bakar dengan kecepatan udara $0,08 \text{ m.s}^{-1}$ pada pemasangan <i>swirl vanes</i> sudu 6	38
Gambar 4.3	Visualisasi api pada kecepatan udara $0,08 \text{ m.s}^{-1}$ dengan pemasangan <i>swirl vanes</i> sudu 8 pada berbagai variasi kecepatan bahan bakar	39
Gambar 4.4	Visualisasi api pada variasi kecepatan udara dengan kecepatan bahan bakar $9.28 \text{ m.s}^{-1}$ pada pemasangan <i>swirl vanes</i> sudu 4	42
Gambar 4.5	Visualisasi api pada variasi kecepatan udara dengan kecepatan bahan bakar $9.28 \text{ m.s}^{-1}$ pada pemasangan <i>swirl vanes</i> sudu 6	42
Gambar 4.6	Visualisasi api pada variasi kecepatan udara dengan kecepatan bahan bakar $9.28 \text{ m.s}^{-1}$ pada pemasangan <i>swirl vanes</i> sudu	43
Gambar 4.7	Grafik hubungan temperatur rata-rata sumbu y terhadap sumbu x api	

	difusi pada variasi <i>swirl vanes</i> dengan kecepatan udara 0.08 m/s	44
Gambar 4.8	Grafik hubungan temperatur rata-rata sumbu y terhadap sumbu x api difusi pada variasi <i>swirl vanes</i> dengan kecepatan bahan bakar 1.32 m/s dan kecepatan udara 0.08 m/s.	46
Gambar 4.9	Kontur distribusi temperatur <i>swirl vanes</i> sudu 4 pada kecepatan udara 0,08 m.s <sup>-1</sup> dengan variasi kecepatan bahan bakar	47
Gambar 4.10	Kontur distribusi temperatur <i>swirl vanes</i> sudu 6 pada kecepatan udara 0,08 m.s <sup>-1</sup> dengan variasi kecepatan bahan bakar	48
Gambar 4.11	Kontur distribusi temperatur <i>swirl vanes</i> sudu 8 pada kecepatan udara 0,08 m.s <sup>-1</sup> dengan variasi kecepatan bahan bakar	49



## DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran.1	Visualisasi api difusi <i>swirl vanes</i> sudu 4 dengan variasi bahan bakar
Lampiran 2	Visualisasi api difusi <i>swirl vanes</i> sudu 6 dengan variasi bahan bakar
Lampiran 3	Visualisasi api difusi <i>swirl vanes</i> sudu 8 dengan variasi bahan bakar
Lampiran 4	Tabel temperatur <i>swirl vanes</i> sudu 4
Lampiran 6	Tabel temperatur <i>swirl vanes</i> sudu 6
Lampiran 7	Tabel temperatur <i>swirl vanes</i> sudu 8
Lampiran 8	Tabel bilangan reynold kecepatan bahan bakar
Lampiran 9	Kontur distribusi temperatur pada kecepatan bahan bakar sama
Lampiran 10	Gambar <i>swirl vanes</i> sudu 4
Lampiran 11	Gambar <i>swirl vanes</i> sudu 6
Lampiran 12	Gambar <i>swirl vanes</i> sudu 8



## RINGKASAN

**Radissa Dzaky Issafira**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2016, *Pengaruh Jumlah Sudu Swirl Vanes terhadap Visualisasi dan Distribusi Temperatur Api Difusi*, Dosen Pembimbing: Widya Wijayanti dan Haslinda Kusumaningsih

Pembakaran sebagai salah satu proses konversi energi yang paling sering digunakan, mengakibatkan pembakaran menjadi perhatian utama dalam usaha penghematan energi. Pada umumnya penghematan energi ditekankan pada pemakaian bahan bakar namun dalam hal ini penghematan energi juga dapat dilakukan dengan meningkatkan efisiensi pembakaran. Salah satu cara untuk meningkatkan efisiensi pembakaran dapat dilakukan dengan merubah geometri burner dengan menambahkan *swirl vanes* pada saluran udara pembakaran difusi. *Swirl vanes* merupakan instrumen penghalang atau pengganggu aliran api yang dapat memperbaiki stabilitas api dengan menciptakan aliran turbulen yang akan menghasilkan zona resirkulasi. Resirkulasi akan meningkatkan pencampuran bahan bakar dan udara pada pembakaran difusi. Berdasarkan hal ini maka dilakukan penelitian mengenai pengaruh jumlah sudu swirl vanes terhadap visualisasi dan distribusi temperatur api difusi dengan bahan bakar gas metana ( $\text{CH}_4$ ).

Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui pengaruh jumlah *swirl vanes* terhadap visualisasi dan distribusi temperatur api difusi oleh pusan udara. Pembakaran difusi sendiri merupakan proses pembakaran dimana bahan bakar dan pengoksidasi (udara atau  $\text{O}_2$ ) tidak dicampur secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Instalasi penelitian meliputi tabung metana sebagai penyuplai bahan bakar. *Blower* sebagai penyuplai aliran udara aksial, *burner* sebagai tempat terjadinya reaksi pembakaran dan *swirl vanes* sebagai pengganggu aliran udara. Variabel bebas yang digunakan adalah 3 macam *swirl vanes* dengan variasi jumlah sudu 4, 6, dan 8. Sedangkan variabel bebas yang lain adalah kecepatan udara dan kecepatan bahan bakar. Data visualisasi diambil menggunakan kamera *digital* dan distribusi temperatur menggunakan *thermocouple* jenis K di beberapa titik tertentu pada jarak horizontal dan vertikal.

Dari penelitian ini dapat disimpulkan bahwa semakin banyak jumlah sudu menunjukkan visualisasi tinggi api semakin menurun dan distribusi temperatur rata rata yang semakin tinggi dari jumlah sudu *swirl vanes* 4, 6, dan 8 berturut turut yaitu 324.5, 360.8, dan 448.9 °C.

Kata Kunci : *swirl vanes*, jumlah sudu, visualisasi, distribusi temperatur

## SUMMARY

**Radissa Dzaky Issafira**, Mechanical Engineering, Engineering Faculty of Brawijaya University, July 2016, *The Effect of Swirl Vanes Blade's Amount towards Visualization and Temperatur Distribution of Diffusion Flame*, Lectures : Widya Wijayanti and Haslinda Kusumaningsih

Combustion as one of the energy conservation process which most often used make it as a concern for saving energy problem. Generally the problem that happened in saving energy is the overly used of fuel, but eventually saving energy can be done by increasing the combustion efficiency, so that with the same amount of fuel used the combustion can produce the same output. One of the method that can be used for increasing the efficiency is changing the burner's geometry with adding swirl vanes on the air channel in diffusion combustion. Swirl vanes is one example of obstacle instrumentation or stream disturber which can increasing flame stability by creating a turbulence flow which stimulate the recirculation in diffusion combustion happened. Recirculation will help the mixing between air and fuel getting better. Based on this introduction this research will focused on the effect of swirl vane's blades amount towards visualization and temperature distribution of diffusion flames with the used of methane gas as the fuel.

Diffusion combustion itself is a combustion process which fuel and oxidizer, in this case air not mixed mechanically but naturally mixed with diffusion process. Research instalation are methane's storage tube which will supplied fuel. Centrifugal fan as air supplied, burner as the place where the combustion process happened and swirl vanes as stream disturber. Free variables used in this reasearch are 3 kinds of swirl vanes with the amount of swirl blades respectively 4, 6, 8, the other free variables are fuel and air velocity. Visualization data will taken by the camera digital and temperature distribution will taken by thermocouple series K in some spesific dot in horizontal and vertical distance.

This research conclude that as the swirl blades amount attached more caused the visualization of flame height getting decrease and the temperature average in the flame getting increase, from swirl vanes blades amount 4, 6, 8, the average temperature respectively 324.5, 360.8, and 448.9°C.

**Keyword :** swirl vanes, blades amount, visualization, temperature distribution

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Pembakaran merupakan kunci penting dalam kehidupan modern. Hampir semua jenis teknologi menggunakan pembakaran sebagai sumber energi contohnya di bidang transportasi, pembakaran digunakan untuk mengubah energi kimia menjadi energi mekanik, di bidang industri, pembakaran digunakan untuk pembangkitan uap pada pabrik kertas, pabrik rokok, dan pabrik makanan. Di samping itu pembangkit listrik juga banyak menggunakan pembakaran sebagai sumber energi, terutama pada sistem pembangkit listrik untuk beban puncak yang memerlukan daya tinggi dalam waktu singkat (Wardana, 2008). Karena pembakaran merupakan salah satu proses konversi energi yang paling sering digunakan, sehingga pembakaran menjadi sebuah perhatian utama dalam usaha penghematan energi. Pada umumnya penghematan energi ditekankan pada pemakaian bahan bakar namun dalam hal ini penghematan energi juga dapat dilakukan dengan meningkatkan efisiensi pembakaran (Tarigan, 2012).

Pembakaran merupakan salah satu jenis dari aliran reaktif di mana terdapat reaktan yaitu bahan bakar dan udara yang dirubah menjadi produk yang memancarkan nyala api. Salah satu jenis pembakaran adalah pembakaran difusi, yaitu proses pembakaran di mana bahan bakar dan pengoksidasi (udara atau oksigen) tidak dicampur secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Proses pembakaran difusi banyak dijumpai dalam sistem pembakaran industri, seperti *boiler* pada pembangkit listrik tenaga uap dan turbin gas. Hal ini dikarenakan pada pembakaran dengan aliran difusi tidak akan menimbulkan bahaya *flash back*. Namun pembakaran difusi memiliki suatu kelemahan yaitu relatif sulitnya untuk memperoleh kondisi campuran yang baik antara bahan bakar dan udara (Rohmat dkk, 2010).

Untuk meningkatkan efisiensi pembakaran atau meningkatkan pencampuran antara bahan bakar dan udara pada pembakaran difusi salah satu cara yang dilakukan yaitu dengan menambahkan *swirl vanes* pada *burner*. *Swirl vanes* merupakan instrumen penghalang atau pengganggu aliran api yang memperbaiki stabilitas api dengan menciptakan aliran turbulen yang akan menghasilkan zona resirkulasi (Liao et. al, 2012). Di mana zona resirkulasi dapat membakar reaktan dan menghadirkan zona kecepatan turbulen. Aliran api akan mengalami gangguan bila gaya-gaya yang bekerja terganggu keseimbangannya. Aliran

yang dihalangi oleh *swirl vanes* akan menyebabkan pusaran yang menyebabkan turbulensi sehingga meningkatkan pencampuran bahan bakar dan udara pada pembakaran difusi.

Penambahan berbagai macam halangan seperti *bluff body*, *fractal grid* dan *swirl vanes* banyak ditemui dikarenakan hasil dari penambahan halangan tersebut dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar. Sebagai contoh, *swirl vanes* merupakan salah satu komponen penting pada ruang bakar mesin-mesin jet. Beberapa penelitian mengenai penambahan *swirl vanes* sebagai pengganggu aliran juga telah dilakukan oleh Handiyana (2005) mengenai pengaruh variasi sudut *swirl vanes* terhadap kestabilan nyala dan distribusi temperatur pada api difusi annulus jet dengan bahan bakar LPG. Dari penelitian tersebut diperoleh kesimpulan bahwa semakin besar sudut *swirl vanes* yang dipasang pada annulus udara mengakibatkan kestabilan nyala api difusi annulus jet semakin meningkat dan temperatur api difusi annulus jet semakin terdistribusi dengan merata ke arah horizontal. Nishimura, et. al (2013) juga melakukan penelitian mengenai pengaruh pengadukan aliran udara oleh *swirl vanes* terhadap karakteristik api pada *double concentric bluff body*. Bahan bakar yang digunakan adalah propana dengan lima variasi sudut *swirl vanes*. Didapatkan kesimpulan bahwa penambahan *swirl vanes* pada *burner* meningkatkan kestabilan api, dan dari hasil visualisasi didapatkan bahwa aliran yang menyebar karena adanya gaya sentrifugal.

Penggunaan *swirl vanes* sebagai pengganggu aliran pada pembakaran dengan memvariasikan kemiringan sudut telah banyak dilakukan sebelumnya. Namun, pada penelitian ini akan dilihat bagaimana pengaruh penambahan jumlah sudu *swirl vanes*. Dapat diketahui bahwa kemiringan sudut telah berpengaruh pada karakteristik api difusi yang dihasilkan. Sehingga pada penelitian kali ini akan lebih dilihat bagaimana pengaruh penambahan halangan dengan memperbanyak jumlah sudu *swirl vanes*.

Pengaruh penambahan sudu *swirl vanes* terhadap visualisasi, distribusi temperatur, dan kontur distribusi temperatur api difusi akan dilihat dengan memvariasikan kecepatan bahan bakar dan udara, selain itu akan digunakan gas inert nitrogen untuk memaksimalkan proses pencampuran bahan bakar dan udara sehingga reaksi pada api difusi tidak dipengaruhi udara sekitar. Bahan bakar yang digunakan pada penelitian ini adalah gas metana dikarenakan potensi gas metana sebagai salah satu bahan bakar alternatif sebagai sumber energi pengganti bahan bakar fosil, dan karakteristik dari gas metana yang mudah bereaksi. Diharapkan dengan adanya penambahan jumlah sudu *swirl vanes* dapat memaksimalkan proses pembakaran sehingga menghasilkan pembakaran yang efisien karena pencampuran udara dan bahan bakar akan semakin baik, selain itu dapat

meminimalkan pembentukan emisi serta mengurangi jelaga yang dapat mengurangi efisiensi pembakaran.

### 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut dapat dirumuskan bagaimana pengaruh jumlah sudu *swirl vanes* terhadap visualisasi dan distribusi temperatur pada nyala api pembakaran difusi gas metana ( $\text{CH}_4$ ) dengan variasi kecepatan bahan bakar dan udara.

### 1.3 Batasan Masalah

Agar permasalahan tersebut lebih spesifik, maka dibuat batasan masalah sebagai berikut:

1. Udara lingkungan sekitar diasumsikan memiliki kelembaban dan temperatur konstan.
2. Tekanan udara lingkungan dianggap konstan 1 atm
3. Kecepatan nitrogen dianggap konstan

### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh jumlah sudu pada *swirl vanes* terhadap transport fenomena pembakaran difusi gas metana ( $\text{CH}_4$ ).

### 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah :

1. Dapat mengetahui visualisasi dan distribusi temperatur dari aliran yang dipengaruhi oleh pemasangan *swirl vanes* dengan jumlah sudu berbeda.
2. Memberikan kontribusi terhadap dunia industri yang berhubungan dengan aerodinamika pembakaran pada pembakaran api difusi.
3. Meningkatkan khasanah ilmu pengetahuan dan teknologi yang berhubungan dengan pemasangan *swirl vanes* pada api difusi sehingga dapat dijadikan referensi untuk penelitian-penelitian selanjutnya.



## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian-penelitian Terdahulu

Handiyana (2005) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi sudut *swirl vanes* terhadap kestabilan nyala dan distribusi temperatur pada api difusi annulus jet. Variasi sudut *swirl vanes* yang digunakan 10, 20, 30, 40, dan 50°. Dari penelitian tersebut diperoleh kesimpulan bahwa semakin besar sudut *swirl vanes* yang dipasang pada anulus udara mengakibatkan kestabilan nyala api difusi annulus jet semakin meningkat dan temperatur api difusi annulus jet semakin terdistribusi dengan merata ke arah horizontal. Daerah kestabilan api difusi terbesar diperoleh pada pemasangan *swirl vanes* 50°. Selain itu fluktuasi temperatur akan semakin berkurang apabila *small eddy* yang mempengaruhi gerakan api, baik pada aliran udara maupun langsung pada gerakan api, sehingga kestabilan api juga semakin meningkat. Hal ini terlihat dengan semakin besar sudut *swirl vanes*, maka fluktuasi temperatur semakin berkurang.

Kunitsugu (2013) melakukan penelitian mengenai pengaruh pengadukan aliran udara oleh *swirl vanes* terhadap karakteristik api pada *double concentric bluff body*. Bahan bakar yang digunakan adalah propane dengan lima variasi sudut *swirl vanes*. Variasi sudut yang digunakan yaitu 0, 22.5, 33.75, 45, dan 60°. Didapatkan kesimpulan bahwa penambahan *swirl vanes* pada *burner* meningkatkan kestabilan api, dan dari hasil visualisasi didapatkan bahwa aliran yang menyebar karena gaya sentrifugal akan meningkatkan kestabilan api, pada penelitian ini juga disarankan untuk menggunakan *swirl vanes number* lebih dari 0.6 untuk mendapatkan resirkulasi yang lebih baik. Rohmat dkk (2011) melakukan penelitian mengenai pengaruh *swirl vanes* pada aliran udara sekunder terhadap api difusi yang terbentuk di aliran sembur *double concentric*. Sudut yang divariasikan pada penelitian ini yaitu 10, 20, dan 30° dengan jumlah sudu lima. Dari penelitian tersebut diteliti visualisasi dan batas kestabilan api yang berhubungan dengan *lift off* dan *blow out*. Dari Penelitian ini disimpulkan bahwa besar sudut *swirl vanes* mempengaruhi luasan api stabil, di mana sudut semakin besar meningkatkan kestabilan api. 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. Yuasa (2002) melakukan penelitian mengenai pengaruh *swirl vanes*

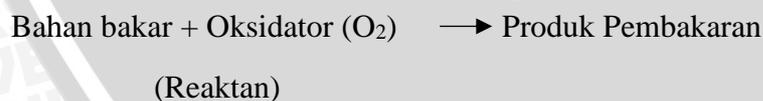
pada stabilitas api jet difusi menggunakan *double swirl burner*. Sudut dari *Swirl vanes* bahan bakar dan udara keduanya divariasikan dan secara terus menerus membawa laju aliran aksial dan tangensial. Variabel dari penelitian ini yaitu kecepatan aliran, injeksi dari bahan bakar hydrogen, intensitas pengadukan pada aliran bahan bakar dan udara. Kesimpulan dari penelitian ini yaitu dengan melakukan pengadukan aliran bahan bakar dan udara menggunakan *swirl vanes* pada arah yang sama akan menghasilkan kestabilan api yang maksimal.

Berbagai penelitian terhadap aliran *swirl* ini telah cukup banyak dilakukan, terutama mengenai pengaruh sudut *swirl* pada aliran pembakaran difusi. Namun pada penelitian ini akan dilihat pengaruh jumlah sudu *swirl vanes* pada visualisasi dan distribusi temperatur aliran pembakaran difusi menggunakan bahan bakar gas metana.

## 2.2 Pembakaran

Pembakaran merupakan sebuah proses merubah energi kimia dari bahan bakar menjadi panas yang akan dilepas ke lingkungan, karena hal ini pembakaran termasuk proses oksidasi eksotermis (Wardana, 2008). Proses pembakaran sendiri dapat berlangsung jika terdapat bahan bakar, pengoksidasi (oksigen/udara), panas atau energi aktivasi. Panas atau energi diperlukan untuk mengaktifkan molekul-molekul bahan bakar dan biasa disebut energi aktivasi. Energi aktivasi mengaktifkan molekul molekul bahan bakar dengan memutus ikatan ikatan bahan bakar menjadi radikal (ion) dan sangat reaktif. Ion ion bahan bakar kemudian bereaksi dengan oksigen membentuk ikatan yang lebih kuat dan kelebihan energi ikatan akan dilepas ke dalam sistem, sehingga menyebabkan kenaikan temperatur yang sangat tinggi.

Persamaan reaksi pembakaran secara umum dituliskan sebagai berikut :

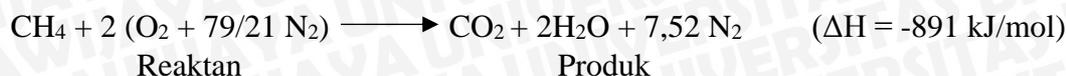


Terdapat dua hal penting yang harus dipenuhi agar proses pembakaran bisa berlangsung yaitu:

1. Keseimbangan Massa
2. Keseimbangan Energi

Keseimbangan masa yang diperlukan tersebut oleh para ahli kimia disebut stoikiometri, dimana semua atom dari pengoksidasi bereaksi secara kimia untuk menjadi berbagai produk. Pengoksidasi yang paling lazim adalah udara, yang untuk berbagai

campuran dari 21 persen oksigen dan 79 persen nitrogen (fraksi mol atau volume), sehingga persamaan kimia dari pembakaran stoikiometrik dari metana (CH<sub>4</sub>) dengan udara adalah



Salah satu karakter pembakaran ditentukan oleh cara reaktan terbakar di dalam zona reaksi. Jika reaktan (bahan bakar dan udara) bercampur sebelum masuk ke zona reaksi maka pembakaran tersebut adalah pembakaran premixed. Apabila reaktan tidak bercampur sebelum terbakar maka pembakaran termasuk jenis pembakaran difusi karena pencampuran bahan bakar dan udara yang berlangsung di zona reaksi adalah akibat difusi molekul. Pada penelitian kali ini jenis pembakaran yang digunakan adalah pembakaran difusi.

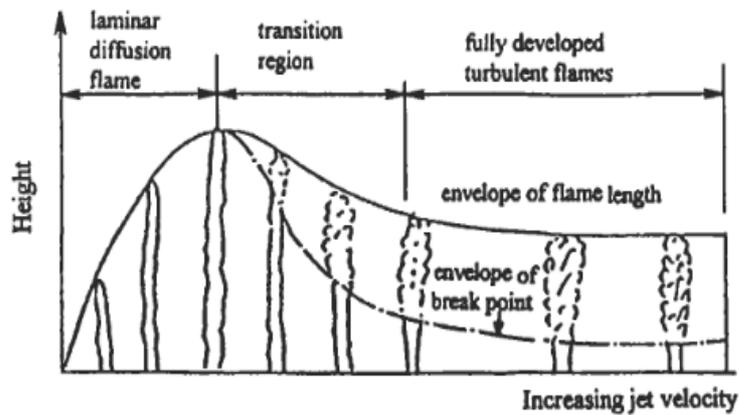
### 2.3 Pembakaran Difusi

Pembakaran Difusi adalah proses pembakaran di mana bahan bakar dan pengoksidasi (udara atau O<sub>2</sub>) tidak dicampur secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Pada pembakaran difusi, api akan muncul pada batas antara daerah bahan bakar dan udara. Produk pembakaran dihasilkan dari api yang menyebar pada kedua sisi, dimana oksigen dan bahan bakar akan berdifusi pada aliran tersebut supaya tercampur. Pemunculan dari nyala akan bergantung pada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar terhadap udara di sekitarnya.

Perhitungan yang dapat digunakan mengenai api dari proses pembakaran difusi adalah dengan melakukan perhitungan pada visualisasi tinggi api. Tinggi api sendiri dapat didefinisikan sebagai suatu jarak aksial nyala api dari mulut tabung pembakar sampai pada suatu titik dimana ujung nyala api tersebut mencapai garis sumbunya.

Semisal pada suatu pembakaran difusi dimulai dari kecepatan aliran yang rendah, tinggi api akan semakin tinggi seiring dengan tingginya kecepatan aliran kemudian mencapai titik maksimumnya, dimana kondisi api laminar, kemudian akan tinggi api akan menurun. Sesaat sebelum tinggi maksimum api tercapai, api akan mulai bergerak pada bagian puncaknya (menjadi turbulen). Hal ini memishkan api difusi laminar dan api transisional. Semakin tinggi kecepatan aliran, getaran api semakin bertambah dan menuju ke arah bawah. Pada kondisi ini api transisi berubah menjadi api turbulen.

Panjang api tersebut berbanding lurus dengan kecepatan pancaran bahan bakar yakni panjang api meningkat dengan peningkatan kecepatan pancaran. Semakin cepat pancaran bahan bakar ujung api mulai tidak stabil. Dan pada daerah transisi terlihat ketidak stabilan api, dimana ketidakstabilan ini disebabkan gaya geser pada batas jet dengan lingkungan. Setelah ketidak stabilan nampak panjang, api difusi kemudian akan memendek sampai api menjadi stabil pada level tetap. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1. Perubahan tinggi api dengan penambahan kecepatan aliran  
Sumber : Mahallawy (2002:262)

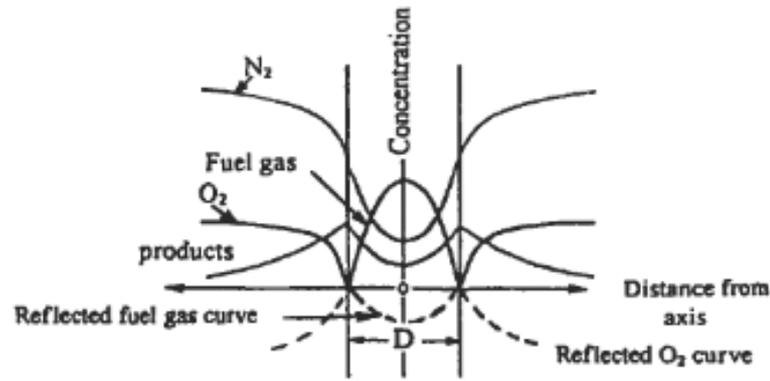
Panjang api saat terjadinya ketidakstabilan ditentukan berdasarkan bilangan *reynolds*. Umumnya bilangan *reynolds* yang dimiliki oleh bahan bakar ketika aliran mulai tidak stabil sebesar 3000. Pada Tabel 2.1 dicantumkan beberapa angka *reynolds* transisi bahan bakar.

Struktur api difusi dapat dilihat pada Gambar 2.2. Konsentrasi dari bahan bakar paling tinggi terdapat pada axis di bagian tengah dan akan menurun sampai nol pada batas api. Konsentrasi dari oksigen paling tinggi terdapat pada dinding dan menurun sampai nol pada batas api.

Tabel 2.1 Angka *reynolds* transisi bahan bakar

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

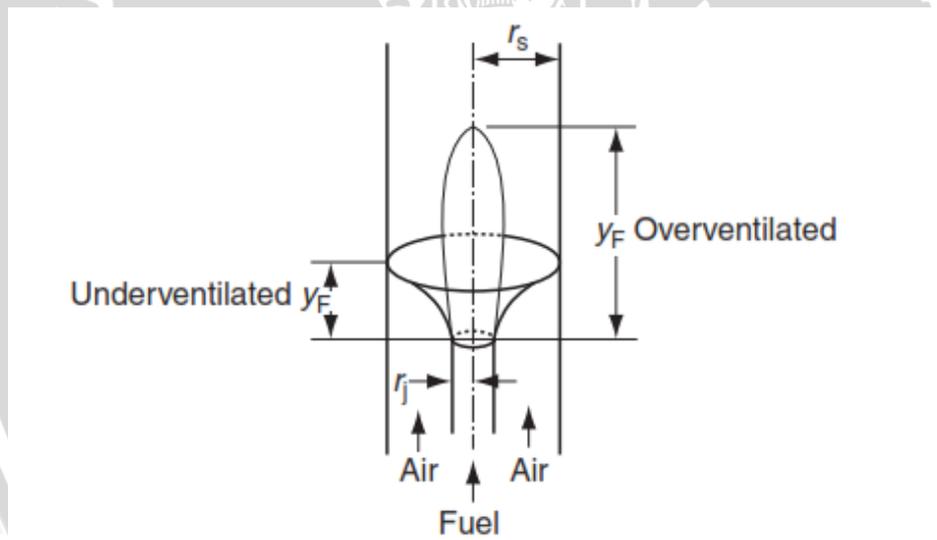
Sumber: Wijayanti (2003)



Gambar 2.2. Potongan daerah aliran api difusi laminar  
 Sumber : Mahallawy (2002:263)

### 2.3.1 Nyala Api Difusi Laminar

Nyala api difusi laminar didapatkan pada laju aliran bahan bakar yang rendah. Dari visualisasi bentuknya dibedakan menjadi dua macam berdasarkan perbandingan diameter nosel pembawa udara.



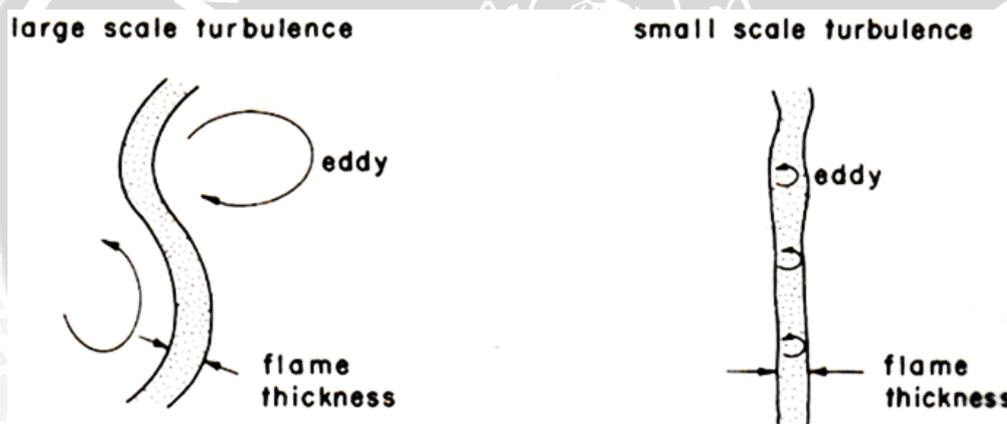
Gambar 2.3. Over ventilated dan under ventilated api difusi  
 Sumber : Glassman (2000:311)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, bahwa semakin besar diameter nosel maka akan terbentuk *overventilated flame* yaitu batas nyala akan konvergen terhadap sumbu dari nosel, karena semakin banyak udara yang digunakan untuk pembakaran yang sempurna. Sebaliknya jika diameter nosel udara terlalu kecil maka akan terbentuk *underventilated flame* yaitu permukaan nyala akan membesar dan menyentuh permukaan dalam nosel pembawa udara, karena tidak dapat mensuplai udara yang cukup untuk pembakaran yang sempurna.

### 2.3.2 Nyala Api Difusi Turbulen

Jika api difusi laminar bahan bakar dan pengoksidasi bercampur karena difusi molekuler, maka pada aliran turbulen pencampuran reaktan disebabkan oleh vortex atau olakan aliran. Kemunculan aliran turbulen pada ujung nyala api akan menyebabkan tinggi nyala berkurang dan meningkatkan laju aliran. Partikel-partikel fluida akan bergerak secara fluktuatif, karena partikel partikel tersebut bergerak pada lintasan yang tidak teratur, sehingga terjadi tumbukan dengan masing-masing partikel fluida.

Kecepatan yang fluktuatif pada aliran turbulen disebabkan oleh tiga hal yaitu kecepatan aliran yang tinggi, gesekan partikel-partikel fluida dan adanya hambatan aliran. Turbulensi akan meningkatkan efisiensi proses perpindahan (kalor dan senyawa reaksi) sebagai hasil dari permukaan nyala (*flame front*). Dengan demikian kecepatan pembakaran pada campuran reaktan semakin tinggi.

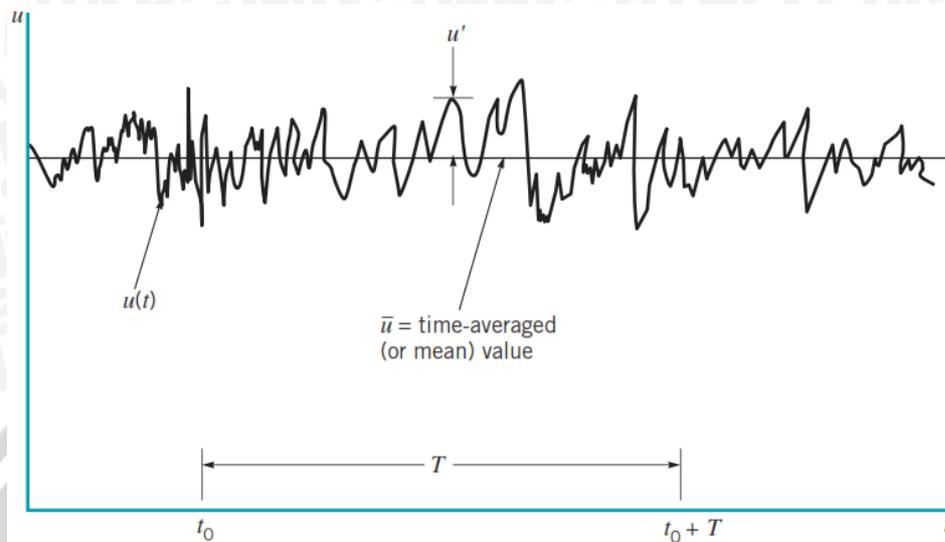


Gambar 2.4. Efek olakan pada aliran turbulen pada permukaan nyala api difusi  
Sumber : Kuo (1986: 418)

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.4, Pada aliran *small eddies* ukuran pusaran terlihat lebih kecil dibandingkan *large eddies*, hal ini akan meningkatkan proses transport massa dalam gelombang pembakaran. Pada *Large eddies* ukuran pusaran lebih besar dibandingkan ketebalan permukaan nyala. *Large eddies* tidak meningkatkan difusivitas seperti yang terjadi pada *small eddies*, namun pada aliran ini akan menyebabkan lipatan pada permukaan nyala. Pergerakan *small eddies* mempengaruhi olakan pada *large eddies*, hal ini akan mempengaruhi olakan pada *large eddies*.

Pada Aliran turbulen terdapat peningkatan proses perpindahan kalor dan massa yang lebih besar dibandingkan dengan aliran laminar. Hal ini dikarenakan terdapat olakan-olakan pada aliran yang disebut dengan fenomena eddies. Olakan-olakan terjadi

karena adanya kecepatan tangensial yang membagi aliran fluida menjadi skala yang lebih kecil.



Gambar 2.5 Hubungan kecepatan aliran turbulen terhadap interval waktu tertentu  
Sumber : Munson (2005 : 27)

Gambar 2.5 menunjukkan grafik hubungan kecepatan aliran turbulen terhadap interval waktu tertentu pada suatu titik. Pada gambar tersebut terdapat 3 macam kecepatan, yaitu  $u(t)$  merupakan kecepatan sesaat aliran di suatu titik pada satu waktu tertentu,  $\bar{u}$  merupakan kecepatan rata rata aliran di suatu titik pada interval waktu tertentu, dan  $u'$  merupakan kecepatan fluktuatif yaitu selisih antara kecepatan sesaat dan kecepatan rata-rata di suatu titik pada waktu tertentu.

#### 2.4 Kestabilan Api

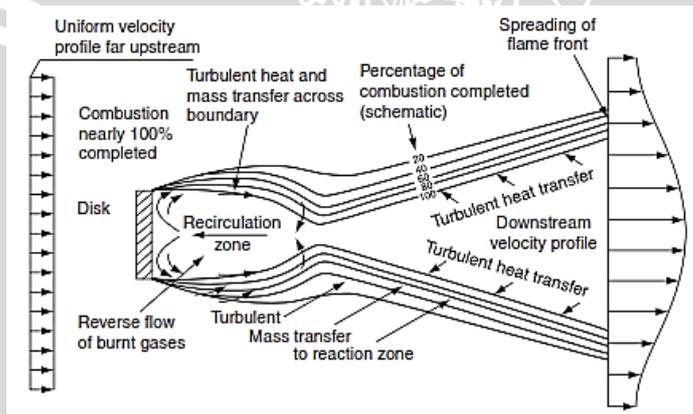
Salah satu karakteristik api difusi adalah kestabilan api. Batas kestabilan api umumnya menjelaskan batas operasional sistem pembakaran yang dinyatakan pada dua kondisi aliran yaitu *lift off* dan *blow out*. Untuk mendapatkan produk pembakaran yang baik maka membutuhkan aliran yang stabil pada suatu burner. Maka dari itu *Burner* harus mampu untuk menstabilkan api hasil pembakaran. Batas kestabilan api merupakan faktor paling penting yang harus dikontrol ketika membuat desain suatu *burner*. *Bunsen burner* tidak dapat menstabilkan api yang turbulen, maka banyak penelitian untuk memperbaiki stabilitas dari *burner* dengan menciptakan resirkulasi.

Batas kestabilan api menjelaskan batas operasional dari sistem pembakaran yang berhubungan dengan kestabilan api difusi yaitu *lift off* dan *blow out*. Apabila kecepatan

reaktan lebih kecil dari kecepatan produk maka api akan bergerak menuju mulut nosel, kejadian ini disebut *flash back*. Jika kecepatan reaktan lebih besar dari kecepatan produk maka api akan bergerak menjauh dari mulut nosel dan kejadian ini disebut *blow out*. Kondisi kritis kestabilan ini sangat bergantung pada konfigurasi aliran. Kemudian bila kecepatan aliran ditingkatkan, aliran akan berada dalam kondisi turbulen. Api akan mengalami *lift off* dari posisi burnernya bila kecepatan produk tinggi. Panjang *lift off*, yaitu jarak antara mulut burner dan pangkal api, akan meningkat seiring dengan penambahan kecepatannya sampai api mengalami *blow out* (padam).

## 2.5 Resirkulasi

Untuk mendapatkan kestabilan api maka diciptakan suatu resirkulasi. Resirkulasi dibagi menjadi dua yaitu *inner recirculation* dan *outer recirculation*. *Inner recirculation* dapat dicapai menggunakan dua metode yaitu secara mekanik atau aerodinamik.



Gambar 2.6. Zona resirkulasi dan daerah pancaran api  
Sumber : Glassman (2002:243)

Pada Gambar 2.6 terlihat zona resirkulasi pada daerah pancaran api. Ketika *bluff body* diletakkan pada mulut *burner*, maka akan terjadi *inner recirculation*. Selain itu *inner recirculation* juga dapat dicapai dengan memasang sudu pada mulut *burner*, hal ini termasuk *inner recirculation* aerodinamik. Semua jenis resirkulasi pada intinya akan menghasilkan aliran gas api kembali pada mulut *burner* untuk membantu menstabilkan pembakaran. Adanya zona resirkulasi dari aliran gas api yang kembali pada mulut burner menyebabkan adanya batas gesekan karena terdapat perbedaan kecepatan. Pada batas gesekan terjadi perpindahan panas dari aliran api yang sudah terbakar menuju aliran bahan bakar, sehingga bahan bakar akan mengalami pemanasan awal. Pemanasan awal

inilah yang dapat menstabilkan api difusi karena energi kinetik dari molekul bahan bakar akan meningkat dan menghasilkan tumbukan yang lebih banyak.

Pada praktiknya kestabilan api dicapai dengan menghasilkan produk hasil pembakaran beresirkulasi. Dengan adanya resirkulasi maka api akan terus menerus memantik campuran bahan bakar.

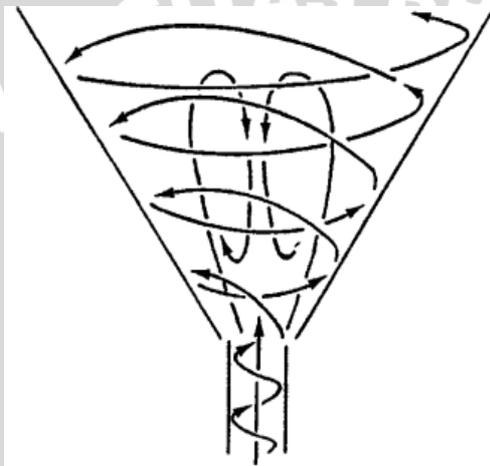
Pada penelitian ini pemasangan *swirl vanes* pada aliran udara akan menghasilkan suatu aliran yang bersirkulasi, sehingga akan berpengaruh terhadap kecepatan udara reaktan. Hal ini akan merubah rambatan gelombang pembakaran stasioner dari laminar menjadi turbulen sehingga bidang kontak antar reaktan menjadi semakin luas, semakin besar aliran yang bersirkulasi maka reaksi yang terjadi antara bahan bakar dan udara juga semakin baik, akibatnya luasan daerah kestabilan api juga semakin bertambah atau bisa dikatakan kestabilan api mengalami peningkatan dan akan mempengaruhi visualisasi dari bahan bakar.

## 2.6 Swirl Vanes

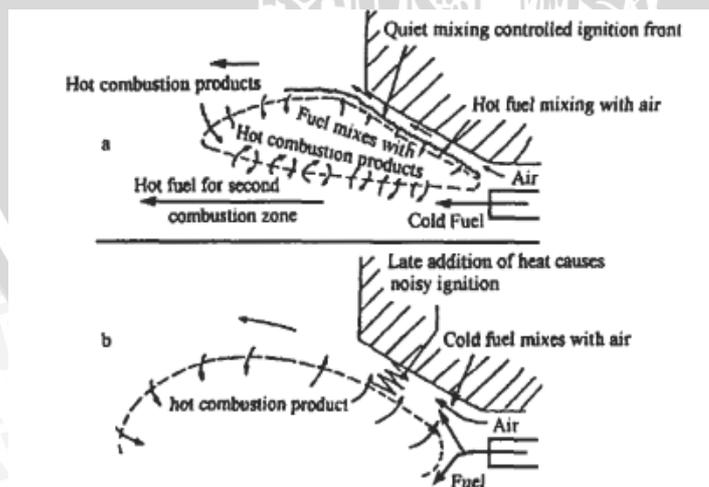
Telah lama diketahui bahwa pemasangan *swirl vanes* pada pembakaran difusi merupakan komponen yang efektif untuk menstabilkan api pembakaran. Di mana pada penelitian ini pemasangan *swirl vanes* akan diletakkan pada saluran udara. Dengan pemasangan *swirl vanes* akan meningkatkan maksimum pembakaran yang memungkinkan tanpa menghilangkan stabilitas dari pemantikan api. Karena *Swirl Vanes* disini berperan sebagai hambatan aliran yang menyebabkan adanya turbulensi dari aliran. Di mana terdapat olakan olakan, di lain sisi *swirl vanes* lebih efektif dibandingkan alat penstabil karena *swirl vanes* juga mampu menghilangkan kandungan gas hasil pembakaran yang tidak berguna.

Seperti telah diketahui sebelumnya bahwa adanya *swirl vanes* sebagai hambatan pada aliran udara akan menyebabkan terjadinya aliran turbulen. Aliran turbulen sendiri terjadi dikarenakan adanya resirkulasi yang terjadi pada produk hasil pembakaran. Karena udara melewati *swirl vanes* maka akan terjadi perbedaan kecepatan udara ketika sebelum dan sesudah melewati *swirl vanes* yang telah dinyatakan dengan persamaan kontinuitas. Sebelum melewati *swirl vanes*, udara memiliki kecepatan normal, kemudian udara akan menabrak *swirl vanes* dan akan mengalami penurunan kecepatan pada *swirl vanes* seiring dengan kenaikan tekanan, dan setelah udara melewati *swirl vanes* maka kecepatannya akan meningkat seiring dengan penurunan tekanan.

Setelah didapatkan kecepatan aliran udara yang lebih cepat dengan tekanan yang lebih rendah, pada aliran bahan bakar terdapat kenaikan tekanan sehingga pada produk api terdapat perbedaan tekanan. Seperti yang telah kita ketahui pada transport fenomena, perbedaan gradien tekanan akan menyebabkan transport fenomena dari tekanan tinggi menuju tekanan rendah, dalam hal ini aliran gas akan kembali ke arah *burner* inlet, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, sehingga, gas yang keluar dari *burner* akan mengalami pemanasan awal yang menyebabkan energi kinetik molekul bergerak menjadi lebih cepat sehingga pemncampuran reaktan menjadi lebih baik dan didapatkan produk pembakaran yang lebih baik.



Gambar 2.7. Aliran resirkulasi yang disebabkan oleh pusaran kuat  
Sumber : Lilley (2011:12)



Gambar 2.8. Campuran bahan bakar, udara, dan hasil pembakaran pada api difusi  
Sumber : Mahallawy (2002:449)

Karena efek dan intensitas pengadukan dan momentum bahan bakar menjadi tinggi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8 *central jet* mendorong aliran dengan

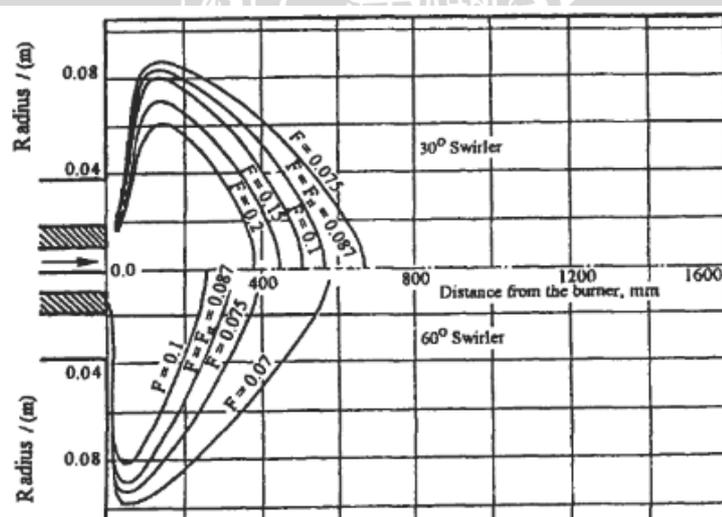
arah yang berlawanan. Perpindahan massa antara central jet dan aliran yang berlawanan terjadi dengan adanya resirkulasi pada central jet dan bercampur kemudian kembali beresirkulasi.

Jadi, bahan bakar panas bercampur dengan udara bahan bakar yang baru dan terbakar dengan perlahan, yang mana dikontrol dengan pencampuran secara perlahan dari bahan bakar dan udara. Dan produk dari hasil pembakaran terbentuk dari aliran yang berkebalikan menuju bahan bakar jet yang mana juga akan panas sebelum bercampur dengan sisa udara pada zona pembakaran

### 2.6.1 Visualisasi Api

Liley (1997) menyatakan bahwa adanya *swirl vanes* akan mempengaruhi visualisasi api dimana tekanan ke arah radial akan menjauhi mulut nosel, sehingga zona resirkulasi akan bergeser dan mendekati mulut nosel sehingga api akan mengalami pemanjangan ke arah radial dan pemendekan ke arah aksial.

El Mahallawy juga melakukan penelitian untuk melihat pengaruh angka swirl terhadap visualisasi api. Seperti yang terlihat pada Gambar 2.9 menunjukkan bahwa *swirl* dengan sudut yang berbeda memberikan visualisasi yang berbeda pula. Dan semakin tinggi angka *swirl* maka akan meningkatkan pemanjangan api ke arah radial dan pemendekan ke arah aksial.



Gambar 2.9. Visualisasi api difusi dengan penambahan *swirl vanes* sudut 30° dan 60°  
Sumber : Mahallawy (449:2002)

Untuk menunjukkan pengaruh aliran *swirl* secara kuantitatif Cheng, et. al (2000) mendefinisikan *swirl number* seperti pada persamaan 2-1. *Swirl number* merupakan

bilangan tak ber dimensi yang menunjukkan perbandingan laju momentum angular dengan laju aksial. Semakin meningkat harga  $S_n$  sampai melebihi 0,6 akan menghasilkan resirkulasi yang lebih baik karena timbul gradien tekanan radial dan aksial yang relatif cukup besar pada *exit nozzle* dari *burner*.

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

Di mana:

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

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

Pada dasarnya karakteristik aliran putar dapat dibedakan menjadi dua berdasarkan bilangan non dimensional *swirl vanes*. Aliran putar lemah memiliki bilangan *swirl*,  $S \leq 0,4$ . Karakteristik aliran putar lemah yaitu komponen kecepatan aksial maksimum dan komponen kecepatan tangensial maksimum berada pada garis sumbu aliran. Lalu yang selanjutnya adalah aliran putar kuat yang memiliki bilangan *swirl*,  $S \geq 0,6$ . *Strong swirl* menyebabkan gradient tekanan aksial dan radial yang cukup untuk membentuk zona resirkulasi yang tidak bisa diamati pada aliran putar yang lemah. Karakteristik aliran *strong swirl* adalah komponen kecepatan aksial maksimum dan komponen kecepatan tangensial maksimum berada di sekitar garis sumbu.

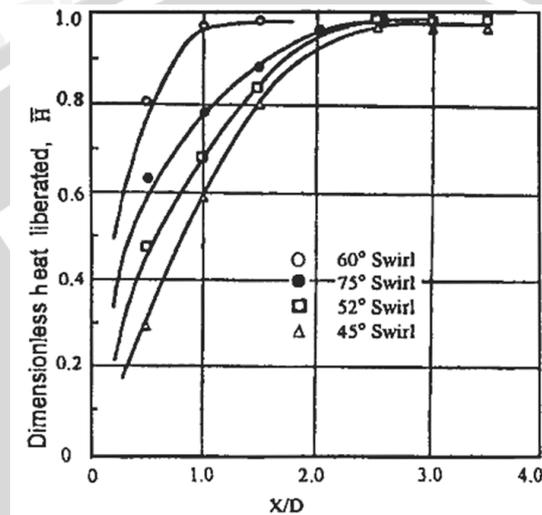
Derajat pada *swirl* yang dipasang pada aliran akan mempengaruhi intensitas pembakaran aliran yang bersirkulasi. Pada penelitian kali ini *swirl vanes* akan menggunakan sudut sebesar  $30^\circ$  untuk tiga variasi *swirl vanes* dengan jumlah sudu berbeda.

### 2.6.2 Distribusi Temperatur

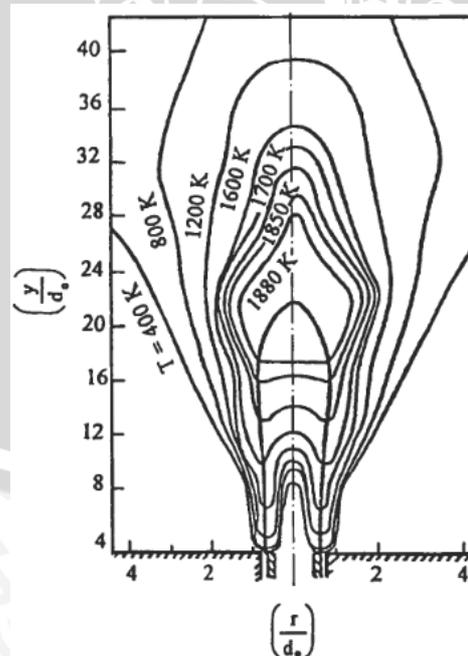
Adanya *swirl vanes* akan meningkatkan kecepatan tangensial aliran, sehingga akan meningkatkan shear flow. Peningkatan shear flow akan meningkatkan intensitas turbulensi namun juga mengurangi kecepatan aksial. Hal ini akan menyeimbangkan kecepatan reaksi dan juga dapat memperbesar kecepatan reaksi.

$$\bar{H}_i = 1 - \exp\left(-2.3 \frac{x_i}{D}\right) \quad (2-2)$$

Gambar 2.10 menunjukkan hubungan bilangan non dimensional antara  $X/D$  dan  $\bar{H}$ . Bilangan non dimensional  $\bar{H}$  sendiri ditentukan berdasarkan persamaan 2-2.  $\bar{H}$  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 2.11 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 temperatur api difusi dengan penambahan *swirl vanes*  
Sumber : Mahallawy (450:2002)



Gambar 2.11. Distribusi Temperatur pada *Burner* dengan diameter  $d_0 = 12.65$  mm dan  $Re = 12130$   
Sumber : Mahallawy (2002:356)

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

## 2.7 Transport Fenomena

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

1. Mekanika Fluida
2. Perpindahan Panas
3. Transfer 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 laminar 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 hal pada fluida yaitu momentum, temperatur, dan massa yang lebih tinggi menuju yang lebih rendah.

Persamaan pada pembakaran pada umumnya dinyatakan dengan persamaan transport fenomena yang menyangkut persamaan kontinuitas, momentum, dan perpindahan panas yang ditunjukkan pada persamaan 2-3, 2-4, dan 2-5. Pada pembakaran difusi terdapat beberapa fenomena transport yang terjadi, yaitu perpindahan massa, energi, dan gerak fluida.

Rumus matematik dari transport fenomena didasarkan pada dua hal yaitu laju perpindahan dari fluida sebanding dengan *driving force* yang diberikan pada suatu fluida serta massa dan energi tidak dapat dimusnahkan. Hukum dari transport fenomena didapatkan pertama didapatkan dari hukum setiap hal pokok pada transport fenomena yaitu:

- Hukum Newton, Mekanika Fluida

$$\mu \frac{du_x}{dx} = \tau \quad (2-3)$$

dimana:

$\mu$  = viskositas fluida

$u_x$  = kecepatan fluida

$\tau$  = tegangan geser fluida

- Hukum Fourier, Perpindahan Panas

$$-kA \left( \frac{dT}{dx} \right) = q \quad (2-4)$$

Dimana:

$k$  = konduktivitas termal

$A$  = luasan daerah perpindahan panas

$T$  = temperatur

$q$  = laju perpindahan panas per waktu

- Hukum Fick, Tranfer Massa

$$-D_{AB} \left( \frac{dc_A}{dz} \right) = J_A \quad (2-5)$$

Dimana:

$D_{AB}$  = difusifitas A ke B

$c_A$  = konsentrasi A

$J_A$  = Flux molar dengan kecepatan molar rata rata

## 2.8 Konservasi Massa dan Energi

Latar belakang dari konservasi massa dan energi dapat diketahui bahwa energi 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. Persamaan 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 ditunjukkan pada persamaan 2-6.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} = 0 \quad (2-6)$$

Persamaan di atas berlaku untuk aliran tunak maupun taktunak, 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 persamaan 2-6 dapat ditulis sebagai berikut:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \bar{\nabla} \cdot \rho \bar{v} = 0 \quad (2-7)$$

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

$$dF = dm \left( \frac{dv}{dt} \right)_{\text{sistem}} \quad (2-8)$$

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

$$\begin{aligned} \rho \frac{dv_x}{dt} &= \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{dv_y}{dt} &= \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \rho \frac{dv_z}{dt} &= \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) \end{aligned} \quad (2-9)$$

Dari penurunan persamaan 2-5 dan 2-7 untuk mendapatkan Persamaan Navier Stokes dari konservasi massa dan energi didapatkan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) + \rho g_x \\ \rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) + \rho g_y \\ \rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right) + \rho g_z \end{aligned} \quad (2-10)$$

Dimana:

$\rho$  = densitas fluida

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

$v$  = vektor kecepatan

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

## 2.9 Pembakaran Gas

Bahan bakar gas merupakan bahan bakar yang paling menguntungkan apabila dibandingkan dengan bahan bakar padat dan cair karena reaksi pembakaran gas yang lebih cepat dikarenakan jarak antar atom fase gas yang lebih besar sehingga pencampuran bahan bakar dan udara menjadi lebih baik. Hal ini menyebabkan pembakaran gas hanya membutuhkan sedikit *handling* dan sistem *burner* nya sangat sederhana dan hampir bebas perawatan. Selain itu, gas sebagai bahan bakar juga ideal karena umumnya bebas dari kandungan gas tidak terbakar atau residu padat. Bahan bakar gas pada umumnya menghasilkan nyala berwarna biru dan sangat mudah terbakar jika tercampur udara pada komposisi yang tepat. Pada Tabel 2.2 disebutkan beberapa sifat dari beberapa macam bahan bakar gas.

Tabel 2.2 : Sifat-sifat bahan bakar gas

Bahan Bakar Gas	Massa Jenis Relatif	Nilai Kalor yang lebih tinggi kkal/Nm <sup>3</sup>	Perbandingan Udara/Bahan Bakar-m <sup>3</sup> udara terhadap m <sup>3</sup> bahan bakar	Suhu Nyala Api °C	Kecepatan Nyala Api m/s
Gas Alam	0.6	9350	10	1954	0.290
Propan	1.52	22200	25	1967	0.460
Butan	1.96	28500	32	1973	0.870

Sumber : Tjokroawidjojo (1986 : 50)

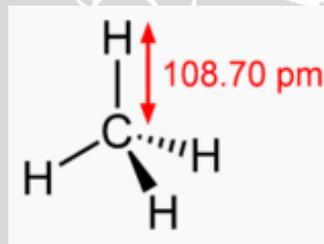
Bahan bakar gas pada umumnya dibagi menjadi dua yaitu gas alam dan gas buatan (*manufactured gas*). Komposisi gas alam sebagian besar terdiri dari metana (CH<sub>4</sub>) dan sebagian kecil etana (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), propan (C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>), butan (C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>), serta pentan (C<sub>5</sub>H<sub>12</sub>). Terkadang pula sulfur, namun jumlahnya dapat diabaikan. Karbondioksida dan Nitrogen merupakan komponen tak terbakar yang sering terdaoat dalam gas alam dalam jumlah yang sangat kecil. Sedangkan Bahan bakar gas buatan (*manufactured Gas*) banyak

dirproduksi melalui proses gasifikasi atau karbonisasi bahan bakar padat (terutama batu bara), dan beberapa proses lainnya. Jenis jenis bahan bakar gas biatan meliputi LPG (*Lifuiified Petroleum Gas*), *refinery oil gas*, *producer gas*, *water gas*, *blast furnace gas*, *wood gass*, *peat gas*, *coal gas*, *oven gas*, dan bio gas.

Proses Pembakaran gas menggunakan bahan bakar gas sendiri seringkali menggunakan peralatan yang disebut gas burner. Aliran pembakarna yang dihasilkan dari alar ini bisa turbulen atau laminar bergantung dari konstruksi alat itu sendiri. Pada Penelitian kali ini *gas burner* akan ditambahkan *Swirl vanes* untuk menstabilkan aliran api.

### 2.10 Pembakaran Gas Metana (CH<sub>4</sub>)

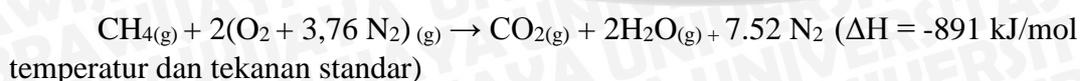
Metana adalah hidrokarbon paling sederhana yang berbentuk gas dengan rumus kimia CH<sub>4</sub>. Metana merupakan gas yang terbentuk oleh adanya ikatan kovalen antara empat atom H dengan satu atom C. Sebagai komponen utama yang paling banyak terkandung pada gas alam, metana juga memiliki sifat yang mudah terbakar sehingga gas metana dimanfaatkan sebagai bahan bakar. Gas metana menghasilkan karbon dioksida yang lebih sedikit atau lebih rendah dibandingkan hidrokarbon lainnya sehingga lebih ramah lingkungan. Pada Gambar 2.12 dapat ditunjukkan struktur kimia gas metana.



Gambar 2.12. Struktur kimia metana

Sumber : *Combustion Fourth Edition* (280: 2002)

Pembakaran satu molekul metana dengan oksigen akan melepaskan satu molekul CO<sub>2</sub> (karbondioksida) dan dua molekul H<sub>2</sub>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. Berikut pada Tabel 2.3 adalah properti kimia dari gas metana.

Tabel 2.3 Properti kimia metana

Rumus Molekul	CH <sub>4</sub>
Wujud	Gas
Warna	Tidak berwana
Massa molar	16.04 kg/mol
Titik Didih	-296.5 °F (-182.5 °C) pada 1 atm
Titik Uap	-258.7 °F (-161.5 °C) pada 1 atm
Massa Jenis	0.7168 kg.m <sup>-3</sup>
Titik Nyala	537 °C
Temperatur Pembakaran	1.952°C (kondisi stoikiometrik pada 25°C)
Nilai Kalor Tinggi (HHV)	9,510 kcal/m <sup>3</sup>
Nilai Kalor Rendah (LHV)	8,570 kcal/m <sup>3</sup>

Sumber: Tjokroawidjojo (1986 : 60)

## 2.11 Nitrogen

Nitrogen adalah salah satu unsur dalam golongan VA pada tabel periodik yang memiliki simbol N. Nitrogen merupakan unsur yang paling banyak terkandung dalam udara bebas dengan kadar 78 %. Nitrogen merupakan gas tanpa warna , tanpa bau, tanpa rasa, dan gas diatomik stabil yang sulit bereaksi dengan unsur atau senyawa lain sehingga nitrogen juga biasa disebut dengan gas inert. Pada Tabel 2.4 dapat dilihat properti kimia dari nitrogen.

Tabel 2.4 Properti kimia nitrogen

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

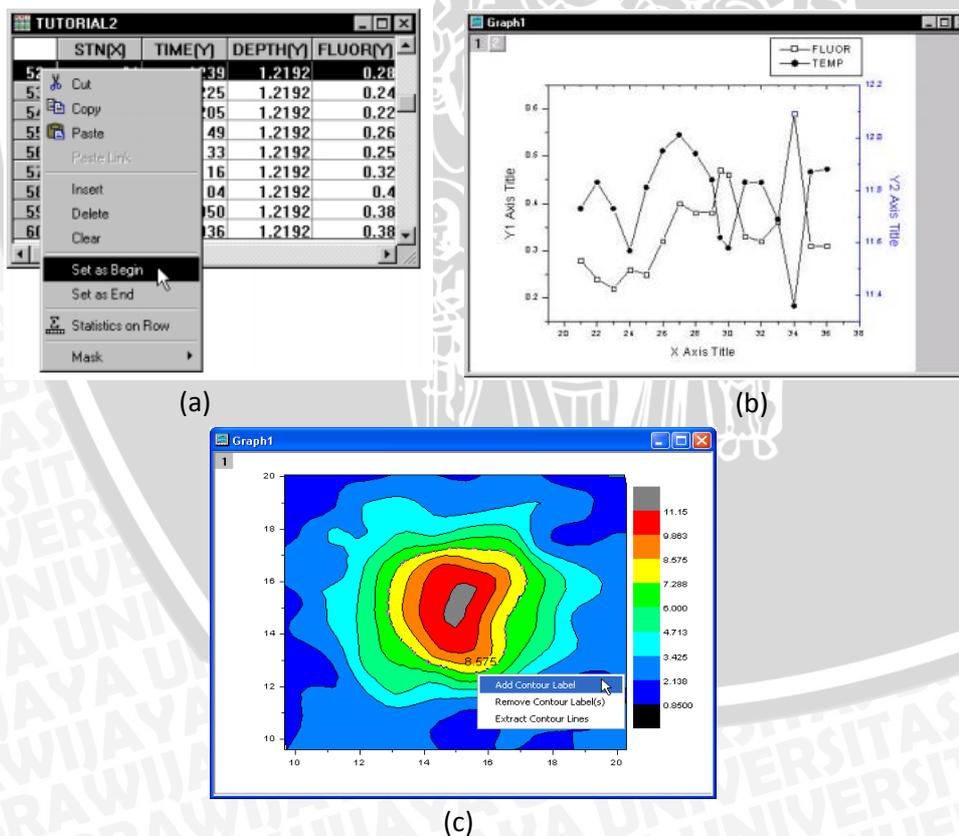
Sumber: Tjokroawidjojo (1986 : 65)

Pada suhu yang rendah yaitu 25°C atau suhu lingkungan, nitrogen sulit beraksi dengan unsur lain kecuali lithium, pada suhu tinggi yaitu di atas 1500°C, nitrogen dapat bereaksi dengan logam alkali dan alkali tanah selain itu juga dengan unsur non logam seperti oksigen dan nitrogen. Pada penelitian ini nitrogen digunakan untuk menjaga reaksi difusi antara bahan bakar dan udara tidak terganggu dari udara di lingkungan.

Penggunaan nitrogen pada penelitian ini dikarenakan ketersediaan gas nitrogen sendiri yang melimpah 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 input data dapat diubah menjadi JPEG, GIF, EPS, TIFF, dll.



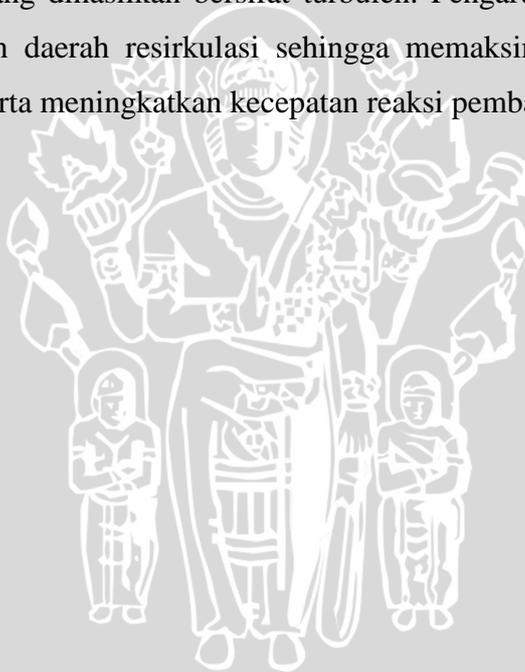
Gambar 2.13 *Plotting range* dari *worksheet excel* menjadi grafik 2D pada *software origin Lab* (a) Tabel *Input Excel* (b) Grafik *Output Excel* menjadi grafik dan (c) Grafik *Output Excel* menjadi Kontur Distribusi

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 2D yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.

### 2.13 Hipotesa

Jumlah sudu *swirl vanes* pada aliran udara dengan kecepatan bahan bakar dan udara tertentu dapat mempengaruhi visualisasi serta distribusi api dari pembakaran difusi gas metana. Jumlah sudu *swirl vanes* akan mempengaruhi visualisasi dan distribusi api dikarenakan aliran api yang dihasilkan bersifat turbulen. Pengaruh jumlah sudu *swirl vanes* akan menimbulkan daerah resirkulasi sehingga memaksimalkan pencampuran bahan bakar dan udara, serta meningkatkan kecepatan reaksi pembakaran.





### BAB III METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini metode penelitian yang digunakan adalah penelitian eksperimental (*true experimental research*), yaitu melakukan pengamatan langsung untuk mengetahui hubungan sebab akibat dengan menggunakan satu atau lebih kelompok perlakuan dan membandingkan hasilnya dengan satu atau lebih kontrol yang digunakan sebagai pembanding. Dalam hal ini akan dilihat bagaimana pengaruh jumlah sudu *swirl vanes* terhadap visualisasi dan distribusi temperatur api pembakaran difusi gas metana ( $\text{CH}_4$ ).

#### 3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di Laboratorium mesin-mesin fluida, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang. Penelitian mulai dilaksanakan pada bulan Juni sampai Juli 2016.

#### 3.2 Variabel Penelitian

Variabel 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:

Ada dua buah variabel yang digunakan dalam penelitian ini yaitu:

##### 1. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang tidak dipengaruhi oleh variabel lain. Besar variabel bebas bisa diubah-ubah atau konstan.

- Variasi jumlah sudut *swirl vanes* : 4, 6 dan 8
- Kecepatan aliran udara (U) : 0.9 m.s<sup>-1</sup>, 1 m.s<sup>-1</sup>, 1.4 m.s<sup>-1</sup>, 1.5 m.s<sup>-1</sup>, 2 m.s<sup>-1</sup>, 2.5 m.s<sup>-1</sup>
- Kecepatan aliran bahan bakar (v) : 1.32 m.s<sup>-1</sup>, 2.65 m.s<sup>-1</sup>, 3.98 m.s<sup>-1</sup>, 5.30 m.s<sup>-1</sup>, 6.63 m.s<sup>-1</sup>, 7.96 m.s<sup>-1</sup>, 9.29 m.s<sup>-1</sup>, 10.61 m.s<sup>-1</sup>, 11.94 m.s<sup>-1</sup>, 13.26 m.s<sup>-1</sup>, 14.59 m.s<sup>-1</sup>, 15.92 m.s<sup>-1</sup>

## 2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Dalam penelitian ini variabel terikatnya adalah visualisasi api dan distribusi temperatur api pembakaran difusi gas metana ( $\text{CH}_4$ ).

## 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 teliti. Variabel yang di kontrol pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Jarak pengambilan temperatur api difusi antar titik pada sumbu x tetap
2. Waktu pengukuran temperatur di tiap-tiap titik api difusi tetap
3. Sudut *swirl vanes*  $30^\circ$  untuk keseluruhan variasi
4. *Swirl vanes* diletakkan pada saluran udara *burner*

### 3.3 Alat dan Bahan Penelitian

Alat – alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

#### 1. *Centrifugal Fan*

*Centrifugal Fan* digunakan untuk mensuplai udara pembakaran, dengan spesifikasi sebagai berikut:

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

#### 2. *Stop Valve*

Digunakan unruk mengatur kapasitas bahan bakar dan udara yang akan digunakan

#### 3. *Flowmeter*

Untuk mengukur besar kecepatan aliran bahan bakar

#### 4. Manometer

Digunakan untuk mengukur beda tekanan udara yang mengalir melalui *orifice* pipa udara

#### 5. *Thermocouple*

*Thermocouple* digunakan untuk mengukur distribusi temperatur pada api difusi, Jenis *thermocouple* yang digunakan adalah *thermocouple* jenis K dengan temperatur maksimum  $1370^\circ\text{C}$

6. Pipa Udara  
Berfungsi sebagai saluran udara pembakaran yang dihasilkan dari *blower*. Pipa udara yang digunakan berdiameter 1 *inch* (2,54 cm)
7. *Swirl Vanes*  
*Swirl vanes* merupakan penghalang yang akan diletakkan pada saluran udara. Sudut *swirl vanes* tetap yaitu 30° dengan jumlah sudu 4,6 dan 8. Bentuk dan dimensi *swirl vanes* terlampir.
8. Pipa saluran udara primer  
Pipa saluran udara primer ini digunakan untuk saluran dari udara sebelum melewati *swirl vanes* dengan ukuran diameter pipa sebesar 1”
9. Pipa saluran udara sekunder  
Pipa saluran udara sekunder ini digunakan untuk saluran campuran nitrogen (N<sub>2</sub>) dan udara dengan ukuran diameter pipa sebesar 2”.
10. 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 memiliki ukuran diameter pipa sebesar 8 mm dan ketebalan pipa 2 mm
11. Tabung gas Metana (CH<sub>4</sub>)  
Tabung gas metana ini digunakan untuk menampung bahan bakar gas metana (CH<sub>4</sub>)
12. Tabung gas Nitrogen (N<sub>2</sub>)  
Tabung gas nitrogen ini digunakan untuk menampung gas Nitrogen (N<sub>2</sub>)
13. 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
14. *Tripod*  
*Tripod* digunakan untuk menempatkan kamera ketika proses pengambilan gambar agar gambar yang dihasilkan oleh kamera lebih fokus dan juga sebagai alat untuk menjaga jarak anatar kamera dengan objek tidak berpinda-pindah.

15. Data *Logger*

Perangkat sensor yang akan menyimpan data temperatur dari *thermocouples* di computer, dengan merubah sinyal analog dari perbedaan tegangan pada *thermocouples* kemudian menjadi sinyal *digital* yang akan terbaca pada perangkat *laptop*. *Data logger* yang dipakai pada penelitian ini menggunakan *advantech*, dengan spesifikasi sebagai berikut :

- a. Merk : *Advantech*
- b. *Channels* : 8
- c. *Input Type* : mV, V, dan MA
- d. *Input Range* : *Thermocouples* type J, K, T, E, R, S, B
- e. *Sampling Rate* : 10 *samples*
- f. *Accuracy* : 0.1 %
- g. *Zero Drift* : 0.3 uV / °C
- h. *Spand Drift* : 25 ppm / °C
- i. CRM @ 50/60 Hz : 92 dB
- j. *Input impedance* : 1.8 M

## 16. Laptop

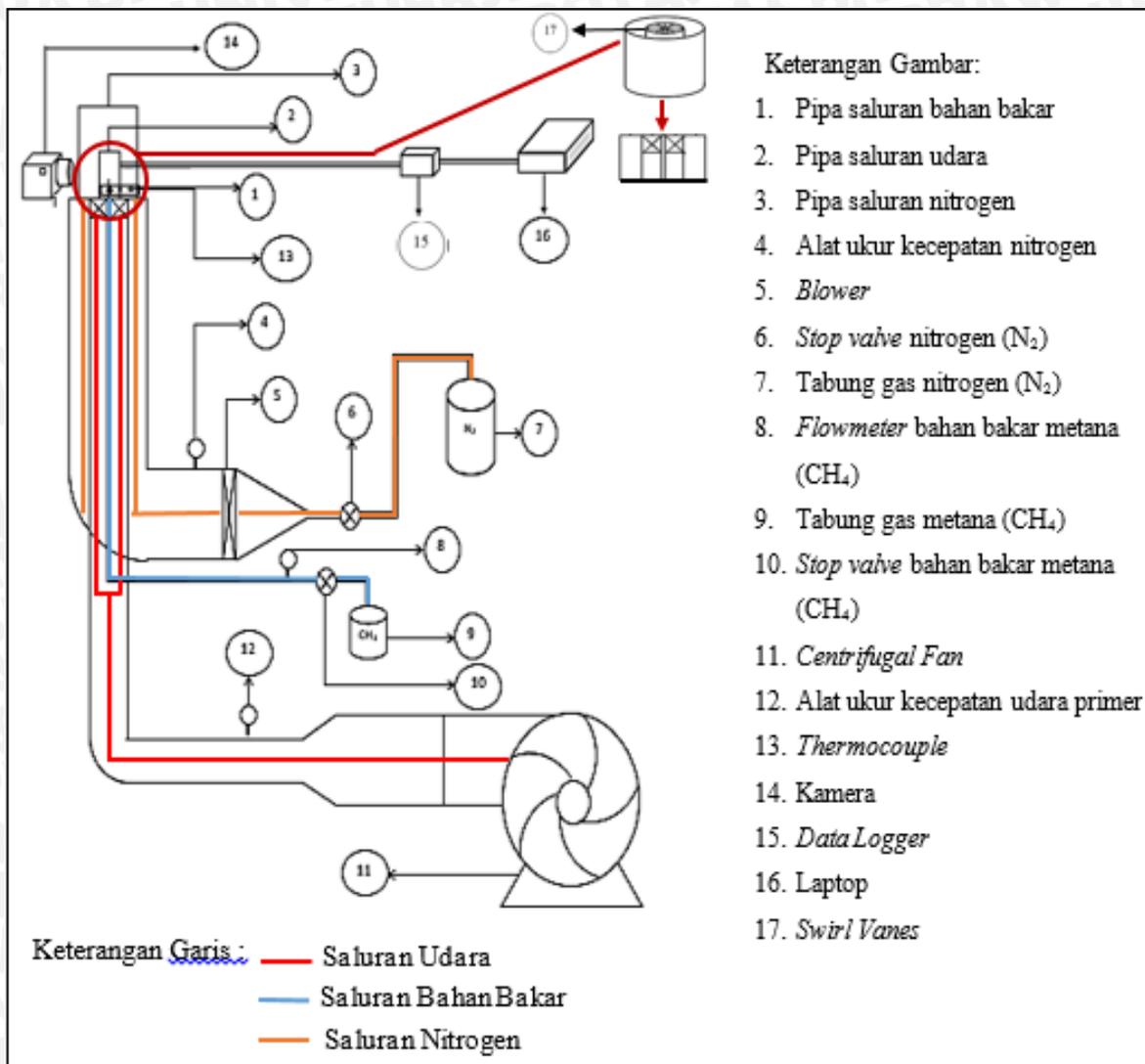
Perangkat yang digunakan untuk melihat data yang tersimpan dari data *Logger*.

17. *Swirl Vanes*

Instrumen penghalang api yang akan diletakkan pada saluran annulus udara. Terdapat tiga variasi *swirl vanes* yaitu jumlah sudu 4, 6 dan 8. (terlampir)

### 3.4 Instalasi Penelitian

Skema susunan alat yang digunakan dalam penelitian ini, sebagai berikut:



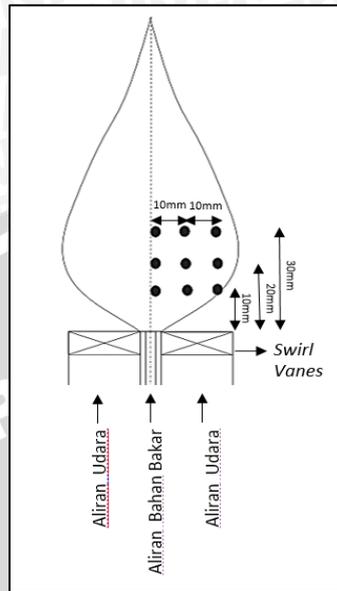
Gambar 3.1 Instalasi penelitian

### 3.5 Prosedur Penelitian

#### 3.5.1 Distribusi Temperatur

Pengambilan data distribusi temperatur dilakukan pada variasi jumlah sudu *swirl*. Setiap variasi *swirl* diambil data dengan variasi kecepatan bahan bakar pada kecepatan udara tertentu. Langkah pertama yaitu memasang *swirl vanes* pada pipa saluran udara. Pemasangan *swirl* dilakukan mulai dari *swirl* dengan jumlah sudu yang paling sedikit yaitu sudu 4, sudu 6 dan sudu 8. Setelah *swirl vanes* terpasang selanjutnya mengatur kecepatan udara dari *centrifugal fan* dengan mengatur bukaan *stop valve* manometer air yang telah terpasang. Kemudian mengatur kecepatan bahan bakar gas metana  $CH_4$  menggunakan *flowmeter*, selanjutnya mengatur kecepatan nitrogen menggunakan *flowmeter*. Pada kondisi yang telah

ditentukan api kemudian dinyalakan. Arah aliran bahan bakar, udara, dan nitrogen dapat ditunjukkan pada beberapa garis dengan warna yang berbeda yang ditunjukkan pada Gambar 3.1.



Gambar 3.2. Titik pengukuran distribusi temperatur pada api difusi

Pengambilan temperatur dilakukan pada setengah bagian dari visualisasi api pada jarak horizontal dan vertikal. Pengambilan data temperatur dilakukan menggunakan *thermocouple* yang telah terhubung dengan *data logger* yang terhubung dengan *laptop*. *Thermocouple* akan diletakkan pada titik titik pengambilan data temperatur seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.2. Pada Jarak horizontal diambil 4 titik pengambilan data temperatur. Mulai dari bagian tengah api difusi yaitu titik 0 kemudian diberi jarak antar titik 1 cm. Maksimal pengambilan data temperatur pada jarak horizontal sejauh 4 cm. Pada jarak vertikal, pengambilan data temperatur disesuaikan dengan ketinggian api. Pada api yang cukup rendah, diambil jarak antar titik 1 cm. Pada api yang tinggi, jarak antar titik diambil sebanyak 5 cm. Maksimal titik pengambilan data pada jarak vertikal sejauh 60 cm. 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. Temperatur yang didapatkan dari *thermocouple* akan menghasilkan beda tegangan yang akan ditangkap oleh *data logger* kemudian diubah menjadi sinyal digital yang bisa terbaca oleh *laptop*. 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

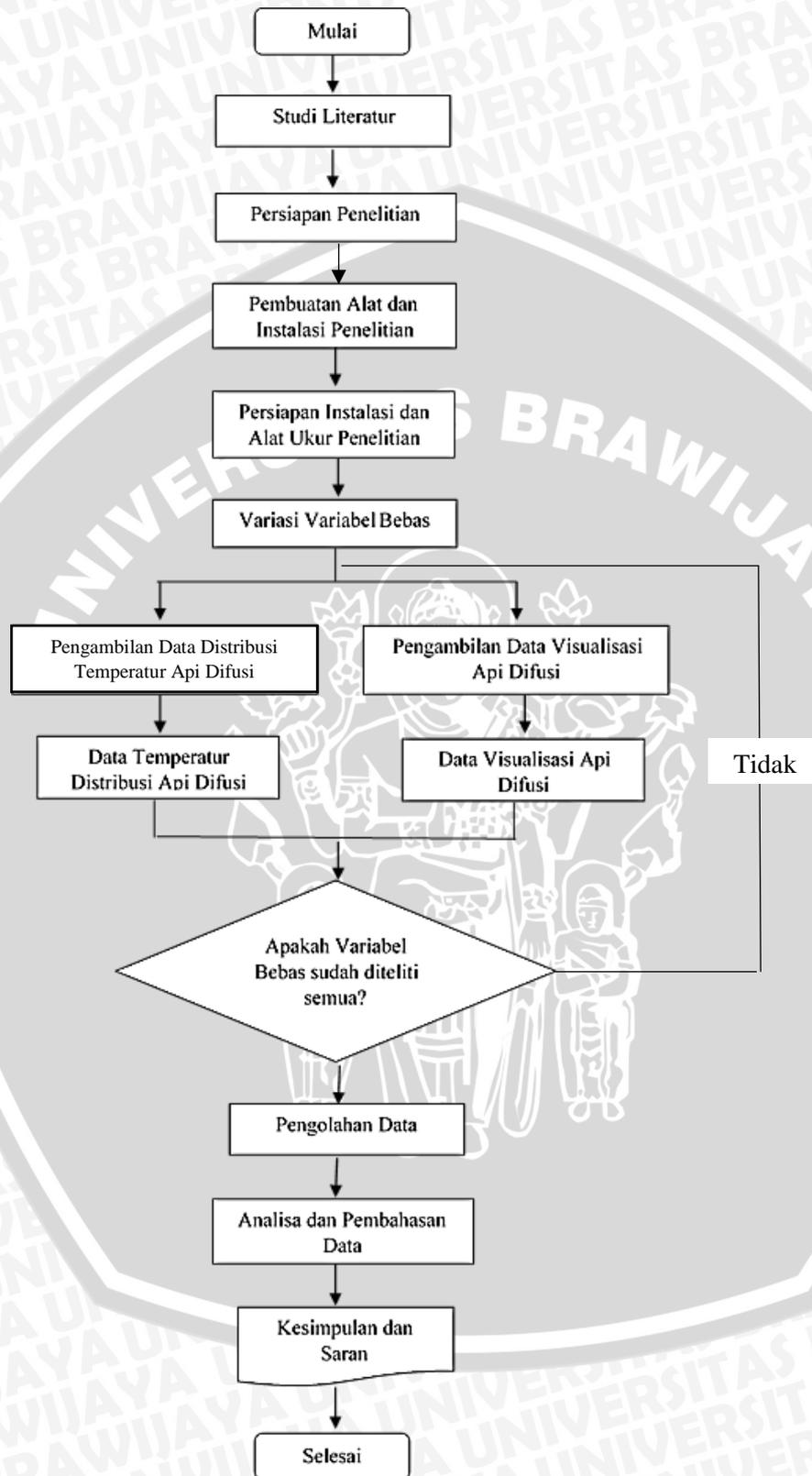
menggunakan *software origin pro 8.0* hingga akhirnya didapatkan 100 data temperatur. Setelah mengetahui distribusi temperatur dari grafik kemudian dilihat bagaimana kontur dari distribusi temperatur pada setiap variasi *swirl vanes* pada kecepatan bahan bakar tertentu dengan melihat warna yang tersebar pada visualisasi api.

### 3.5.2 Visualisasi Api

Pengambilan data visualisasi dilakukan pada variasi jumlah sudu *swirl*. Data pada setiap variasi *swirl* diambil dengan variasi kecepatan bahan bakar pada kecepatan udara tertentu dan variasi kecepatan udara pada kecepatan bahan bakar tertentu. Seperti pada pengambilan data temperatur sebelumnya, langkah pertama yang dilakukan yaitu memasang *swirl vanes* pada pipa saluran udara. Pemasangan *swirl* dilakukan mulai dari *swirl* dengan jumlah sudu yang paling sedikit yaitu sudu 4, sudu 6 dan sudu 8. Setelah *swirl vanes* terpasang selanjutnya mengatur kecepatan udara dari *centrifugal fan* dengan mengatur bukaan *stop valve* manometer air yang telah terpasang. Kemudian mengatur kecepatan bahan bakar gas metana  $\text{CH}_4$  menggunakan *flowmeter*. Selanjutnya mengatur kecepatan nitrogen. Pada kondisi yang telah ditentukan api kemudian dinyalakan. Pengambilan data visualisasi dilakukan menggunakan kamera. Pengambilan gambar visualisasi dilakukan pada kondisi api yang stabil.

Setelah melakukan pengambilan data visualisasi pada variasi kecepatan bahan bakar kemudian dilanjutkan pengambilan data visualisasi pada variasi kecepatan udara. Data visualisasi berupa gambar dan kemudian diolah dan diskala dan disesuaikan dengan penggaris pada sumbu y dan sumbu x.

### 3.6 Diagram Alir Penelitian



## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Penelitian

Setelah pengambilan data penelitian, didapatkan data dari masing masing variasi penelitian yaitu variasi jumlah sudu 4, 6 dan 8 dan kecepatan aliran udara yang diukur dengan manometer melalui *orifice* udara aksial, serta kecepatan aliran bahan bakar yang diukur dengan *flowmeter*. Pada saluran udara dengan prinsip beda tekanan pada penampang saluran akibat melalui *orifice*, maka dapat ditentukan kecepatan aliran udara dengan persamaan *bernoulli*. Selain itu juga diperoleh data temperatur pada api difusi yang diukur menggunakan *thermocouple* yang dihubungkan dengan *data logger*. Temperatur diambil pada beberapa titik secara horizontal dan vertikal. Dari data temperatur api difusi kemudian nilai temperatur dirata-rata sehingga diketahui distribusi temperatur secara horizontal dan vertikal. Pada pengambilan data temperatur di setiap titiknya juga diperoleh data fluktuasi temperatur. Selain pengambilan data temperatur kemudian dilakukan pengambilan data visualisasi menggunakan kamera pada variasi *swirl vanes*, kecepatan bahan bakar, dan kecepatan udara tertentu.

### 4.2 Perhitungan Data

#### a. Perhitungan Kecepatan Udara

Diketahui: $\rho_{ud}$	=	massa jenis udara (1,208 kg/m <sup>3</sup> )
$\rho_{air}$	=	massa jenis air (1000kg/m <sup>3</sup> )
$\Delta h$	=	beda ketinggian pada manometer
$g$	=	percepatan gravitasi bumi = 9,81 m/s <sup>2</sup>
$\beta$	=	rasio diameter <i>orifice</i> dan diameter saluran
$D_{ud}$	=	diameter pipa udara (0,0254 m)
$d_{ud}$	=	diameter dalam <i>orifice</i> udara (0.0127 m)
$A_{ud}$	=	luas pipa udara aksial ( 0,000506451 m <sup>2</sup> )
$C$	=	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)

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

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

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

$$\begin{aligned} \dot{m}_{udara} &= 1,208 \text{ (kg} \cdot \text{m}^{-3}) \cdot 5,067 \times 10^{-4} \text{ (m}^2) \cdot 0,9 \text{ (m/s)} \\ &= 5,21 \times 10^{-4} \text{ kg/s} \end{aligned}$$

Bila udara keluar pada diameter 0,0254 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

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

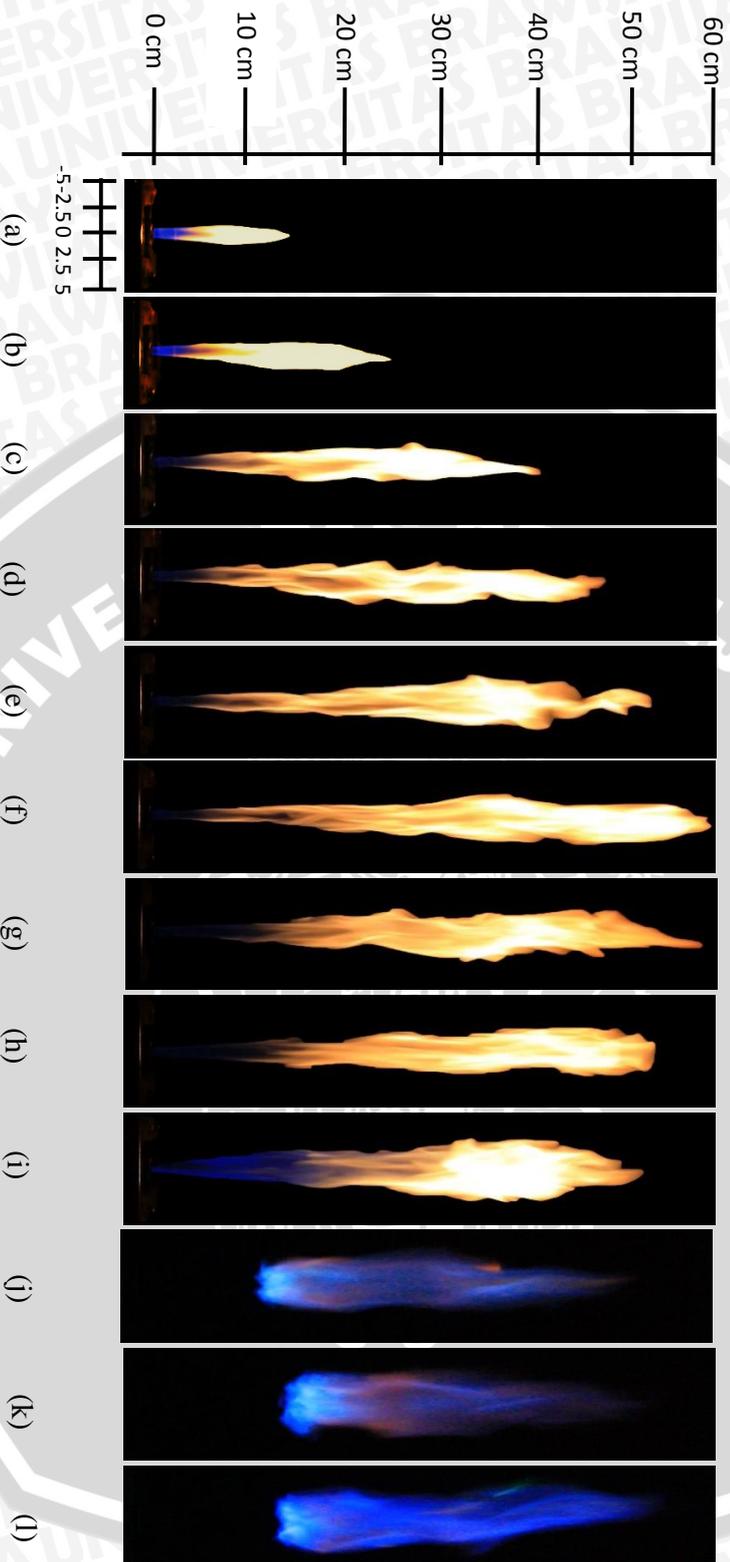
$$Q = A \cdot v$$

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

### 4.3 Pembahasan

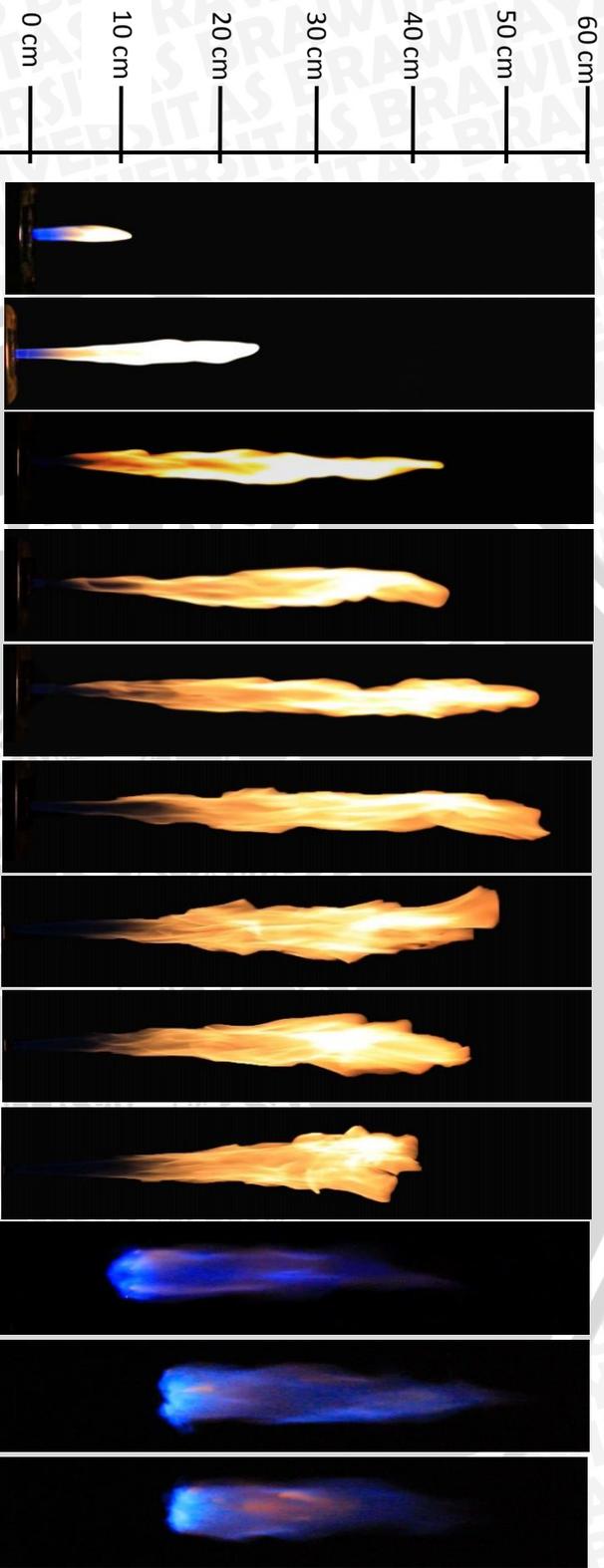
#### 4.3.1 Visualisasi Api Difusi

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



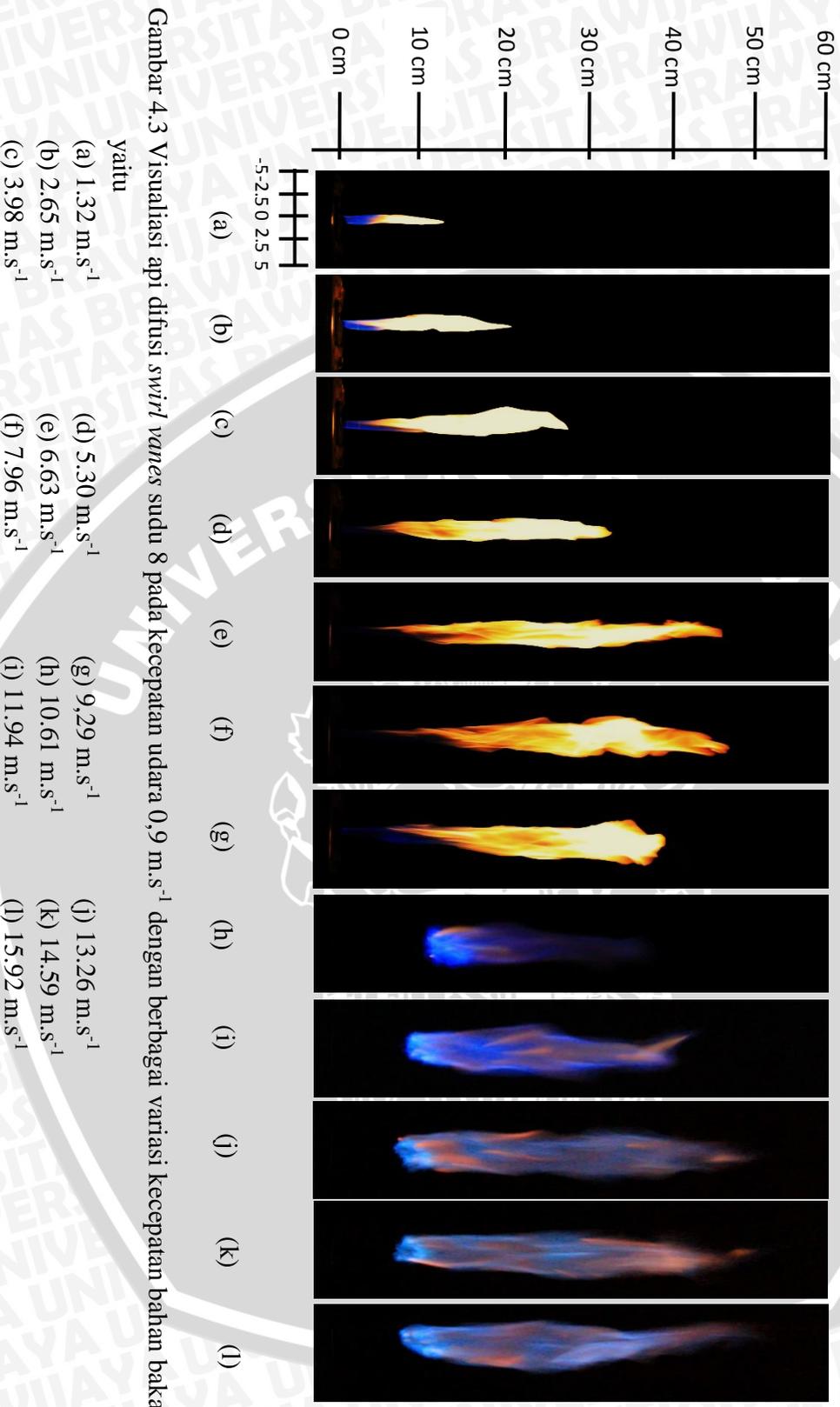
Gambar 4.1 Visualisasi api difusi *swirl vanes* sudu 4 pada kecepatan udara  $0,9 \text{ m.s}^{-1}$  dengan berbagai variasi kecepatan bahan bakar yaitu

- |                             |                             |                              |                              |
|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|------------------------------|
| (a) $1.32 \text{ m.s}^{-1}$ | (d) $5.30 \text{ m.s}^{-1}$ | (g) $9.29 \text{ m.s}^{-1}$  | (j) $13.26 \text{ m.s}^{-1}$ |
| (b) $2.65 \text{ m.s}^{-1}$ | (e) $6.63 \text{ m.s}^{-1}$ | (h) $10.61 \text{ m.s}^{-1}$ | (k) $14.59 \text{ m.s}^{-1}$ |
| (c) $3.98 \text{ m.s}^{-1}$ | (f) $7.96 \text{ m.s}^{-1}$ | (i) $11.94 \text{ m.s}^{-1}$ | (l) $15.92 \text{ m.s}^{-1}$ |



Gambar 4.2 Visualisasi api difusi *swirl vane* sudu 6 pada kecepatan udara 0,9 m.s<sup>-1</sup> dengan berbagai variasi kecepatan bahan bakar yaitu

- |                            |                            |                             |                             |
|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| (a) 1.32 m.s <sup>-1</sup> | (d) 5.30 m.s <sup>-1</sup> | (g) 9.29 m.s <sup>-1</sup>  | (j) 13.26 m.s <sup>-1</sup> |
| (b) 2.65 m.s <sup>-1</sup> | (e) 6.63 m.s <sup>-1</sup> | (h) 10.61 m.s <sup>-1</sup> | (k) 14.59 m.s <sup>-1</sup> |
| (c) 3.98 m.s <sup>-1</sup> | (f) 7.96 m.s <sup>-1</sup> | (i) 11.94 m.s <sup>-1</sup> | (l) 15.92 m.s <sup>-1</sup> |



Gambar 4.1, 4.2, dan 4.3 menunjukkan visualisasi api difusi dari tiga macam variasi jumlah sudu *swirl vanes* dengan kecepatan udara yang sama yaitu  $= 0.9 \text{ m.s}^{-1}$  dan kecepatan bahan bakar yang divariasikan yaitu 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  $\text{m.s}^{-1}$ . Dari keseluruhan gambar di atas dapat dilihat kecenderungan api difusi yaitu semakin bertambahnya kecepatan bahan bakar maka tinggi api akan semakin meningkat dan kemudian menurun. Pada awal penambahan kecepatan bahan bakar api terlihat laminar dimana tidak tampak banyak olakan kemudian semakin tinggi kecepatan bakar ketinggian api semakin bertambah dan mulai muncul olakan olakan pada api dimana api mengalami turbulensi. Hal ini dapat ditunjukkan pada grafik hubungan kecepatan aliran dan ketinggian api, dimana kondisi tersebut terdapat pada daerah transisi yaitu daerah dimana ketidakstabilan pada beberapa bagian api, dan ketidakstabilan akan semakin bertambah seiring dengan penambahan kecepatan bahan bakar kemudian api menjadi turbulen, sehingga ketinggian api semakin memendek.

Selain itu penambahan kecepatan bahan bakar dengan kecepatan udara yang konstan menyebabkan perubahan warna api yang semakin biru. Hal ini disebabkan karena penambahan kecepatan bahan bakar menyebabkan aliran yang semakin turbulen, dari keseluruhan variasi bahan bakar dapat diketahui bahwa kondisi turbulen mulai terjadi pada kecepatan aliran 13.26, 14.59, dan 15.92  $\text{m.s}^{-1}$  dengan besar bilangan reynold berturut-turut yaitu 4243.2, 4668.8, dan 5095.4. Gambar 4.1 dan 4.2 menunjukkan api berwarna biru mulai dari kecepatan 13.26  $\text{m.s}^{-1}$ , hal ini menyebabkan pencampuran bahan bakar yang semakin baik, dimana olakan-olakan yang muncul pada aliran bahan bakar akan memperluas bidang kontak antara bahan bakar dan udara sehingga pencampuran yang terjadi semakin baik dan warna yang dihasilkan api semakin biru. Namun, pada gambar 4.3 api sudah berwarna biru pada kecepatan bahan bakar 10.61  $\text{m.s}^{-1}$ , hal ini dikarenakan pada kondisi transisi api sudah mulai menghasilkan olakan-olakan kecil selain itu penambahan jumlah sudu sebagai halangan pada saluran udara juga mempengaruhi aliran udara dimana aliran menjadi semakin turbulen sehingga proses difusi yang terjadi juga menjadi lebih cepat.

Dari 3 gambar visualisasi di atas dapat terlihat bahwa semakin banyak jumlah sudu *swirl vanes* ketinggian api semakin menurun. Hal ini disebabkan karena adanya hambatan pada saluran udara aksial akan menyebabkan arah udara dibelokkan sehingga menyebabkan adanya turbulensi. *swirl vanes* pada Gambar 4.1 dengan jumlah sudu 4 menunjukkan api mengalami tinggi maksimum yaitu 55cm pada kecepatan bahan bakar 7.96  $\text{m.s}^{-1}$  setelah itu ketinggian api mulai menurun dan pada kecepatan bahan bakar

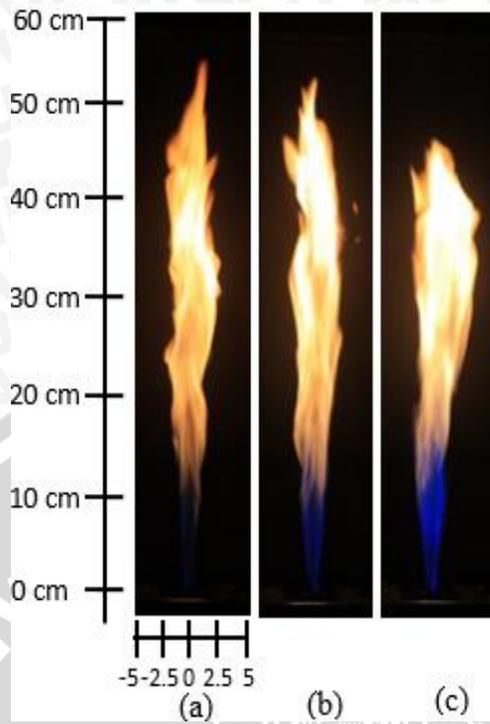
13.26 m.s<sup>-1</sup> api mulai mengalami *lift off* dimana pangkal dari api mulai menjauhi mulut *burner*. Pada gambar 4.2 *swirl vanes* dengan jumlah sudu 6, api mengalami tinggi maksimum 52 cm pada kecepatan bahan bakar 6.63 m.s<sup>-1</sup> kemudian ketinggian api mulai menurun pada kecepatan bahan bakar 9.29 m.s<sup>-1</sup>. Pada gambar 4.3 *swirl vanes* dengan jumlah sudu 8, api memiliki tinggi maksimum 42 cm pada kecepatan bahan bakar 5.3 m.s<sup>-1</sup> kemudian ketinggian api mulai menurun dan api mulai mengalami *lift off* pada kecepatan bahan bakar 10.61 m.s<sup>-1</sup>.

Maka dari ketiga gambar tersebut dapat disimpulkan bahwa *swirl vanes* dengan sudu 8 memiliki intensitas turbulensi yang lebih tinggi dibandingkan *swirl vanes* sudu 4 dan 6 karena pada *swirl vanes* sudu 8 dengan kecepatan bahan bakar yang sama dibandingkan dengan *swirl vanes* sudu 4 dan 6 memiliki tinggi api yang lebih pendek. Hal ini dikarenakan kecepatan pada arah yang dibelokkan oleh sudu *swirl vanes* dari udara yang lebih besar sehingga intensitas turbulensi yang terjadi pada *swirl vanes* sudu 8 terjadi lebih banyak. Kemunculan aliran turbulen pada ujung nyala api akan menyebabkan tinggi nyala berkurang dan meningkatkan laju aliran. Selain itu kecepatan bahan bakar yang semakin tinggi mengakibatkan campuran bahan bakar dan udara yang kurang seimbang.

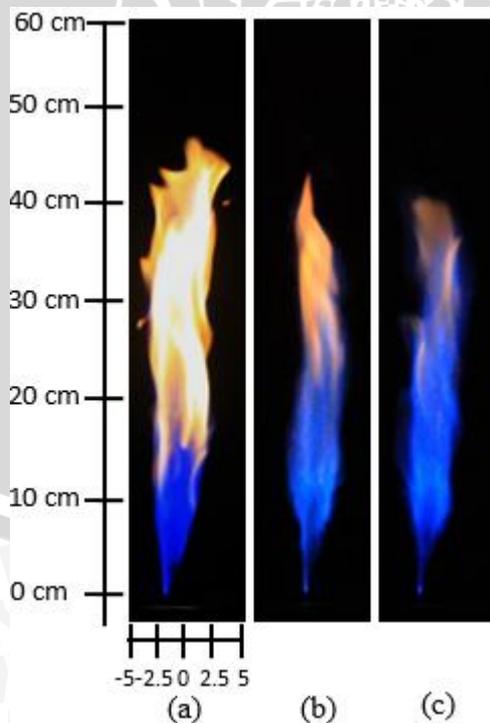
#### 4.3.1.2 Pengaruh Variasi Kecepatan Udara terhadap Visualisasi Api Difusi

Gambar 4.4, 4.5 dan 4.6 menunjukkan visualisasi api difusi dari tiga macam variasi jumlah *swirl vanes* dengan kecepatan bahan bakar yang sama, yaitu 9.28 m.s<sup>-1</sup> dan kecepatan udara yang divariasikan a, b, dan c masing masingnya 0.9 m.s<sup>-1</sup>, 1 m.s<sup>-1</sup>, dan 1.4 m.s<sup>-1</sup>. Secara keseluruhan dari semua gambar di atas dapat dilihat kecenderungan dari ketinggian api yang semakin menurun seiring dengan penambahan kecepatan udara. Hal ini dikarenakan semakin tinggi kecepatan udara maka bahan bakar yang tercampur dengan udara akan semakin banyak sebelum bahan bakar terbawa ke atas, berbanding terbalik dengan kecepatan udara yang rendah terlihat visualisasi ketinggian api yang lebih tinggi.

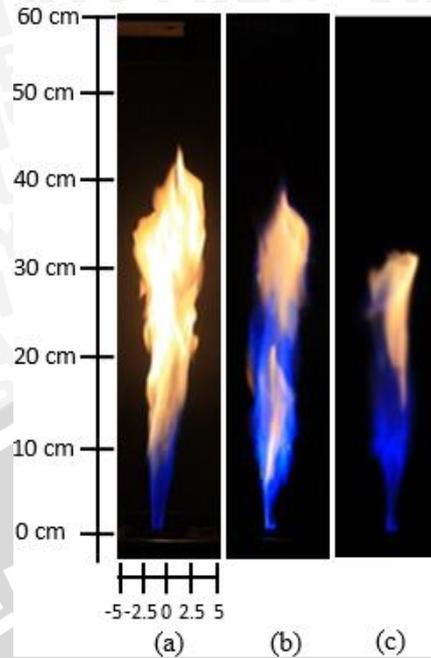
Pada kecepatan udara yang rendah bahan bakar masih belum bercampur dengan udara secara keseluruhan sehingga masih terdapat bahan bakar yang terbawa ke atas karena efek *buoyancy* dimana massa jenis bahan bakar lebih rendah dibandingkan massa jenis udara. Selain itu dengan penambahan kecepatan udara juga dapat dilihat warna dari api yang semakin didominasi warna biru yang menunjukkan pencampuran bahan bakar dan udara semakin baik.



Gambar 4.4 Visualisasi api pada berbagai variasi kecepatan udara dengan kecepatan bahan bakar  $9.28 \text{ m.s}^{-1}$  pada pemasangan *swirl vanes* sudu 4 (a)  $0,9 \text{ m.s}^{-1}$  (b)  $1 \text{ m.s}^{-1}$  (c)  $1.4 \text{ m.s}^{-1}$



Gambar 4.5 Visualisasi api pada berbagai variasi kecepatan udara dengan kecepatan bahan bakar  $9.28 \text{ m.s}^{-1}$  pada pemasangan *swirl vanes* sudu 6 (a)  $0,9 \text{ m.s}^{-1}$  (b)  $1 \text{ m.s}^{-1}$  (c)  $1.4 \text{ m.s}^{-1}$



Gambar 4.6 Visualisasi api pada berbagai variasi kecepatan udara dengan kecepatan bahan bakar  $9.28 \text{ m.s}^{-1}$  pada pemasangan *swirl vanes* sudu 8 (a)  $0,9 \text{ m.s}^{-1}$  (b)  $1 \text{ m.s}^{-1}$  (c)  $0,14 \text{ m.s}^{-1}$

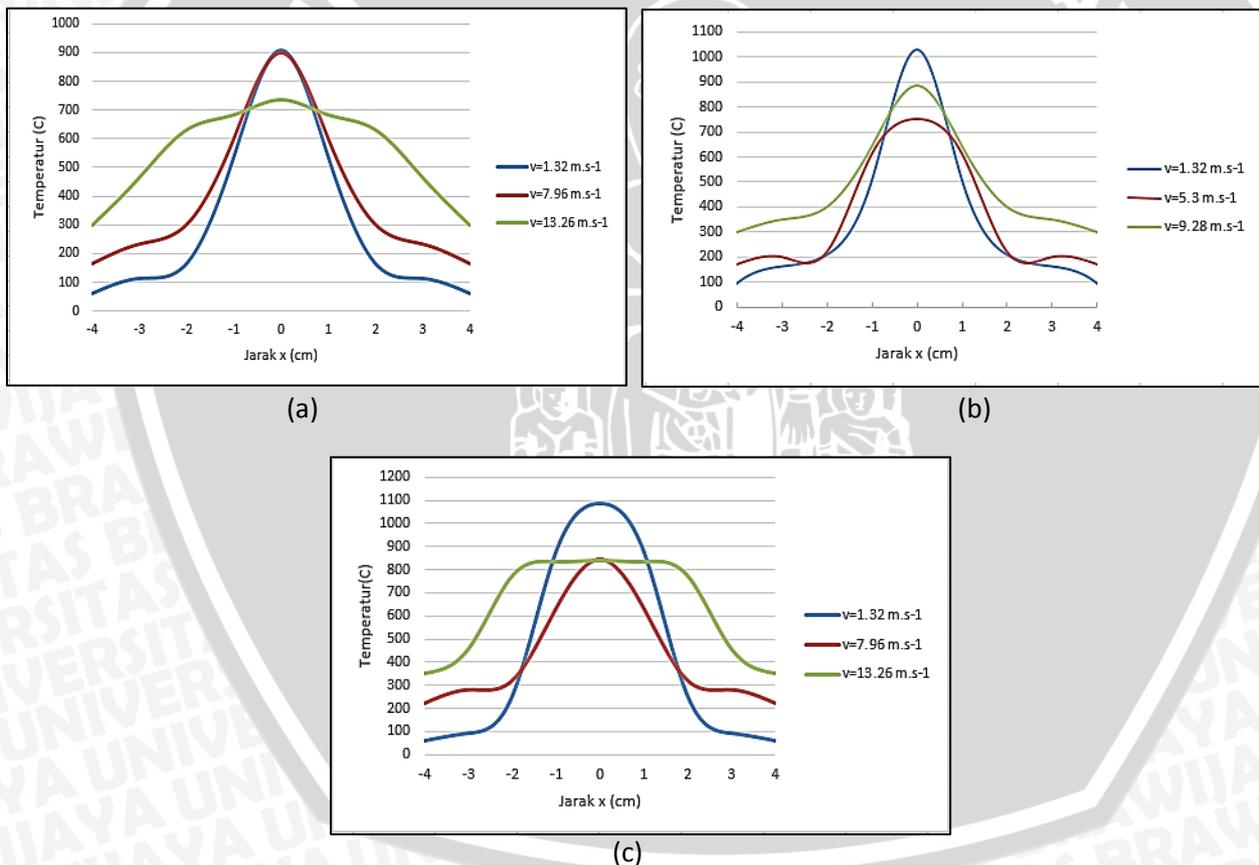
Gambar 4.4, 4.5 dan 4.6 menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah sudu dari *swirl vanes* maka visualisasi dari ketinggian api semakin memendek. Hal ini dikarenakan semakin banyak hambatan pada saluran udara aksial akan menghambat aliran udara secara aksial namun adanya *swirl vanes* akan menambah kecepatan udara pada arah tangensial. Kecepatan udara tangensial ini yang menyebabkan adanya resirkulasi pada api difusi dan menghasilkan campuran antara bahan bakar dan udara yang lebih sempurna karena terciptanya aliran turbulen, sehingga dapat dilihat dari visualisasi api difusi pada gambar 4.6 *swirl vanes* dengan jumlah sudu 8 memiliki warna api yang lebih didominasi warna biru.

Pada awal penambahan kecepatan udara sampai kecepatan udara maksimal pengaruh pemasangan *swirl vanes* dengan jumlah yang berbeda menunjukkan perbedaan visualisasi yang cukup signifikan. Visualisasi yang menunjukkan ketinggian api paling tinggi terdapat pada *swirl vanes* dengan jumlah sudu 4 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.4, hal ini disebabkan karena hambatan pada aliran udara aksial yang tidak terlalu banyak sehingga aliran udara aksial yang mengalir cukup banyak dan bereaksi dengan bahan bakar. Pada visualisasi api difusi menggunakan *swirl vanes* dengan jumlah sudu 6 seperti yang ditunjukkan pada gambar 4.5 mulai menunjukkan penurunan ketinggian. Sama halnya dengan *swirl vanes* dengan sudu 8 hal ini disebabkan karena

kecepatan udara aksial yang dibelokkan oleh sudu *swirl vanes* semakin banyak sehingga aliran menjadi lebih turbulen dengan munculnya olakan olakan yang besar. Pada visualisasi api difusi sudu 8 ketinggian api terdapat pada posisi yang paling rendah. Pada visualisasi api difusi *swirl vanes* sudu 4 warna api masih didominasi warna oranye namun pada visualisasi api difusi *swirl vanes* sudu 6 dan 8 warna api hampir keseluruhan berwarna biru seiring dengan peningkatan kecepatan udara. Penambahan kecepatan udara menyebabkan bahan bakar terbakar sempurna sehingga sehingga hampir tidak ada jelaga yang terbentuk karena bahan bakar telah berdifusi dengan udara secara keseluruhan selain itu adanya *swirl vanes* juga membantu proses difusi antara bahan bakar dan udara.

### 4.3.2 Distribusi Temperatur Api Difusi

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



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Temperatur Rata-rata Sumbu y terhadap Sumbu x Api Difusi pada Variasi *Swirl Vanes* (a) Sudu 4 (b) Sudu 6 (c) Sudu 8 dengan Kecepatan Udara 0.9 m/s

Gambar 4.7 menunjukkan beberapa grafik hubungan temperatur rata-rata pada sumbu y terhadap sumbu x pada beberapa kecepatan bahan bakar. Dapat dilihat pada

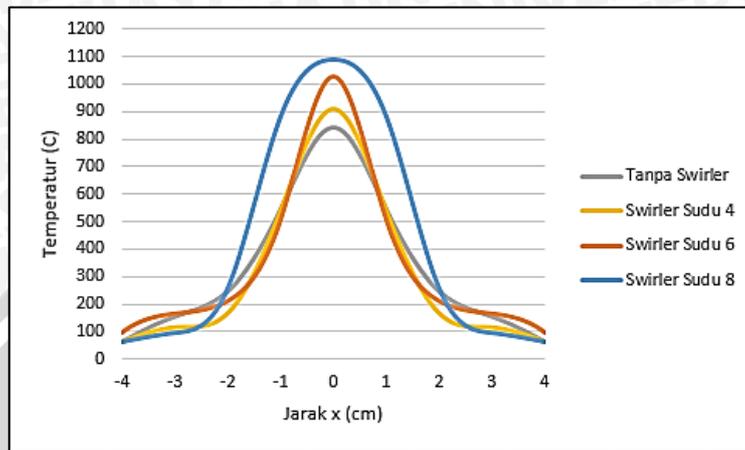
grafik a, b, dan c hampir menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu temperatur rata-rata paling tinggi pada titik 0 terdapat pada kecepatan bahan bakar  $1.32 \text{ m.s}^{-1}$ . Hal ini dikarenakan pada kecepatan bahan bakar yang paling rendah, pangkal api masih menempel pada mulut *burner* sehingga 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 vanes* 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 grafik a,b, dan c juga dapat dilihat bahwa pada titik 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 karena adanya efek *buoyancy*, 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.

Gambar 4.7 menunjukkan bahwa grafik c *swirl vanes* dengan sudu 8 memiliki temperatur rata rata pada sumbu  $y$  yang paling tinggi dibandingkan *swirl vanes* 4 dan 6. Hal ini dikarenakan pada sudu 8 intensitas turbulensi yang terjadi lebih banyak, karena hambatan yang semakin banyak. Semakin banyak turbulensi maka energi kinetik dari molekul bahan bakar dan udara semakin tinggi. Pada aliran turbulen terdapat peningkatan proses perpindahan kalor dan massa dibandingkan dengan aliran laminar. Hal ini dikarenakan terdapat olakan olakan pada alirannya Pengaruh penambahan sudu *swirl vanes* juga mempengaruhi distribusi temperatur pada api difusi dimana pada semakin banyak sudu *swirl vanes* penyebaran temperatur semakin merata karena perbedaan temperatur yang tidak terlalu jauh antar titik 0 dengan titik pada sumbu  $x$  yang menjauhi pusat *burner*. Hal ini terjadi karena bentuk dari api sendiri yang semakin pendek dan

menggemuk karena adanya efek turbulensi yang memperbaiki pencampuran bahan bakar dan udara sehingga distribusi temperatur juga semakin merata.

#### 4.3.2.2. Distribusi Temperatur Api Difusi pada Variasi Jumlah Sudu *Swirl Vanes*



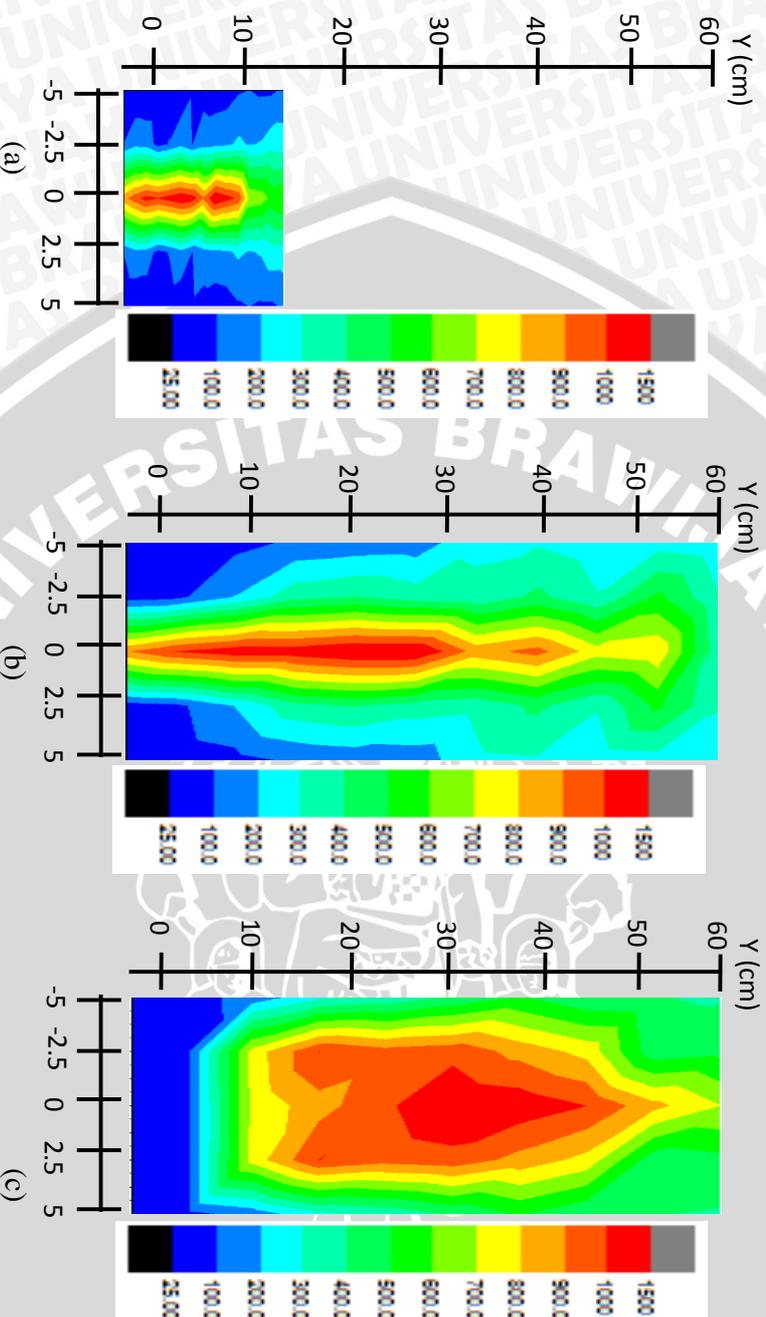
Gambar 4.8 Grafik hubungan temperatur rata-rata sumbu y terhadap sumbu x api difusi pada variasi *swirl vanes* dengan kecepatan bahan bakar 1.32 m/s dan kecepatan udara 0.9 m/s.

Gambar 4.8 menunjukkan bahwa pada kecepatan yang sama distribusi temperatur pada sumbu y yang paling tinggi ditunjukkan pada sudu 8 kedua sudu 6 dan terakhir sudu 4. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan sudu berpengaruh terhadap distribusi temperatur api difusi. Karena penambahan sudu berpengaruh terhadap aliran yang dihasilkan oleh api sehingga secara langsung berhubungan dengan temperatur yang dihasilkan.

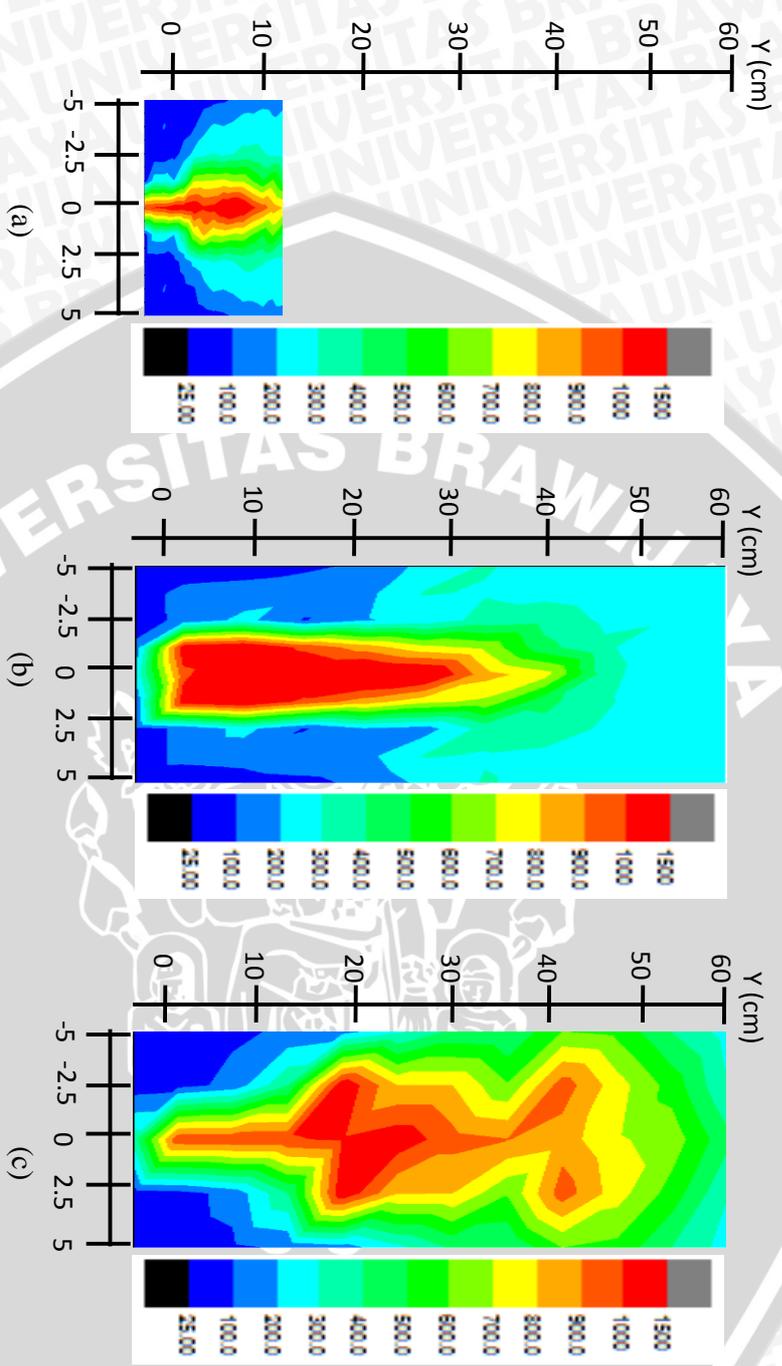
Semakin banyak sudu pada *swirl vanes* maka hambatan semakin banyak dan turbulensi yang terjadi semakin besar sehingga terjadi resirkulasi. Resirkulasi berpengaruh pada pencampuran bahan bakar dan udara. Ketika bahan bakar dan udara telah bercampur dengan udara maka campuran tersebut akan kembali ke mulut *burner* untuk memanaskan 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. Hal ini yang menyebabkan *swirl vanes* sudu 8 memiliki temperatur yang tertinggi.

Selain temperatur yang semakin tinggi, semakin banyak jumlah sudu menyebabkan distribusi temperatur di keseluruhan api lebih merata, dimana tidak terlalu banyak perbedaan temperatur pada jarak 0 cm sampai 4 cm. Hal ini disebabkan karena turbulensi yang terjadi lebih besar semakin bertambahnya sudu *swirl vanes*.

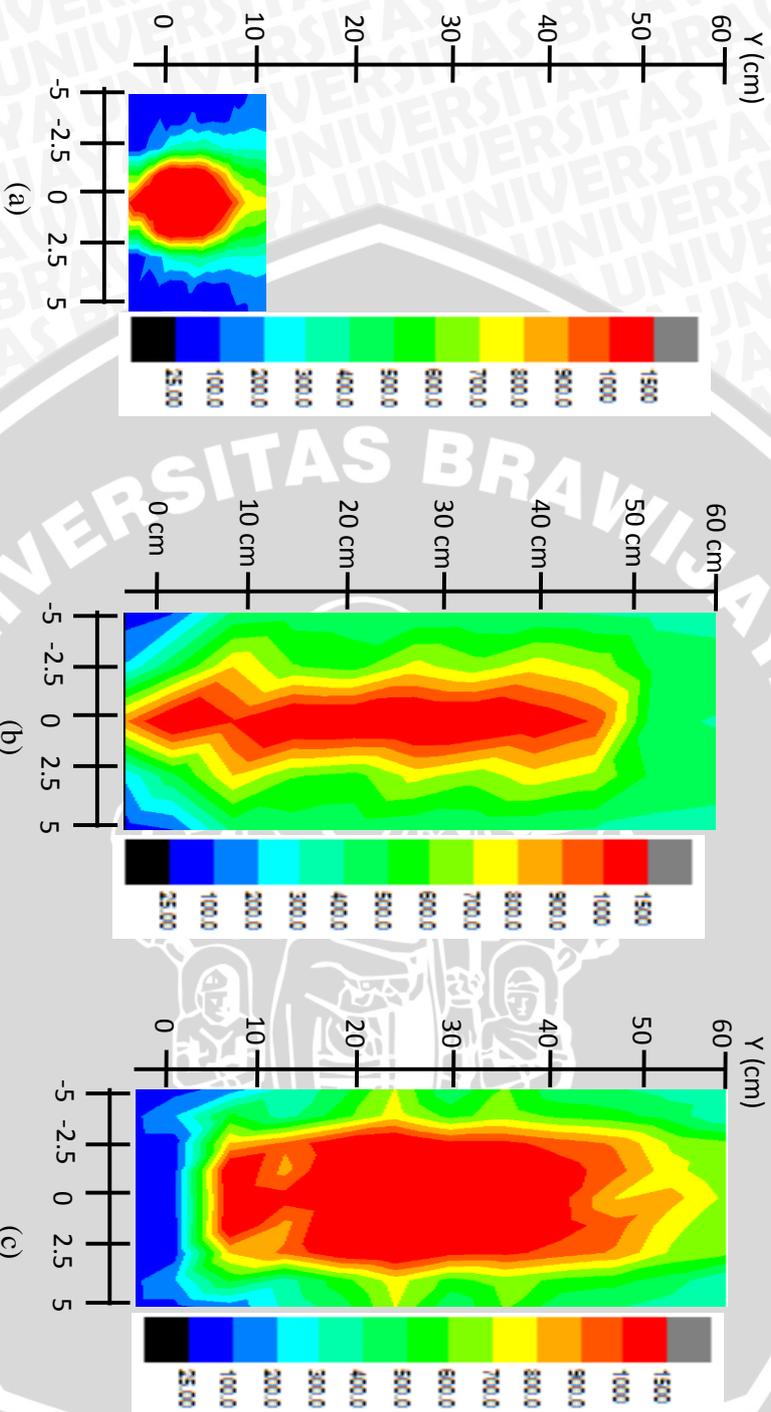
### 4.3.2.3 Pengaruh Variasi Kecepatan Bahan Bakar terhadap Kontur Distribusi Temperatur



Gambar 4.9 Distribusi temperatur *swirl vanes* sudu 4 pada kecepatan udara  $0,9 \text{ m.s}^{-1}$  dengan variasi kecepatan bahan bakar (a)  $1,32 \text{ m.s}^{-1}$  (b)  $7,96 \text{ m.s}^{-1}$  (c)  $13,26 \text{ m.s}^{-1}$  menggunakan *software origin*



Gambar 4.10 Distribusi temperatur *swirl vanes* sudu 6 pada kecepatan udara 0,9 m.s<sup>-1</sup> dengan variasi kecepatan bahan bakar (a) 1,32 m.s<sup>-1</sup> (b) 5,3 m.s<sup>-1</sup> (c) 9,28 m.s<sup>-1</sup> menggunakan *software origin*



Gambar 4.11 Distribusi temperatur *swirl vane* sudu 8 pada kecepatan udara  $0,9 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  dengan variasi kecepatan bahan bakar (a)  $1,32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (b)  $7,96 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (c)  $13,26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  menggunakan *software origin*

Gambar 4.9, 4.10 dan 4.11 menunjukkan kontur distribusi temperatur dari variasi jumlah sudu *swirl vanes* 4, 6 dan 8 pada kecepatan bahan bakar tertentu. 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.

Pemasangan *swirl vanes* sangat berpengaruh pada distribusi temperatur api difusi, pada gambar 4.9 pemasangan *swirl vanes* sudu 4 dengan kecepatan bahan bakar  $1.32 \text{ m.s}^{-1}$ , temperatur api paling tinggi terdapat pada arah aksial dari saluran bahan bakar saja. Kemudian pada gambar 4.10 pemasangan *swirl vanes* sudu 6 dengan kecepatan bahan bakar yang sama, terlihat bahwa temperatur mulai tersebar tidak hanya pada arah aksial saja. Pada gambar 4.11 pemasangan *swirl vanes* sudu 8 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 vanes* sudu 8 tidak menunjukkan perbedaan warna yang terlalu banyak sehingga hal ini juga menunjukkan bahwa temperatur pada *swirl vanes* sudu 8 terdistribusi secara merata dibandingkan *swirl vanes* sudu 4 dan 6. Hal ini terjadi dikarenakan semakin banyak jumlah sudu maka hambatan pada saluran udara aksial semakin banyak dan akhirnya membelokkan arah udara, sehingga pencampuran antara bahan bakar dan udara menjadi lebih baik dan meningkatkan temperatur yang dilepaskan oleh api difusi.

## BAB V PENUTUP

### 5.1 Kesimpulan

Variasi jumlah sudu *swirl vanes* mempengaruhi visualisasi api difusi. *Swirl vanes* dengan visualisasi tinggi api berurutan dari tertinggi sampai terendah adalah sudu 4, 6 dan 8. Semakin banyak jumlah sudu *swirl vanes* maka menghasilkan visualisasi tinggi api yang semakin rendah. Penambahan kecepatan bahan bakar pada kecepatan udara yang tetap pada penggunaan semua jenis *swirl vanes* menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu semakin banyak kecepatan bahan bakar maka tinggi api semakin bertambah sampai tinggi maksimum kemudian tinggi api berkurang. Penambahan Kecepatan udara pada kecepatan bahan bakar yang tetap pada penggunaan semua jenis *swirl vanes* menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu semakin banyak kecepatan udara maka tinggi api semakin berkurang.

Variasi jumlah sudu *swirl vanes* mempengaruhi distribusi temperatur api difusi. Semakin banyak jumlah sudu *swirl vanes* temperatur yang terdistribusi semakin merata selain itu temperatur api difusi juga semakin meningkat. *Swirl vanes* dengan distribusi temperatur yang paling merata dan temperatur yang tinggi berurutan adalah sudu 8, 6, dan 4. Penambahan kecepatan bahan bakar pada kecepatan udara yang tetap pada penggunaan semua jenis *swirl vanes* menunjukkan kecenderungan yang sama yaitu, semakin banyak bahan bakar maka temperatur yang terdistribusi semakin merata.

### 5.2 Saran

1. Penelitian pengaruh jumlah sudu *swirl vanes* pada visualisasi dan distribusi temperatur pada bahan bakar metana lebih baik divariasikan dengan jenis bahan bakar yang lain.
2. Dilakukan penelitian lebih lanjut pada variabel terikat yang lain selain visualisasi dan distribusi temperatur yaitu efisiensi pembakaran.
3. Dilakukan penelitian lebih lanjut pada kestabilan api difusi akibat penambahan jumlah sudu

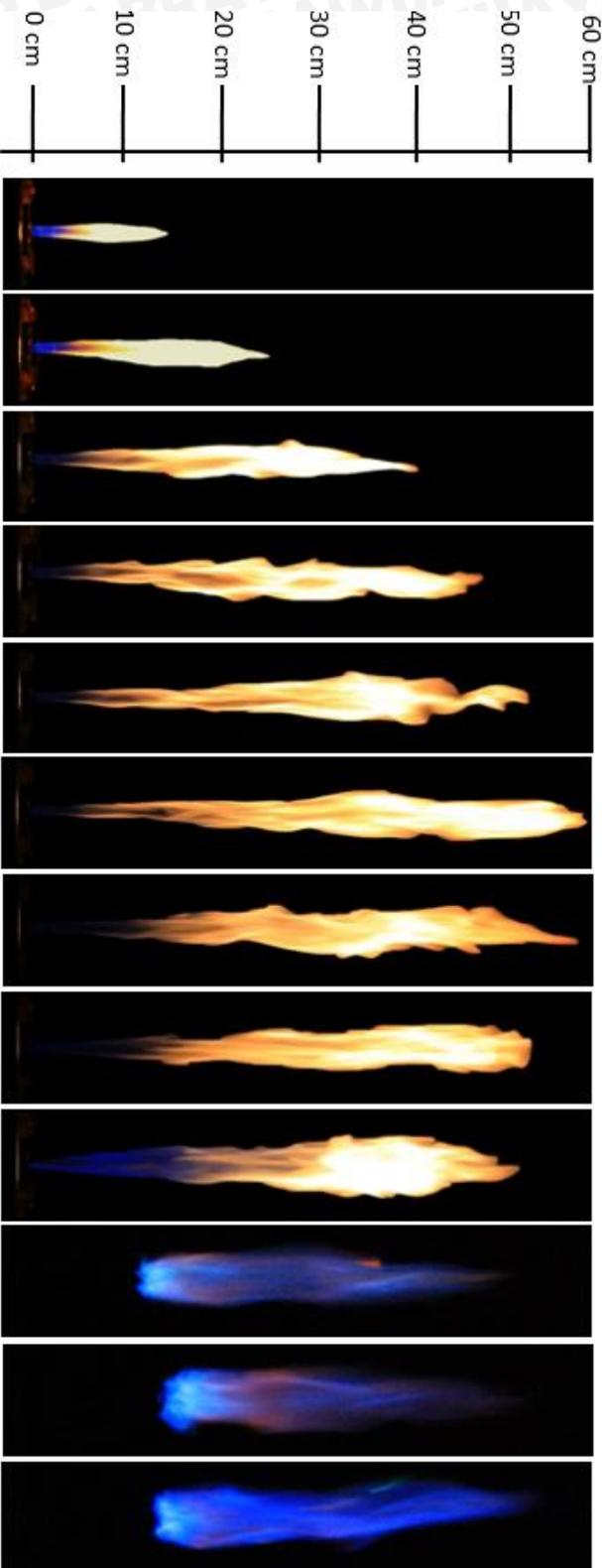


## DAFTAR PUSTAKA

- El-Mahallawy, Fawzy., El-Din Habik, Saad, 2002. *Fundamentals And Technology Of Combustion*, United Kingdom: Elsevier
- Glassman, Irvin & Yetter A. Richard. 2008. *Combustion Fourth Edition*. USA: Academic Press.
- Handiyana, Endra. 2005. Pengaruh Variasi Sudut *Swirling Vanes* Terhadap Kestabilan Nyala dan Distribusi Temperatur Api Difusi, *Skripsi*. Tidak Dipublikasikan, Malang: Universitas Brawijaya.
- Inc, Microcal Software, 1999. *Tutorial Manual Version 6*. USA : One Roundhouse Plaza
- Kuo, Kenneth K, 1986. *Principles of Combustion*, New York : John Wiley & Sons, Inc
- Lilley, D.G., 2011. *Swirling Flows and Lateral Jet Injection for Improved Mixing and Combustion*. 49<sup>th</sup> AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Oklahoma State University
- Munson R. Bruce., Young F. Donald., Okiishi H. Theodore. *Fluid Mechanics*, Jilid 1. Cetakan 4. Terjemahan Dr. Ir. Harinaldi & Ir. Budiarmo , M.Eng. Depok: Universitas Indonesia
- Nisihimura, Tatsuo., Kunitsugu Koji., Ooe Genryu., Tanoue Ichiro-Ken., 2013. *Study on Change in the Behavior of Flame on Bluff Body under Transitional Regime by Swirled Air Flow*, Yamaguchi, Dept of Mechanical Engineering Yamaguchi 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
- S. Yuasa., 2002. *Combust Flame*.United Kingdom: Elsevier
- Tarigan, P. 2012. Visualisasi Kecepatan Tinggi Nyala Api Dalam Zona Resirkulasi pada Ruang Bakar *Backward-Facing Step*. *Skripsi*, Depok: Universitas Indonesia
- Tjokroawidjojo, Soetiari., 1986, *Bahan Bakar dan Proses-Proses Kimia Pembakaran*. Malang: Universitas Brawijaya
- Wardana, I. N. G. 2008, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Malang.
- Y.-H. Liao. 2012. Flame Structure and Emissions of Strongly-Pulsed Turbulent Diffusion Flames with Swirl, *Dissertation*, Washington: University of Washington

JUMLAH SUDU 4 30° (VARIASI DEBIT BAHAN BAKAR)

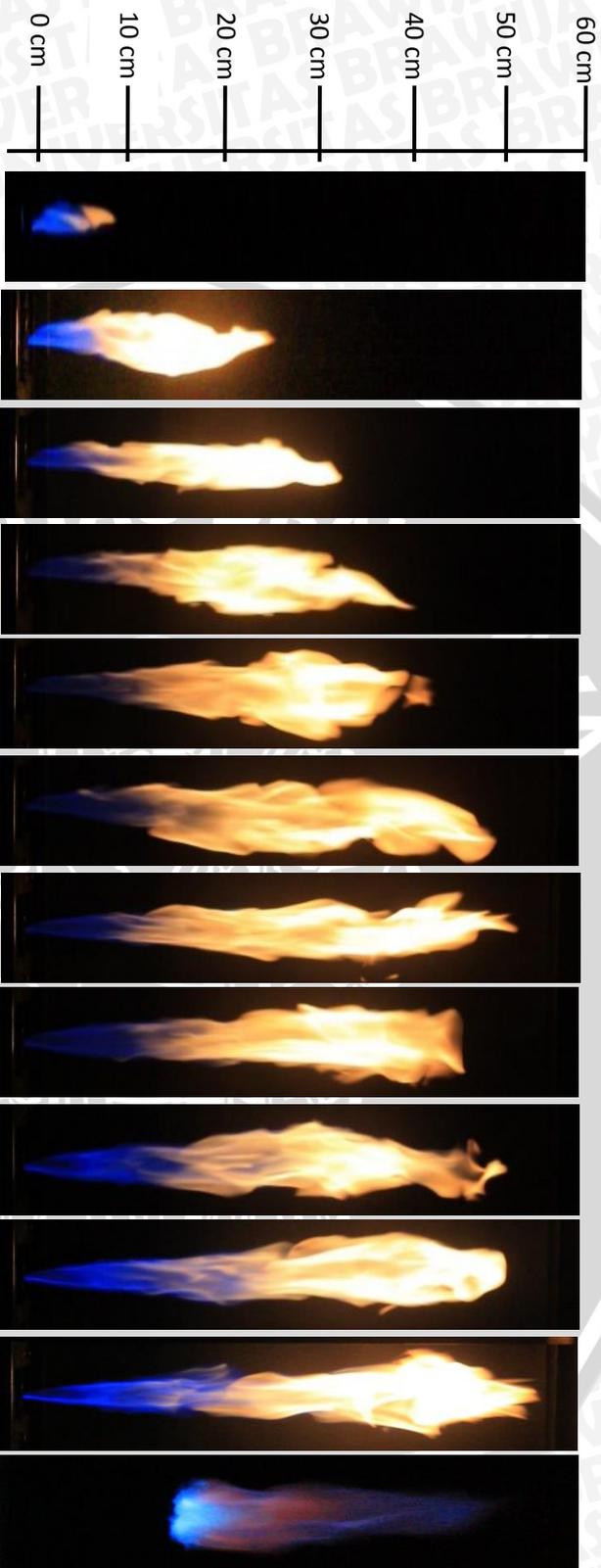
$\Delta h = 2\text{ mm}$



- |     |                                   |     |                                   |     |                                    |     |                                    |
|-----|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|------------------------------------|-----|------------------------------------|
| (a) | 1.32 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (d) | 5.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (g) | 9.29 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  | (j) | 13.26 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| (b) | 2.65 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (e) | 6.63 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (h) | 10.61 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (k) | 14.59 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| (c) | 3.98 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (f) | 7.96 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (i) | 11.94 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (l) | 15.92 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |

JUMLAH SUDU 4 30° (VARIASI DEBIT BAHAN BAKAR)

$\Delta h = 3\text{mm}$



- (a) 1.32 m.s<sup>-1</sup>
- (b) 2.65 m.s<sup>-1</sup>
- (c) 3.98 m.s<sup>-1</sup>

- (d) 5.30 m.s<sup>-1</sup>
- (e) 6.63 m.s<sup>-1</sup>
- (f) 7.96 m.s<sup>-1</sup>

- (g) 9.29 m.s<sup>-1</sup>
- (h) 10.61 m.s<sup>-1</sup>
- (i) 11.94 m.s<sup>-1</sup>

- (j) 13.26 m.s<sup>-1</sup>
- (k) 14.59 m.s<sup>-1</sup>
- (l) 15.92 m.s<sup>-1</sup>

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

(f)

(g)

(h)

(i)

(j)

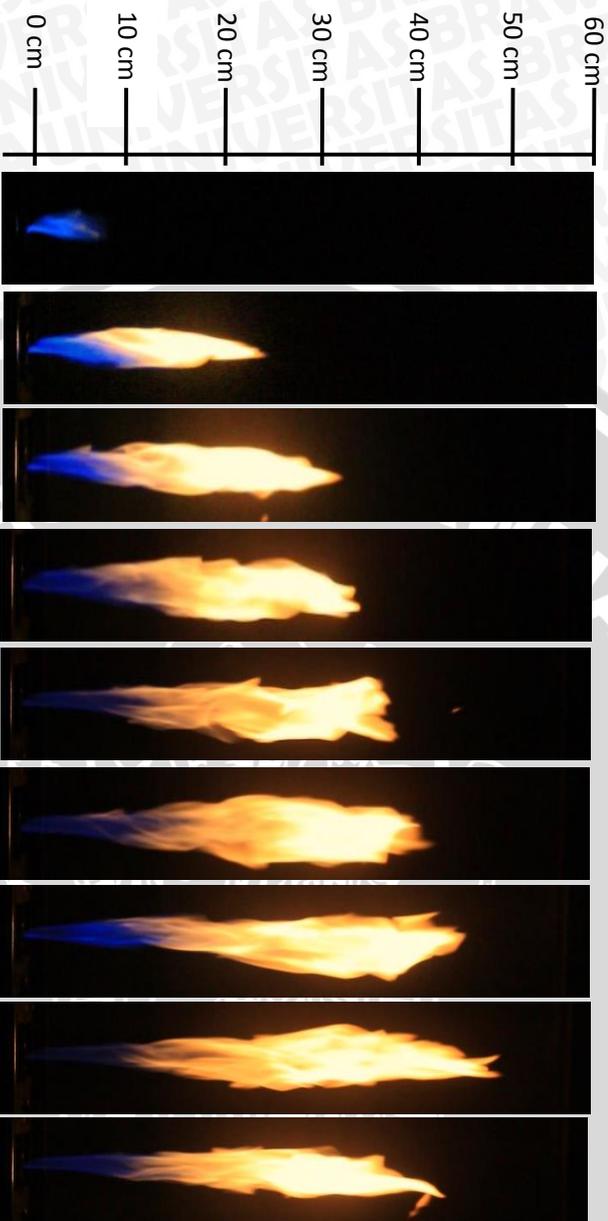
(k)

(l)



JUMLAH SUDU 4 30° (VARIASI DEBIT BAHAN BAKAR)

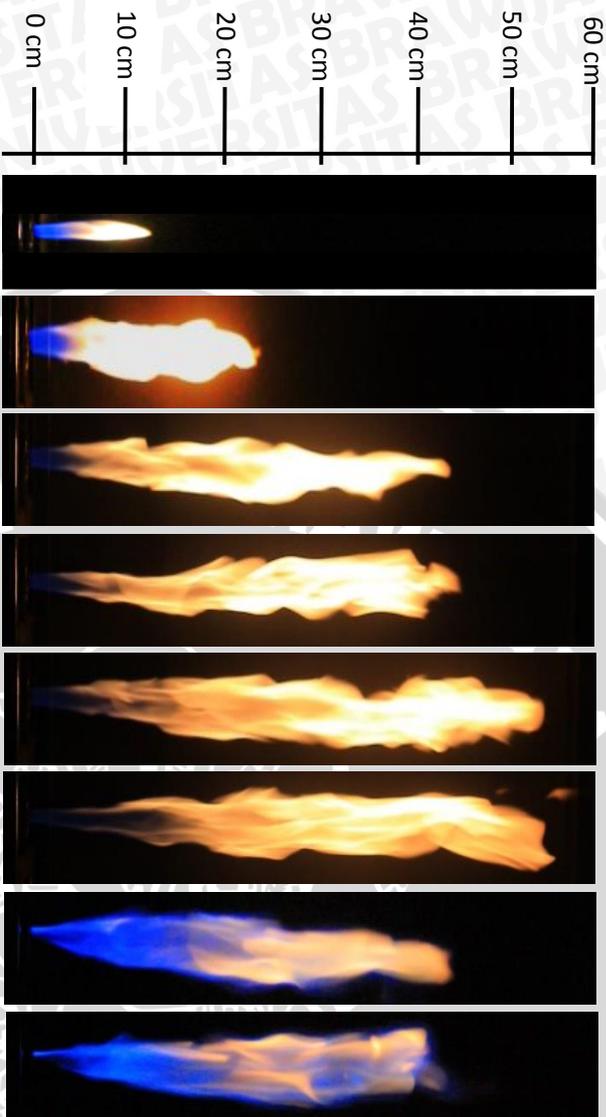
$\Delta h = 6\text{ mm}$



- |     |                                   |     |                                   |     |                                    |     |                                    |
|-----|-----------------------------------|-----|-----------------------------------|-----|------------------------------------|-----|------------------------------------|
| (a) | 1.32 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (d) | 5.30 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (g) | 9.29 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  | (j) | 13.26 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| (b) | 2.65 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (e) | 6.63 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (h) | 10.61 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (k) | 14.59 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |
| (c) | 3.98 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (f) | 7.96 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (i) | 11.94 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | (l) | 15.92 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ |

Visualisasi Jumlah sudu 6 sudut 30° (variasi bahan bakar)

$\Delta H = 2 \text{ m}$



- (a) 1.32  $\text{m.s}^{-1}$
- (b) 2.65  $\text{m.s}^{-1}$
- (c) 3.98  $\text{m.s}^{-1}$

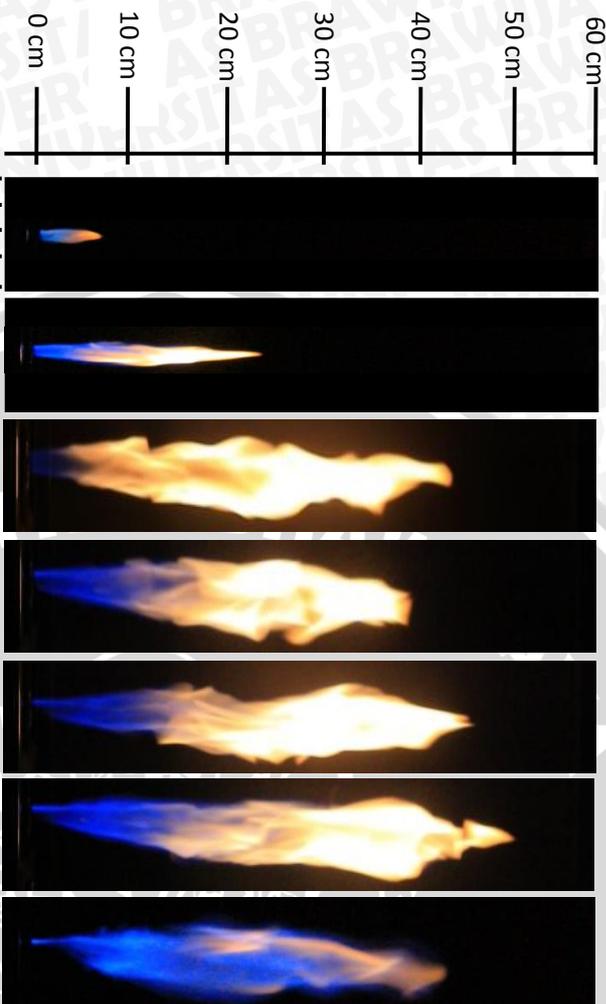
- (d) 5.30  $\text{m.s}^{-1}$
- (e) 6.63  $\text{m.s}^{-1}$
- (f) 7.96  $\text{m.s}^{-1}$

- (g) 9.29  $\text{m.s}^{-1}$
- (h) 10.61  $\text{m.s}^{-1}$



Visualisasi Jumlah sudu 6 sudut 30° (variasi bahan bakar)

$\Delta H = 3 \text{ mm}$



(a) 1.32  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$   
(b) 2.65  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$   
(c) 3.98  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

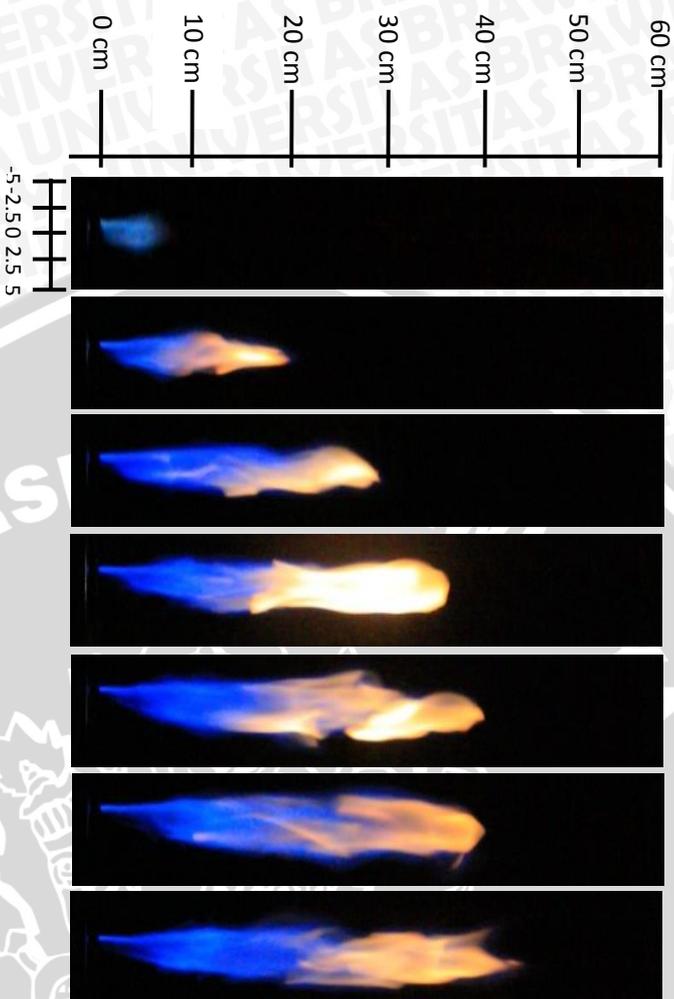
(d) 5.30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$   
(e) 6.63  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$   
(f) 7.96  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

(g) 9.29  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$



Visualisasi Jumlah sudu 6 sudut 30° (variasi bahan bakar)

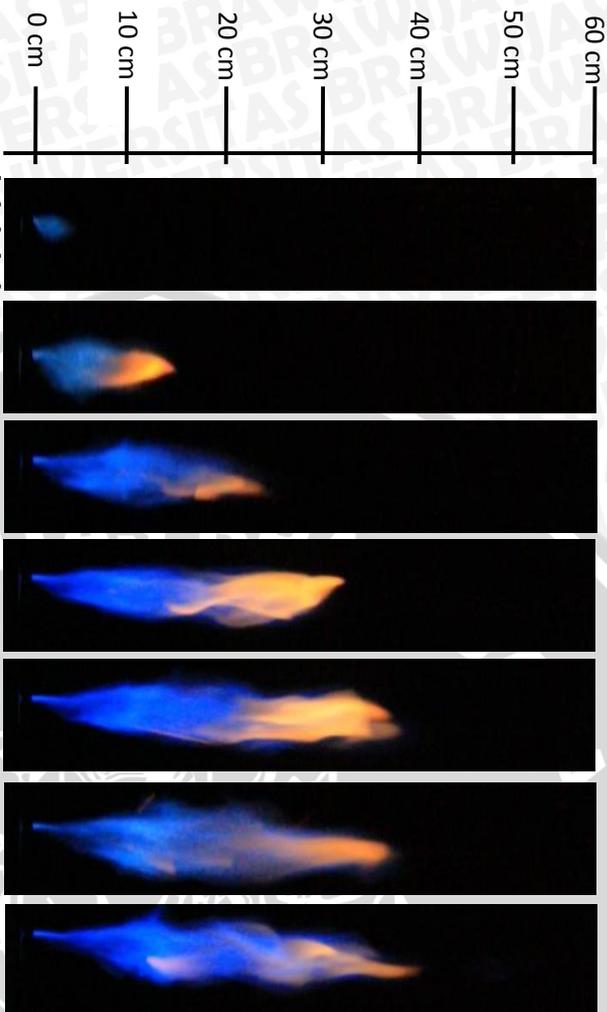
$\Delta H = 6\text{ mm}$



- (a) 1.32  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- (b) 2.65  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- (c) 3.98  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- (d) 5.30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- (e) 6.63  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- (f) 7.96  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- (g) 9.29  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

Visualisasi Jumlah sudu 6 sudut 30° (variasi bahan bakar)

$\Delta H = 7 \text{ mm}$



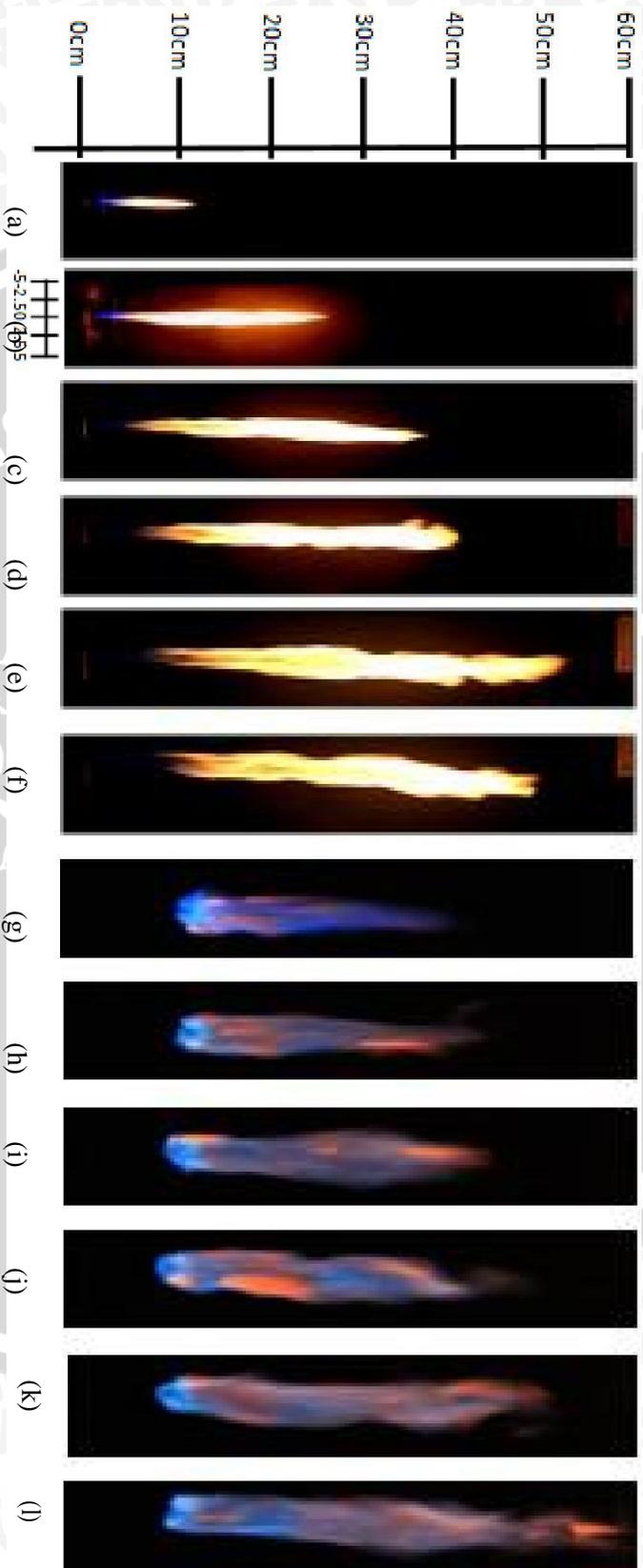
- (a) 1.32  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- (b) 2.65  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- (c) 3.98  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

- (d) 5.30  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- (e) 6.63  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
- (f) 7.96  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

- (g) 9.29  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$

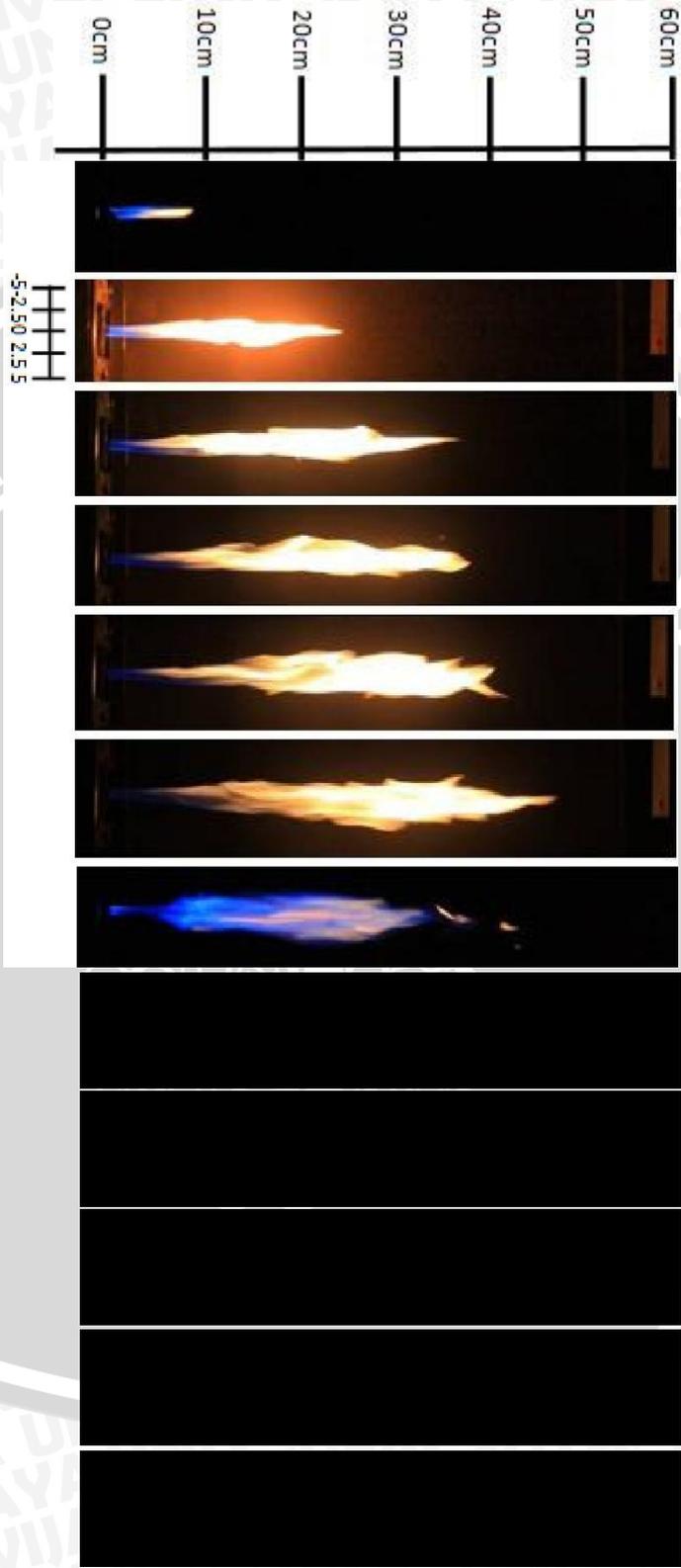
Visualisasi Jumlah Sudu 8 sudut  $30^\circ$  (variasi bahan bakar)

$\Delta H = 2\text{mm}$

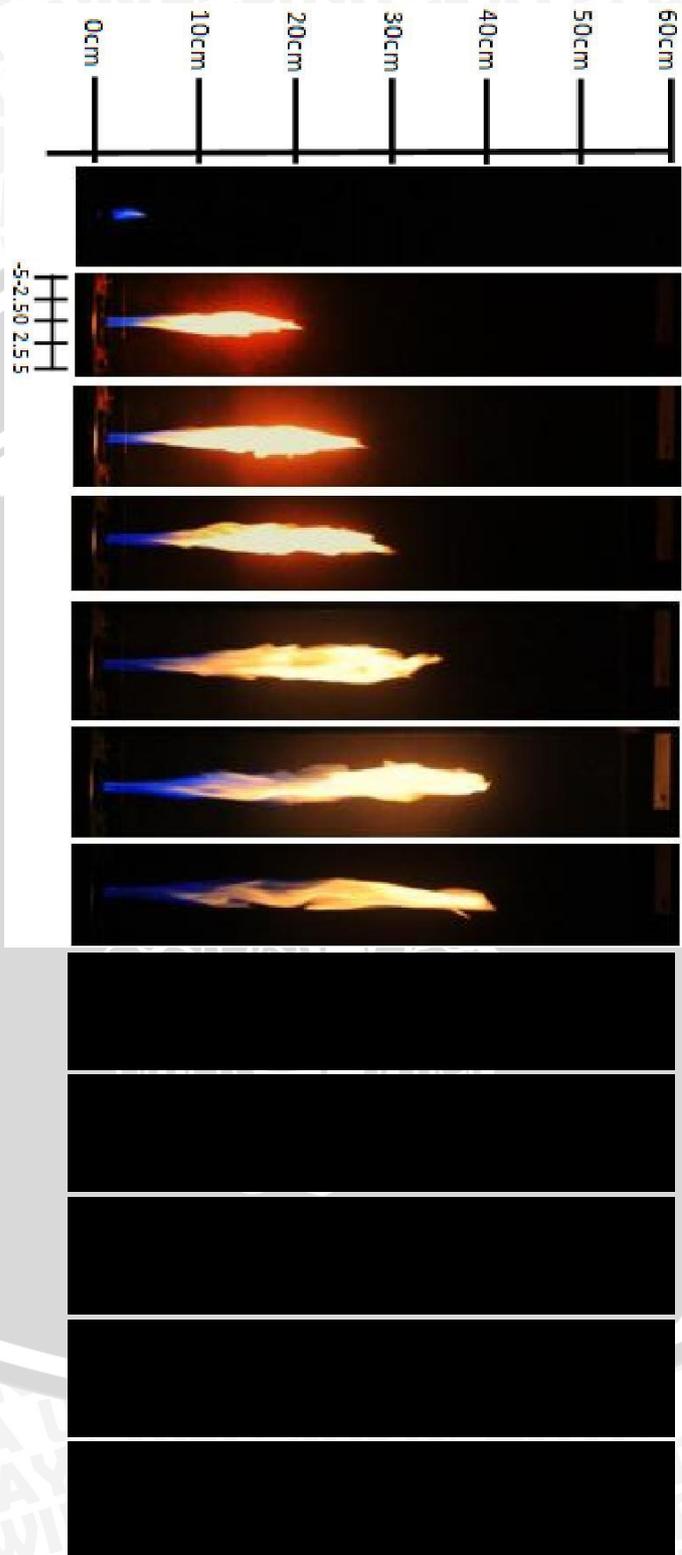


Kecepatan Udara 0,9 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

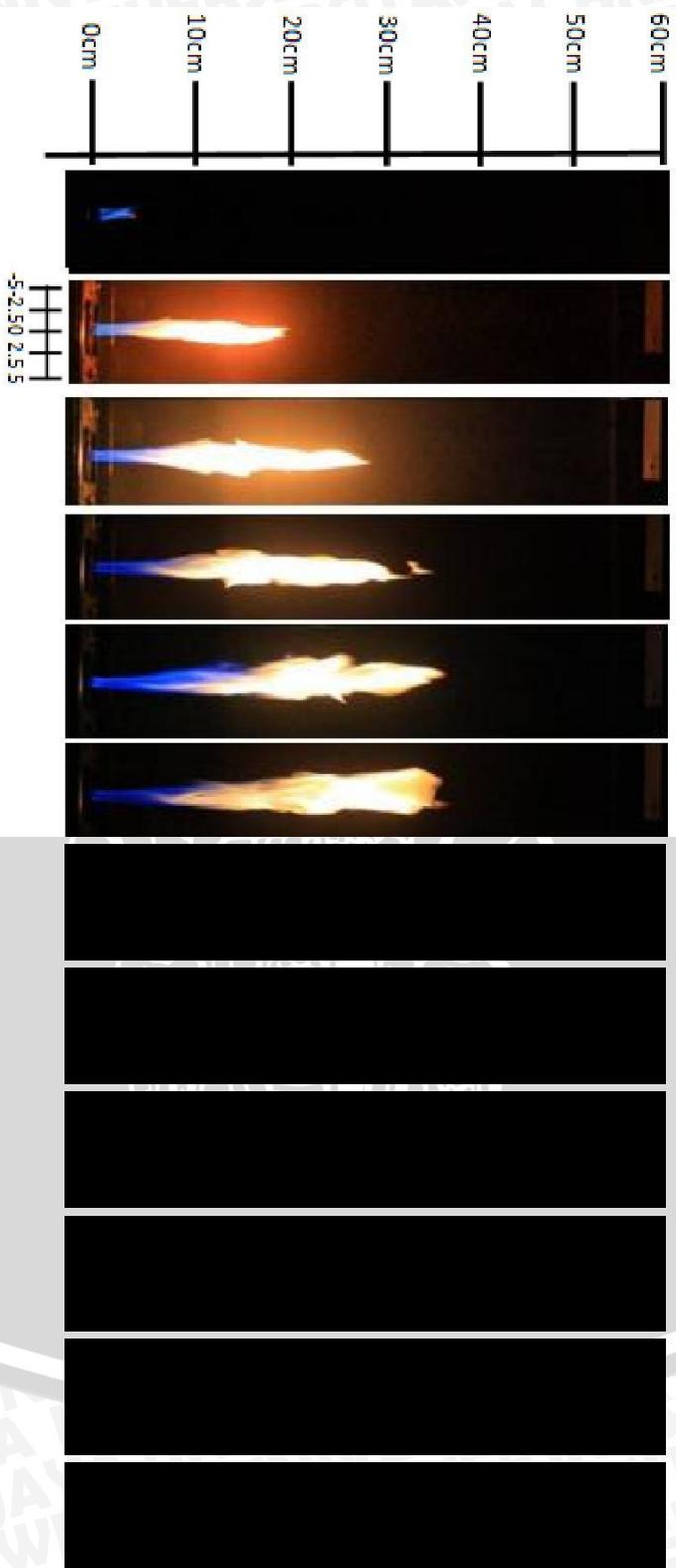
Visualisasi Jumlah Sudu 8 sudut 30° (variasi bahan bakar)



Kepcepatan Udara 0.9 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

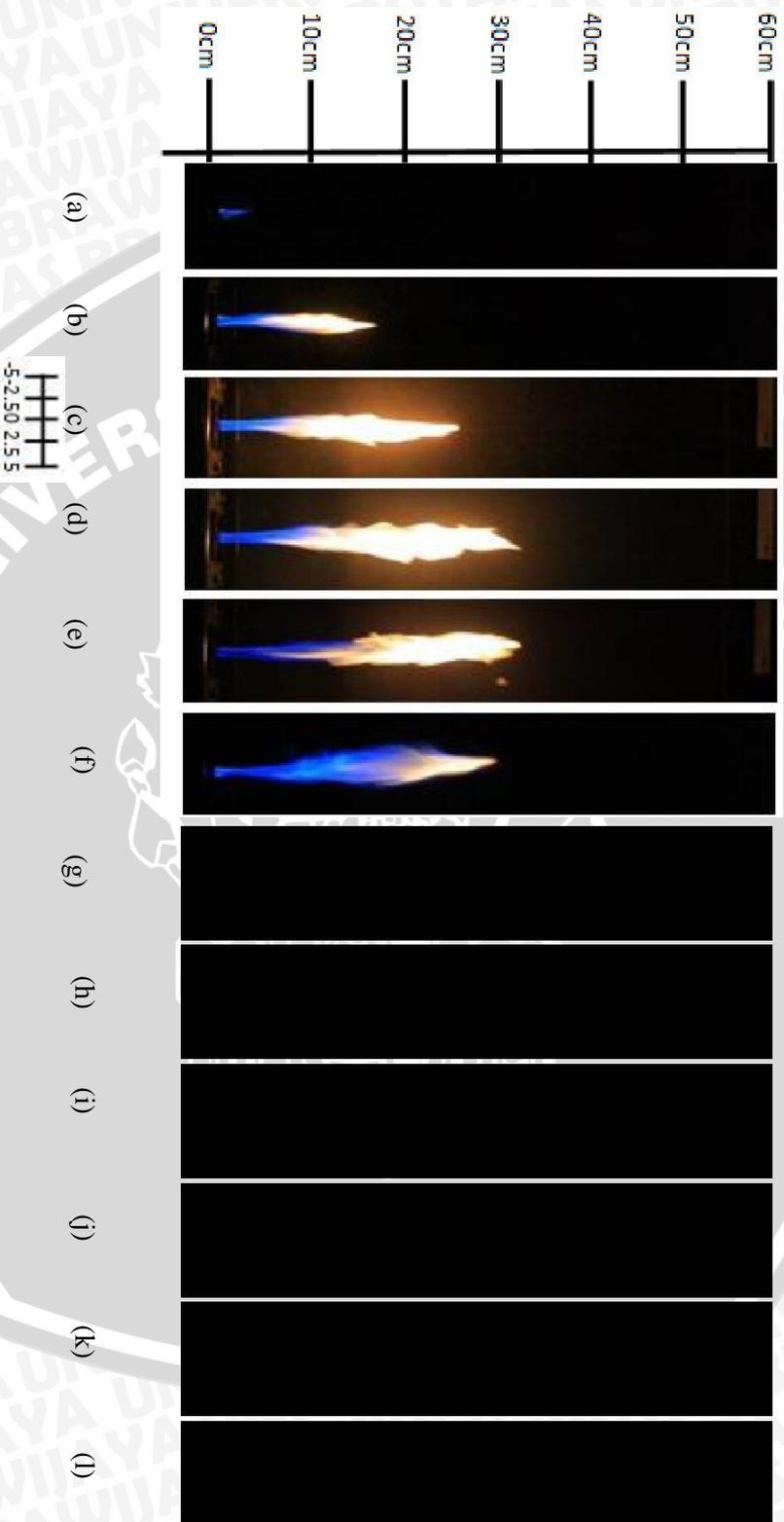


Kecepatan Udara 0.9 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s



Kecepatan Udara 0.9 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1.32 m/s (b) 2.65 m/s (c) 3.98 m/s (d) 5.30 m/s (e) 6.63 m/s (f) 7.96 m/s (g) 9.28 m/s (h) 10.61 m/s (i) 11.94 m/s (j) 13.26 m/s (k) 14.59 (l) 15.92 m/s

Visualisasi Jumlah Sudu 8 sudut  $30^\circ$  (variasi bahan bakar)



Kecepatan Udara 0.9 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 m/s (l) 15,92 m/s

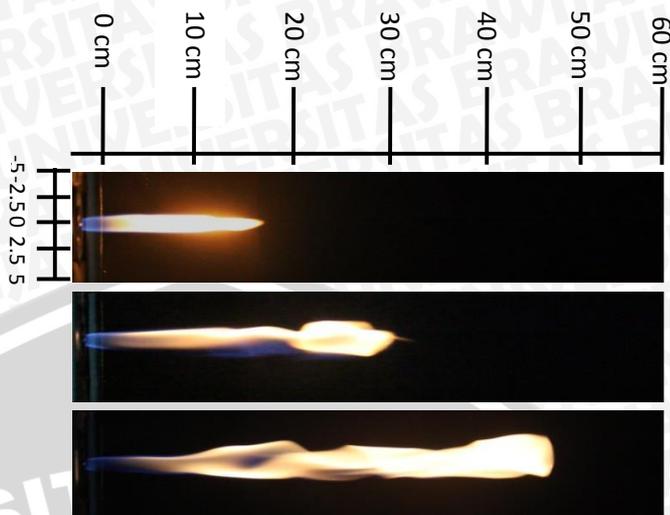
Visualisasi Jumlah Sudu 8 sudut 30° (variasi bahan bakar)



Kecepatan Udara 0.9 m/s dan Kecepatan Bahan Bakar (a) 1,32 m/s (b) 2,65 m/s (c) 3,98 m/s (d) 5,30 m/s (e) 6,63 m/s (f) 7,96 m/s (g) 9,28 m/s (h) 10,61 m/s (i) 11,94 m/s (j) 13,26 m/s (k) 14,59 (l) 15,92 m/s

TANPA SWIRL VANES (VARIASI DEBIT BAHAN BAKAR)

$\Delta h = 2\text{mm}$



Keterangan:

- (a) 1.32  $\text{m.s}^{-1}$
- (b) 2.65  $\text{m.s}^{-1}$
- (c) 3.98  $\text{m.s}^{-1}$
- (d) 5.30  $\text{m.s}^{-1}$
- (e) 6.63  $\text{m.s}^{-1}$
- (f) 7.96  $\text{m.s}^{-1}$
- (g) 9.29  $\text{m.s}^{-1}$
- (h) 10.61  $\text{m.s}^{-1}$
- (i) 11.94  $\text{m.s}^{-1}$
- (j) 13.26  $\text{m.s}^{-1}$
- (k) 14.59  $\text{m.s}^{-1}$
- (l) 15.92  $\text{m.s}^{-1}$



## Lampiran Distribusi Temperatur

Jenis Swirler : Sudu 4 Sudut 30°

Kecepatan Bahan Bakar : 1.32 m/s

Kecepatan Udara : 0.08 m/s

Y \ X	Temperatur (°C)		
	0 cm	2 cm	4 cm
1 cm	782.438	49.018	28.582
2 cm	861.780	76.982	28.096
3 cm	1036.525	80.156	29.037
4 cm	1030.822	45.868	28.227
5 cm	1047.828	1056.360	38.772
6 cm	996.929	74.192	33.015
7 cm	1024.765	100.204	100.120
8 cm	1065.753	143.327	52.450
9 cm	1107.666	157.972	41.806
10 cm	1045.172	162.624	60.552
11 cm	1012.775	218.062	86.021
12 cm	826.114	181.459	89.565
13 cm	769.325	209.499	94.244
14 cm	654.736	216.965	110.019
15 cm	624.628	252.982	127.341
Rata-rata	925.817	201.711	63.190

Jenis Swirler : Sudu 4 Sudut 30<sup>0</sup>  
Kecepatan Bahan Bakar : 7.96 m/s  
Kecepatan Udara : 0.08 m/s

Y \ X	Temperatur (°C)		
	0 cm	2 cm	4 cm
1 cm	774.137	44.220	44.635
5 cm	822.735	60.378	40.518
10 cm	1038.789	183.977	68.705
15 cm	1077.525	306.437	100.167
20 cm	1005.647	327.041	118.573
25 cm	1137.820	418.102	166.180
30 cm	236.593	236.233	242.361
35 cm	976.926	347.763	285.513
40 cm	866.907	398.117	257.429
45 cm	748.955	517.090	239.923
50 cm	328.255	328.255	254.349
Rata-rata	819.481	287.965	165.305

Jenis Swirler : Sudu 4 Sudut 30<sup>0</sup>  
Kecepatan Bahan Bakar : 13.26 m/s  
Kecepatan Udara : 0.08 m/s

Y \ X	Temperatur (°C)		
	0 cm	2 cm	4 cm
1 cm	39.393	53.155	53.380
5 cm	51.840	58.798	61.486
10 cm	697.775	637.429	100.385
15 cm	863.114	1019.317	241.979
20 cm	968.803	817.866	253.705
25 cm	1147.463	831.922	447.616
30 cm	1087.757	869.372	513.693
35 cm	1000.085	675.363	436.850
40 cm	828.988	442.769	400.540
45 cm	602.951	466.022	412.927
Rata-rata	728.817	587.201	292.256



Jenis Swirler : Sudu 6 Sudut 30<sup>0</sup>  
 Kecepatan Bahan Bakar : 1.32 m/s  
 Kecepatan Udara : 0.08 m/s

X \ Y	Temperatur (°C)				
	0 cm	1 cm	2 cm	3cm	4 cm
1 cm	816.7578	42.100	34.593	42.935	69.154
2 cm	1167.963	135.463	36.434	41.445	41.552
3 cm	1266.23	308.972	31.714	64.463	39.944
4 cm	1278.696	208.362	63.982	43.332	38.034
5 cm	1282.866	196.197	132.617	55.343	37.928
6 cm	1294.45	672.249	207.955	70.853	41.734
7 cm	1258.149	841.650	255.300	547.910	64.434
8 cm	1281.984	571.057	260.205	171.331	75.181
9 cm	1242.883	750.626	278.586	186.015	103.576
10 cm	1103.975	630.674	330.030	217.689	106.471
11 cm	945.6834	709.810	304.415	252.922	136.967
12 cm	833.9524	514.323	331.160	230.252	148.464
13 cm	715.8693	546.593	330.682	250.995	168.583
14 cm	725.4168	554.905	311.640	236.027	167.927
Rata-rata	1086.777	477.356	207.808	172.251	88.568

Jenis Swirler : Sudu 6 Sudut 30<sup>0</sup>  
 Kecepatan Bahan Bakar : 5.3 m/s  
 Kecepatan Udara : 0.1 m/s

X \ Y	Temperatur (°C)				
	0 cm	1 cm	2 cm	3cm	4 cm
1 cm	352.12	91.49	63.20	57.54	51.40
5 cm	941.32	981.26	78.01	89.89	52.37
10 cm	1166.15	965.38	147.55	125.17	66.07
15 cm	1179.59	708.77	141.28	144.72	85.89
20 cm	1202.58	804.88	203.91	194.96	135.80
25 cm	1063.11	598.94	192.71	332.84	190.13
30 cm	731.50	325.7	258.70	263.92	278.96
35 cm	777.67	441.45	317.81	264.42	303.43
40 cm	391.23	214.90	338.80	236.22	251.44
45 cm	490.22	414.90	301.69	236.22	245.99
50 cm	565.62	285.68	309.01	241.02	182.03
Rata-rata	805.56	530.30	213.88	198.81	167.59

Jenis Swirler : Sudu 6 Sudut 30°  
 Kecepatan Bahan Bakar : 9.29 m/s  
 Kecepatan Udara : 0.08 m/s

		Temperatur (°C)		
Y \ X		0 cm	2 cm	4 cm
	1 cm		352.12	63.20
5 cm		941.32	78.01	52.37
10 cm		1166.15	147.55	66.07
15 cm		1179.59	141.28	85.89
20 cm		1202.58	203.91	135.80
25 cm		1063.11	192.71	190.13
30 cm		731.50	258.70	278.96
35 cm		777.67	317.81	303.43
40 cm		391.23	338.80	251.44
Rata-rata		899.44	414.88	351.37

Jenis Swirler : Sudu 8 Sudut 30°  
 Kecepatan Bahan Bakar : 1,32 m.s<sup>-1</sup>  
 Kecepatan Udara : 0,08 ms<sup>-1</sup>

Y \ X	Temperatur (°C)				
	0 cm	1 cm	2 cm	3cm	4 cm
1 cm	816.7578	587.778	27.04329	24.18161	64.89604
2 cm	1167.963	541.7097	28.02567	47.26634	31.14334
3 cm	1266.23	133.5232	133.5232	37.67824	30.27222
4 cm	1278.696	1144.543	200.7171	53.25169	31.06343
5 cm	1282.866	1289.138	320.2863	38.02745	31.59743
6 cm	1294.45	1218.817	1161.88	40.58818	32.37185
7 cm	1258.149	1228.042	353.4257	65.01673	29.05991
8 cm	1281.984	1174.441	439.4858	46.91684	30.04721
9 cm	1242.883	635.4069	344.7084	90.36551	46.72405
10 cm	1103.975	830.1832	314.2361	112.5508	53.48303
11 cm	945.6834	645.1062	301.2905	113.5781	77.9368
12 cm	833.9524	561.9055	287.0425	142.6707	74.73124
13 cm	715.8693	5407.931	303.2575	181.0499	148.7993
14 cm	725.4168	555.3814	320.7674	98.08908	172.6989
Rata-rata	1086.777	1139.565	323.9778	77.94508	61.05891

Jenis Swirler : Sudu 8 Sudut 30°  
 Kecepatan Bahan Bakar : 6.63 m.s<sup>-1</sup>  
 Kecepatan Udara : 0,08 ms<sup>-1</sup>

X \ Y	Temperatur (°C)				
	0 cm	1 cm	2 cm	3cm	4 cm
1 cm	833.8022	246.9397	40.83683	52.30666	40.80874
5 cm	1072.849	637.6885	56.90467	108.4461	70.07493
10 cm	983.3081	1115.281	250.89	182.8814	108.5959
15 cm	1244.518	713.2287	422.5591	539.6678	397.5135
20 cm	1088.296	692.8644	317.6674	321.9733	272.9999
25 cm	1010.037	810.3519	345.0288	272.8258	149.4178
30 cm	787.2052	559.1127	448.6688	276.7609	257.4395
35 cm	765.8309	656.2158	474.3143	336.792	252.9705
40 cm	650.1708	596.9211	425.8122	312.3424	279.7993
45 cm	410.6943	468.5106	388.7067	337.6934	294.1303
50 cm	438.7975	450.0844	332.2349	317.4761	298.8906
Rata-rata	844.1372	631.5635	318.5112	278.106	220.2401

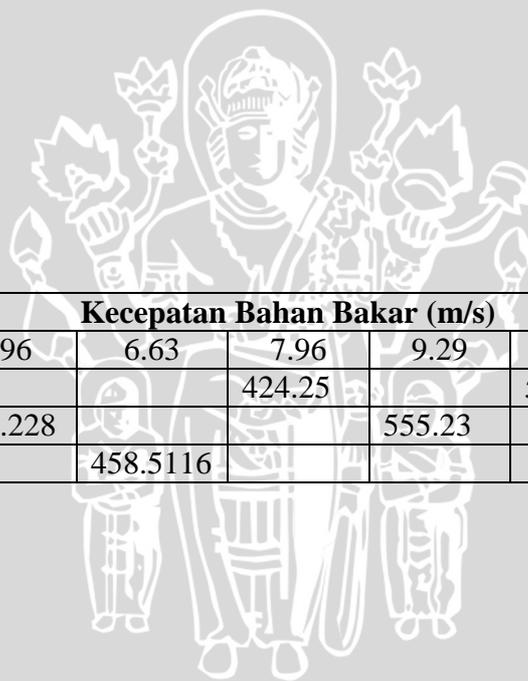
Jenis Swirler : Sudu 8 Sudut 30°  
 Kecepatan Bahan Bakar : 14.59 m.s<sup>-1</sup>  
 Kecepatan Udara : 0,08 ms<sup>-1</sup>

Y \ X	Temperatur (°C)				
	0 cm	1 cm	2 cm	3cm	4 cm
1 cm	27.27372	43.3282	53.97474	59.876	61.55507
5 cm	64.01221	56.30591	53.01133	191.5078	59.89078
10 cm	1113.373	1154.616	805.6403	522.1596	129.1803
15 cm	1048.551	864.5138	919.5335	356.0633	321.5938
20 cm	1117.755	1173.812	1100.608	553.4682	444.5748
25 cm	1071.474	1161.878	1161.583	748.7426	703.7563
30 cm	1144.853	1083.92	1031.848	562.3325	404.5382
35 cm	1161.483	1140.635	1029.166	653.4254	611.0964
40 cm	1035.562	1054.111	954.0997	572.0582	419.0676
45 cm	792.4664	941.3575	885.3754	533.1691	404.3131
50 cm	838.5205	737.4896	683.1821	451.5644	356.3914
55 cm	677.7113	614.3092	623.61	303.9064	329.2613
Rata-rata	841.0863	835.523	775.136	495.3089	353.7683

Jenis Swirler : Tanpa Swirler  
 Kecepatan Bahan Bakar : 1.32 m.s<sup>-1</sup>  
 Kecepatan Udara : 0,08 ms<sup>-1</sup>

X \ Y	Temperatur (°C)				
	0 cm	1 cm	2 cm	3 cm	4 cm
1 cm	428.4352	340.98	253.5247	156.1415	58.75834
2 cm	603.0288	384.8238	166.6188	108.0114	49.40406
3 cm	933.3372	531.3734	129.4097	87.93172	46.45377
4 cm	789.4678	452.3514	115.2351	83.41459	51.5941
5 cm	1058.3	617.1333	175.9664	111.6917	47.41694
6 cm	906.5896	522.6289	138.6681	97.70367	56.73921
7 cm	1046.291	722.0983	397.9054	248.1087	98.31197
8 cm	931.56	573.5303	215.5007	138.6684	61.83609
9 cm	895.1732	611.9208	328.6684	190.4614	52.25443
10 cm	955.8986	642.2835	328.6684	193.0636	57.45886
11 cm	598.7911	456.1831	313.5751	185.7517	57.92831
12 cm	959.8986	666.391	372.8834	230.7272	88.57102
Rata-rata	842.231	543.4748	244.7187	152.6396	60.56059

# UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Jenis Sudu	Kecepatan Bahan Bakar (m/s)						
	1.32	5.96	6.63	7.96	9.29	13.26	14.59
4	396.906			424.25		536.091	
6	406.552	383.228			555.23		
8	537.5648		458.5116				660.1645

### Contoh Perhitungan

Diketahui:

$V_{bb}$  = kecepatan bahan bakar (1.32 m/s)

$d_{bb}$  = diameter pipa bahan bakar (0.004 m)

$\nu$  = viskositas kinematik gas metana (0.0000125)

$$\begin{aligned} Re &= \frac{V_{bb} \cdot d_{bb}}{\nu} \\ &= \frac{1.32 \cdot 0.004}{0.0000125} \\ &= 422.40 \end{aligned}$$

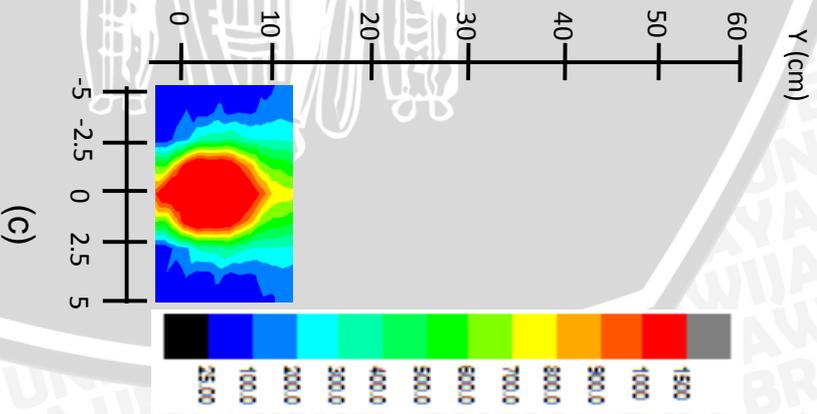
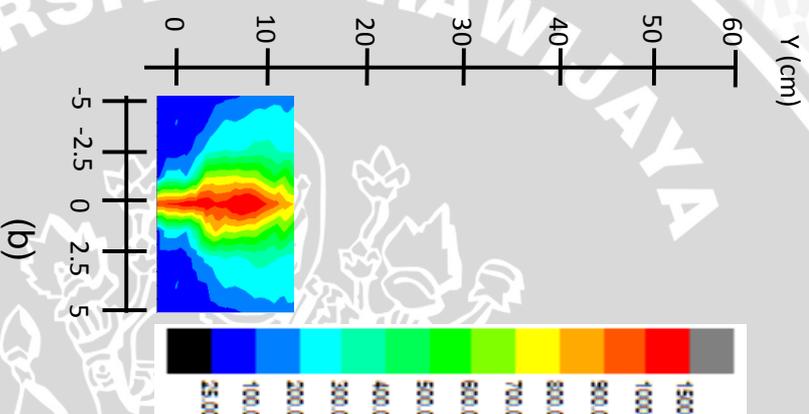
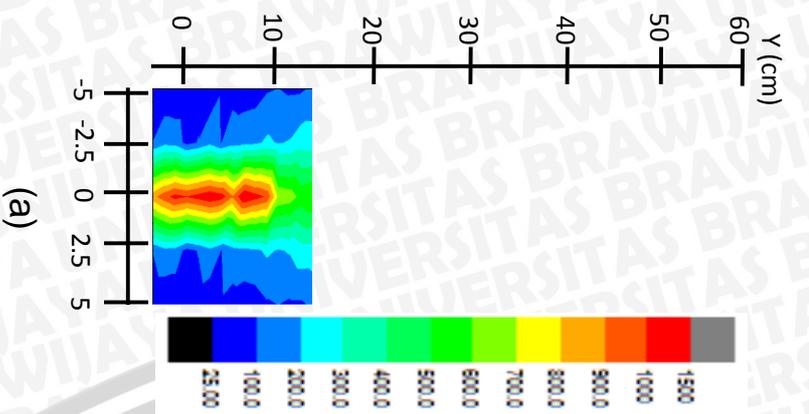
$V_{bb}$ (m/s)	Bil. Reynold $V_{bb} \cdot d_{bb} / \nu$
1.32	422.40
2.65	848.00
3.98	1273.60
5.3	1696.00
6.63	2121.60
7.96	2547.20
9.29	2972.80
10.61	3395.20
11.94	3820.80
13.26	4243.20
14.59	4668.80
15.92	5094.40

Laminer

Transisi

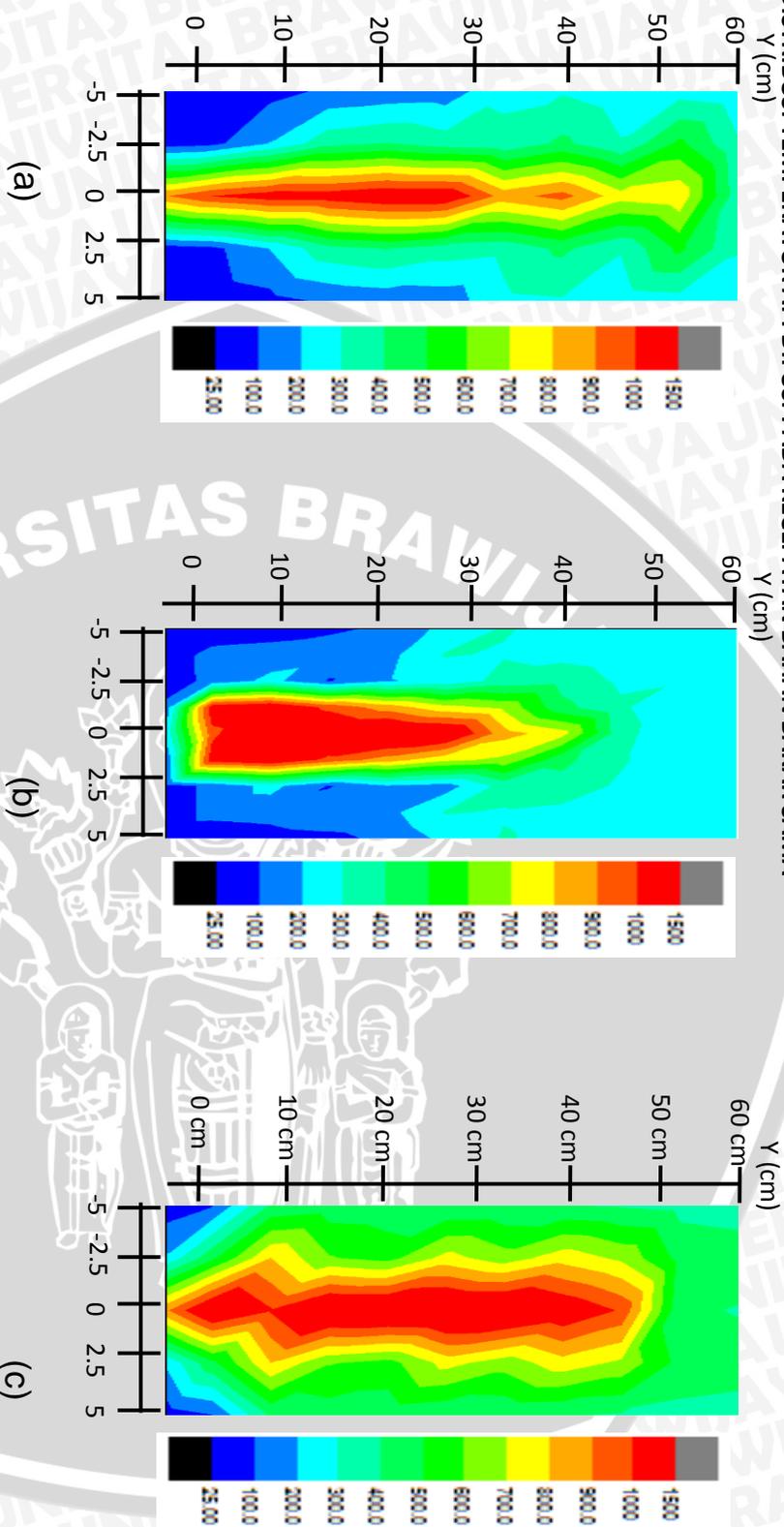
Turbulen

DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI PADA KECEPATAN BAHAN BAKAR SAMA



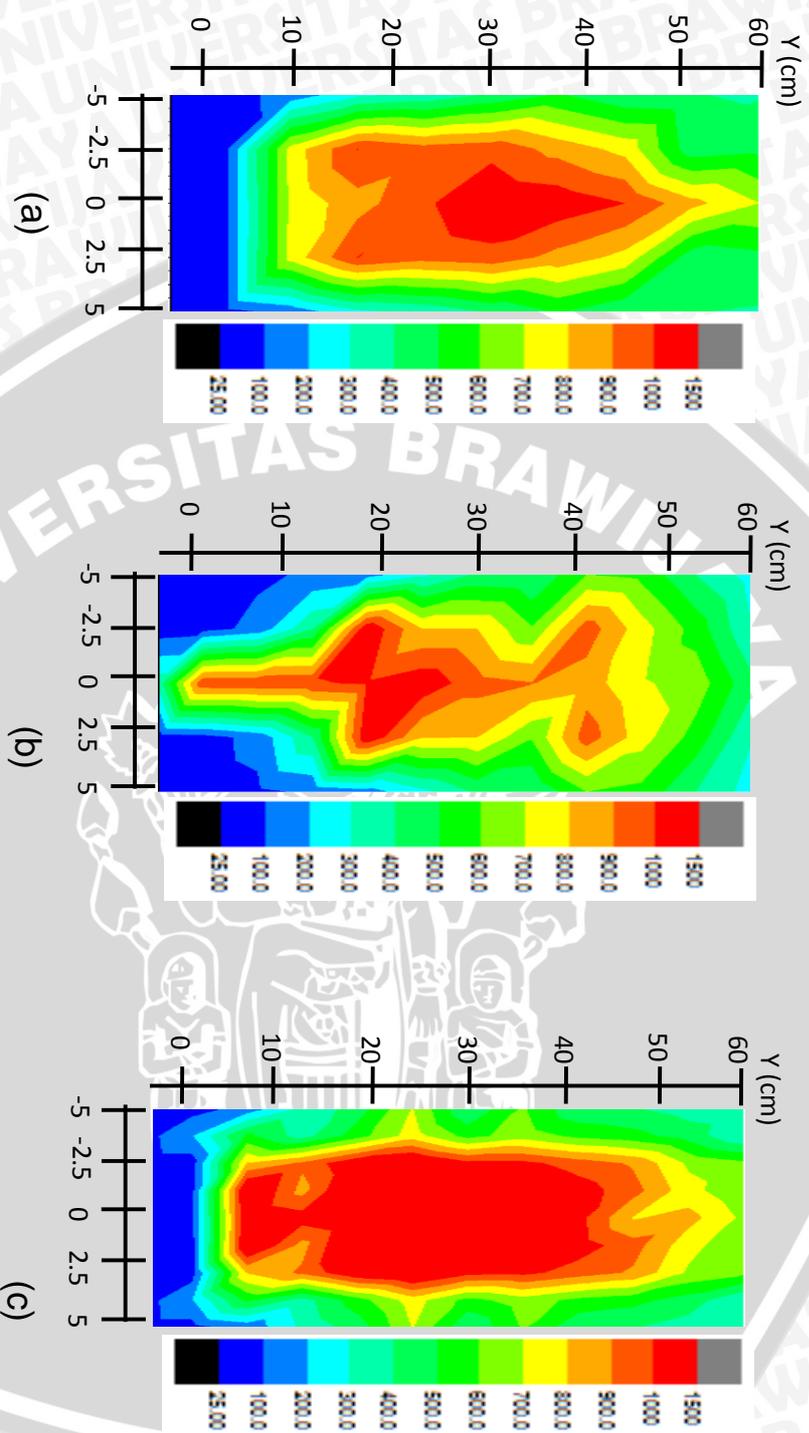
Variasi Jumlah Sudu *Swirl Vanes* Sudu (a) 4 (b) 6 dan (c) 8  
Pada kecepatan bahan bakar 1.32 m/s dan kecepatan udara 0.9 m/s

DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI PADA KECEPATAN BAHAN BAKAR SAMA



Variasi Jumlah Sudu *Swirl Vanes* Sudu (a) 4 (b) 6 dan (c) 8  
Pada Kecepatan bahan bakar 7.96 m/s dan kecepatan udara 0.9 m/s

DISTRIBUSI TEMPERATUR API DIFUSI PADA KECEPATAN BAHAN BAKAR SAMA



Variasi Jumlah Sudu *Swirl Vanes* Sudu (a) 4 (b) 6 dan (c) 8 Pada kecepatan bahan bakar 13.26 m/s dan kecepatan udara 0.9 m/s



SKALA: 2:1	DIGAMBAR: RADISSA D.I
SATUAN: mm	NIM: 12506201111025
TANGGAL: 12 JULI 2016	DIPERIKSA: Dr.Eng Widya Wijayanti, S.T, M.T

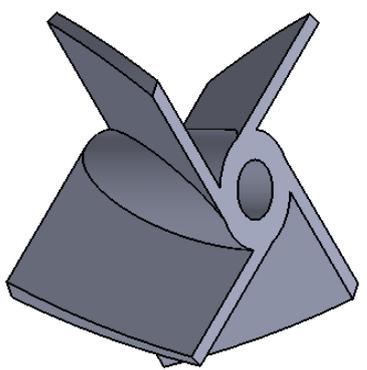
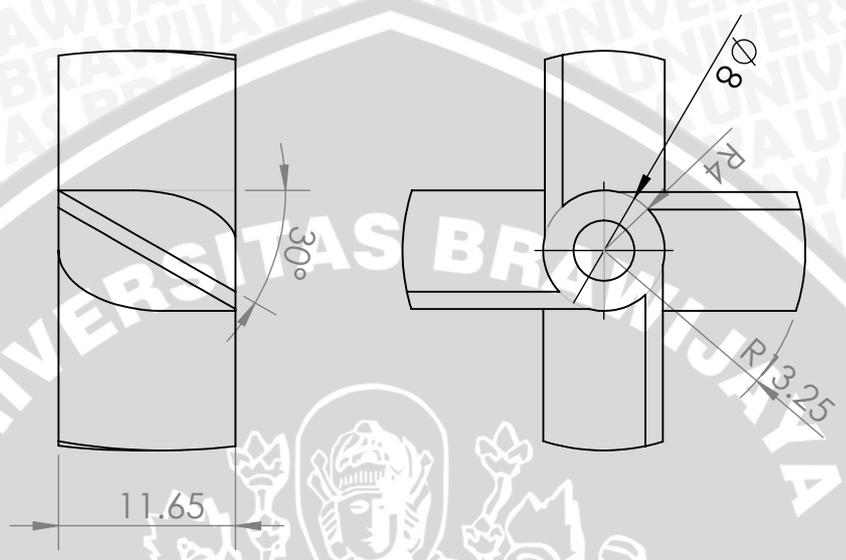
JURUSAN MESIN  
FT-BRAWIJAYA

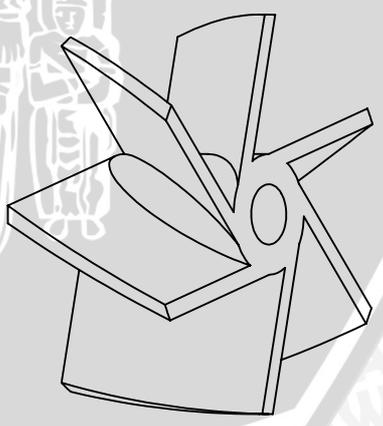
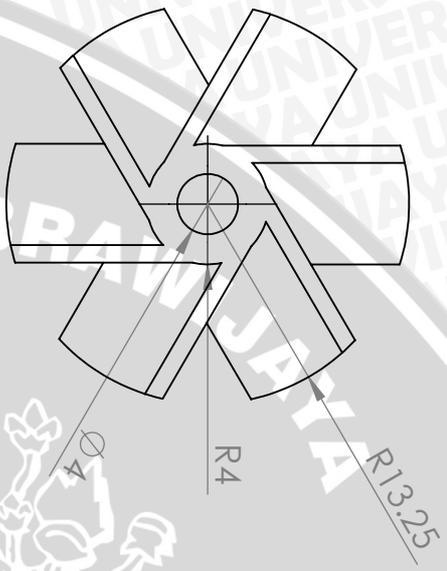
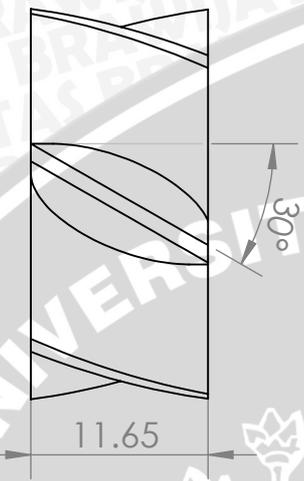
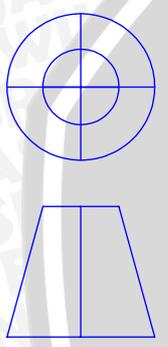
SWIRL VANES  
SUDU 4

01

A4

PERINGATAN:





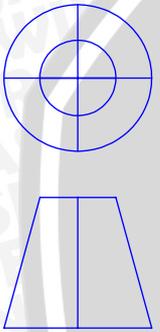
JURUSAN MESIN  
FT-BRAWIJAYA

SWIRL VANES  
SUDU 6

SKALA: 2:1	DIGAMBAR : RADISSA D.I
SATUAN : mm	NIM: 125060201111025
TANGGAL : 12 JULI 2016	DIPERIKSA: Dr.Eng Widya Wijayanti, S.T, M.T

PERINGATAN:

02 A4



JURUSAN MESIN  
FT-BRAWIJAYA

SKALA: 2:1  
 SATUAN : mm  
 TANGGAL : 12 JULI 2016

DIGAMBAR : RADISSA D.1  
 NIM: 125060201111025  
 DIPERIKSA: Dr.Eng  
 Widya Wijayanti, S.T, M.T

SWIRL VANES  
SUDDU 8

03

A4

PERINGATAN:

