

**PENGARUH VARIASI SUDUT ALUR *SWIRL NOZZLE* DAN
CIRCULAR NOZZLE TERHADAP BATAS *LIFT OFF* DAN
BLOW OFF PADA PEMBAKARAN API DIFUSI**

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

**Diajukan untuk memenuhi sebagai persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik**



Disusun Oleh :

BADARUS SYAMSI ARIFIN

NIM. 0310620025-62

DEPARTEMEN PENDIDIKAN NASIONAL

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

JURUSAN MESIN

MALANG

2007

**PENGARUH VARIASI SUDUT ALUR *SWIRL NOZZLE* DAN
CIRCULAR NOZZLE TERHADAP BATAS *LIFT OFF* DAN
BLOW OFF PADA PEMBAKARAN API DIFUSI**

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi sebagai persyaratan
Memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun Oleh :

BADARUS SYAMSI ARIFIN

NIM. 0310620025-62

Telah Diperiksa dan Disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Prof. Ir. H. Sudjito, Ph.D

NIP. 130 809 065

Lilis Yuliati, ST, MT

NIP. 132 258 191

**PENGARUH VARIASI SUDUT ALUR *SWIRL NOZZLE* DAN
CIRCULAR NOZZLE TERHADAP BATAS *LIFT OFF* DAN
BLOW OFF PADA PEMBAKARAN API DIFUSI**

Disusun oleh:

Badarus Syamsi Arifin

0310620025-62

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada tanggal 14 Juni 2007

Dosen Penguji

Skripsi 1

Ir. Bardji Hadi Pranoto

NIP. 130 935 863

Skripsi 2

Dr. Ir. Rudy Soenoko, M Eng.Sc

NIP. 131 411 121

Komprehensif

Ir. Wardi Kasim

NIP. 130 531 844

Mengetahui:

Ketua Jurusan Teknik Mesin

Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT

NIP. 132 159 708

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulisan skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

Dalam penulisan skripsi ini penulis banyak mendapatkan bantuan dari berbagai pihak, oleh sebab itu penulis mengucapkan terima kasih yang tulus kepada :

1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT, selaku Ketua Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
2. Bapak Ir. Tjuk Oerbandono M.Se.CSE, selaku Sekretaris Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
3. Bapak Prof. Ir. H. Sudjito, Ph.D, selaku Dosen Pembimbing I yang telah memberikan bimbingan dan masukan pada penulis dalam menyusun skripsi ini.
4. Ibu Lilis Yulianti, ST, MT, selaku Dosen Pembimbing II yang telah memberikan bimbingan dan masukan pada penulis dalam menyusun skripsi ini.
5. Orang tua dan adik-adik yang telah memberikan dorongan moril dan materil sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini dengan baik.
6. Semua pihak yang secara langsung atau tidak langsung khususnya Mahasiswa Mesin angkatan 2003 yang telah membantu dalam kelancaran terselesaikannya skripsi ini dengan baik.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa skripsi ini masih terdapat banyak kekurangan karena itu kritik dan saran yang sifatnya nmembangun sangat penulis harapkan dalam kesempurnaan skripsi ini. Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi penulis pada khususnya dan bagi pembaca pada umumnya.

Malang, Juni 2007

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN **JUDUL**

i

LEMBAR **PENGESAHAN**

ii

KATA **PENGANTAR**

iii

DAFTAR **ISI**

iv

DAFTAR **GAMBAR**

vi

DAFTAR **TABEL**

vii

DAFTAR **LAMPIRAN**

viii

RINGKASAN

ix

BAB I PENDAHULUAN

1

1.1. Latar Belakang

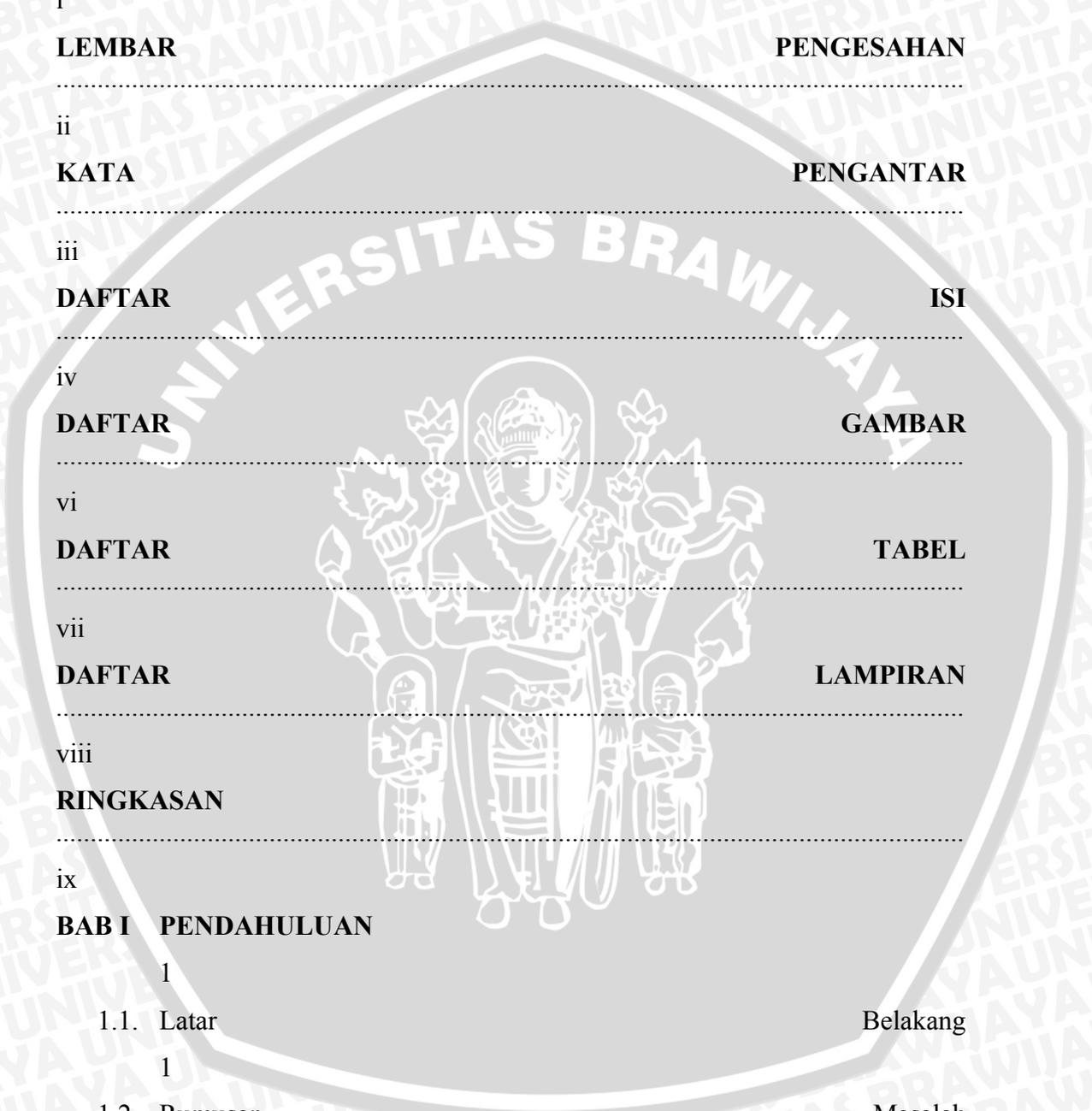
1

1.2. Rumusan Masalah

3

1.3. Batasan Masalah

3



1.4. Tujuan	Penelitian
3	
1.5. Manfaat	Penelitian
3	

BAB II TINJAUAN

PUSTAKA

4	
2.1. Penelitian-penelitian	Terdahulu
4	
2.2. Proses	Pembakaran
5	
2.2.1. Reaksi kimia pada proses pembakaran	
6	
2.2.2. Proses pembakaran gas	
8	
2.3. LPG (Liquified Petroleum Gas)	
10	
2.4. Pembakaran	Difusi
12	
2.5. Penyalaan dan batas ketidakhayalan (<i>limit of inflammability</i>)	
16	
2.6. Nosel Konvergen(<i>circular nozzle</i>) dan <i>Swirl Nozzle</i>	
17	
2.7. Distribusi Kecepatan dalam Aliran Berputar	
18	
2.8. Konservasi Massa	
20	
2.9. Persamaan Bernoulli	
21	

BAB III METODE

PENELITIAN

25



3.1.	Metode	Penelitian
25		
3.2.	Tempat	Penelitian
25		
3.3.	Variabel	Penelitian
25		
3.4.	Peralatan	Penelitian
26		
3.5.	Instalasi	Penelitian
28		
3.6.	Metode Pengambilan	Data
28		
3.7.	Rencana Analisa	Data
29		
3.8.	Diagram Alir	Penelitian
30		
BAB	IV	DATA DAN PEMBAHASAN
31		
4.1.	Data Hasil	Penelitian
31		
4.2.	Perhitungan	Data
31		
4.2.1.	Perhitungan Kecepatan Aliran Bahan Bakar.	
33		
4.2.2.	Perhitungan Kecepatan Aliran Udara	
33		
4.3.		Pembahasan
33		
4.3.1.	Diagram Kestabilan Api Difusi	
34		

4.3.2. Visualisasi Api Difusi
39

BAB V PENUTUP

45
5.1 Kesimpulan 45
5.2 Saran 45

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

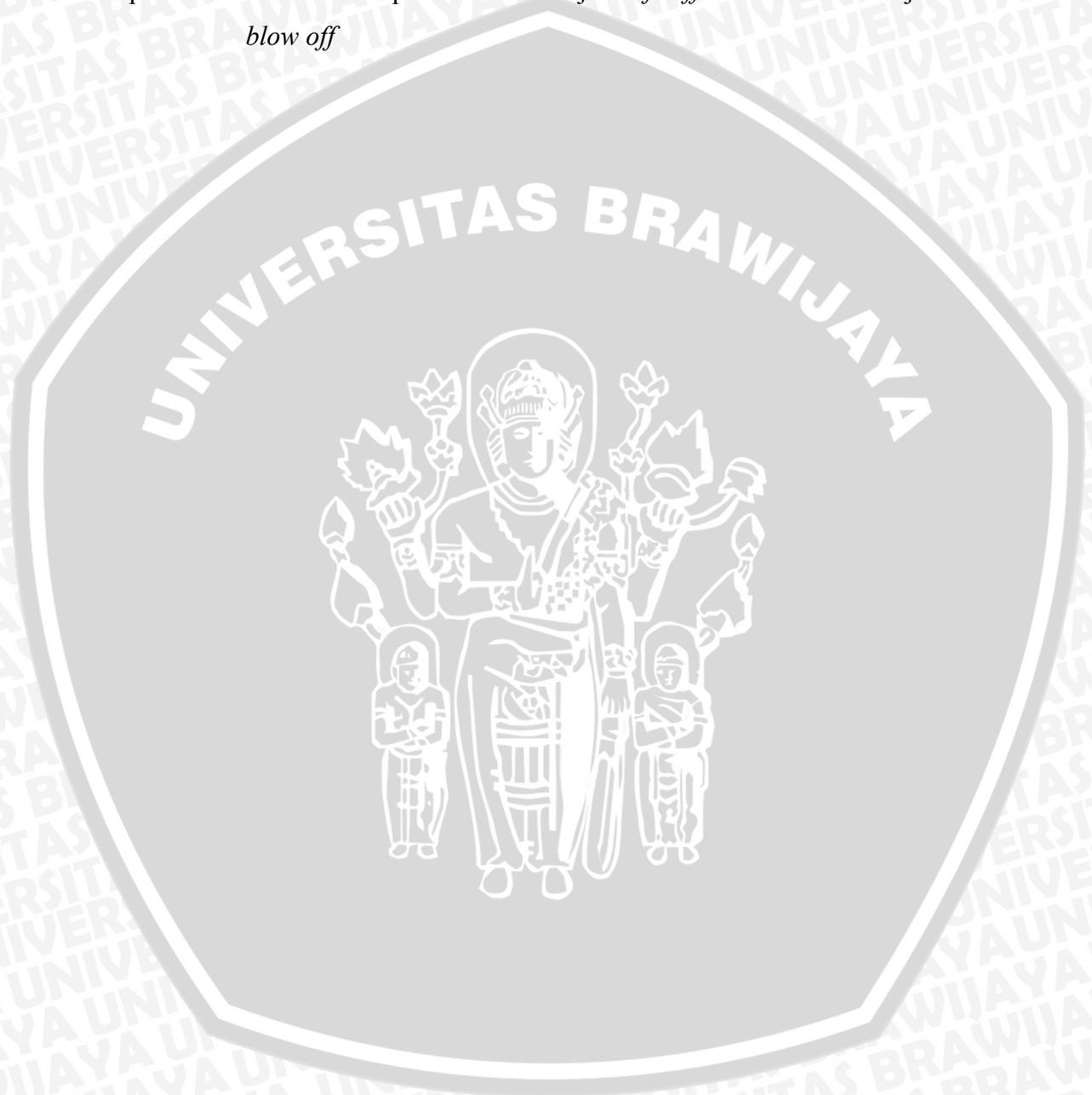
No	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi udara kering	6
Tabel 2.2	Spesifikasi untuk <i>commercial propane</i> dan <i>n-butane</i>	11
Tabel 3.1	Tabel Pengambilan Data	28

UNIVERSITAS BRAWIJAYA



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Data Hasil penelitian
Lampiran 2	Pengolahan data hasil penelitian
Lampiran 3	Bentuk dan dimensi nosel
Lampiran 4	Visualisasi api saat mulai terjadi <i>lift off</i> dan saat akan terjadi <i>blow off</i>



RINGKASAN

Badarus Syamsi Arifin, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Februari 2007, **Pengaruh Variasi Sudut Alur *Swirl Nozzle* dan *Circular Nozzle* terhadap Batas *lift off* dan Batas *blow off* pada Pembakaran Api Difusi**, Dosen Pembimbing : Prof. Ir. Sudjito, Ph.D. dan Lilis Yuliati, ST, MT.

Pembakaran merupakan salah satu elemen penting dalam dunia industri khususnya industri yang berhubungan dengan pembakaran. Banyak cara yang telah dilakukan untuk mendapatkan hasil pembakaran yang sempurna. Untuk dapat menghasilkan pembakaran yang sempurna maka bahan bakar dan udara harus bercampur secara homogen. Campuran yang homogen dapat diperoleh apabila aliran fluidanya dibuat turbulen. Banyak cara yang dapat digunakan untuk membuat alirannya homogen ialah dengan pemasangan *swirling vane*, *bluff body*, atau dengan pemberian udara dengan tangensial. Selain itu, sebenarnya ada suatu cara lagi yaitu dengan memasang *swirl nozzle*. *Swirl nozzle* berfungsi untuk mengalirkan fluida cair dalam bentuk butiran halus atau *droplet*. Dengan pemasangan *swirl nozzle* diharapkan bahan bakar dan udara bercampur secara homogen sehingga pembakaran yang terjadi mendekati sempurna. Dengan bercampurnya secara homogen maka api akan lebih stabil sehingga sulit terjadi *lift off* ataupun *blow off*

Dalam penelitian ini metode yang dipakai adalah metode eksperimental nyata (*true experimental research*) yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk mengetahui Pengaruh Variasi Sudut Alur *Swirl Nozzle* dan *circular nozzle* terhadap Batas *lift off* dan Batas *blow off* pada Pembakaran Api Difusi, Penelitian ini menggunakan variabel bebas berupa variasi sudut alur *swirl nozzle* 30°, 60° 90° serta nosel konvergen dan variasi kecepatan udara sebesar 0,507 m/s, 0,635 m/s, 0,742 m/s, 0,829 m/s, 0,896 m/s, sedangkan variabel terikatnya adalah kecepatan udara saat mengalami *lift off* dan *blow off*.

Dari pengujian diperoleh bahwa *swirl nozzle* dengan sudut alur 30° memiliki batas *lift off* dan batas *blow off* terbesar yang menunjukkan bahwa nosel tersebut paling stabil jika dibandingkan dengan yang lainnya. batas *lift off* terbesar terjadi pada kecepatan udara sebesar 0,507 m/s dengan kecepatan bahan bakar sebesar 3,278 m/s sedangkan batas *blow off* terbesar terjadi pada kecepatan udara 0,507 m/s dengan kecepatan bahan bakar 17,019 m/s

Kata kunci : sudut alur, *swirl nozzle*, *lift off*, *blow off*

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Saat ini telah banyak ilmu pengetahuan yang berkembang di dunia keteknikan, diantaranya adalah ilmu yang berhubungan dengan proses pembakaran dan mekanika fluida. Di dalam mekanika fluida dipelajari tentang sifat-sifat aliran fluida, baik itu fluida *incompressible* maupun *compressible*. Fluida yang banyak di pakai dalam dunia industri saat ini adalah *Liquifield Petroleum Gas* (LPG) dimana gas LPG banyak dipakai untuk kegiatan rumah tangga yaitu di pada kompor gas. Kompor gas yang beredar di masyarakat masih belum menggunakan *swirl nozzle* akan tetapi dari gas LPG langsung dialirkan melalui laluan (nosel sederhana) saja.

Mengingat betapa pentingnya pembakaran dalam bidang rekayasa, maka telah dilakukan berbagai penelitian tentang teknologi pembakaran yang bertujuan untuk memperbaiki unjuk kerja dari proses pembakaran, baik itu dari segi efisiensi maupun hasil prosesnya. Hal ini dilakukan sebagai usaha untuk menemukan sesuatu yang inovatif ataupun penerapan penemuan-penemuan baru tersebut bagi kehidupan manusia. Mulai dari rekayasa proses, ruang bakar, maupun bahan bakar, dimana semuanya itu bertujuan sama yaitu menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna. Dari segi aerodinamika pembakaran, proses pembakaran akan ditinjau dari aspek aliran, gerakan api, dan kestabilan nyala api terjadi dalam proses pembakaran.

Pembakaran dapat diklasifikasikan menjadi dua hal berdasarkan kondisi pencampuran bahan bakar dan oksidan yaitu pembakaran *premix* dan pembakaran *nonpremix*(difusi). Pembakaran difusi adalah proses pembakaran antara bahan bakar dan udara, dimana keduanya tidak bercampur dulu secara mekanik melainkan bercampur sendiri secara alami yaitu difusi. Pembakaran difusi dapat dilihat pada berbagai proses pembakaran seperti nyala lilin, api korek api, dan api yang terjadi akibat adanya bencana kebakaran.

Kestabilan api dalam proses pembakaran memegang peranan yang sangat penting. Disebut stabil jika api tetap stasioner pada posisi tertentu, dimana peristiwa tersebut terjadi apabila kecepatan gas reaktan sama dengan kecepatan rambatan api. Ada beberapa hal yang menyebabkan ketidak stabilan api antara

lain *flash back*, *lift off*, *blow off*, dan *yellow tipping*. *Flash back* terjadi apabila dalam proses pembakaran kecepatan api lebih besar dari kecepatan gas reaktan, sehingga api akan bergerak mendekati mulut nosel. *Lift off* terjadi apabila kecepatan gas reaktan lebih besar dari kecepatan api maka api akan bergerak menjauhi mulut nosel. *Blow off* merupakan peristiwa padamnya api yang terjadi akibat kecepatan gas reaktan jauh lebih besar dari pada kecepatan api sehingga tidak sempat lagi terjadi proses pembakaran. Sedangkan *yellow tipping* terjadi apabila pembakaran yang terlalu kaya bahan bakar ataupun udara sehingga menyebabkan pembakaran yang tidak sempurna.

Sedangkan untuk meningkatkan daerah kestabilan api, banyak penelitian yang telah dilakukan, tujuannya adalah untuk mendapatkan proses dari hasil pembakaran yang stabil dan mempunyai efisiensi yang tinggi. Contoh penelitian tersebut antara lain pemasangan *swirling vanes*, pemasangan *bluff body* dan lain sebagainya.

Untuk dapat menghasilkan pembakaran yang sempurna maka bahan bakar dan udara harus bercampur secara homogen. Campuran yang homogen dapat diperoleh apabila aliran fluidanya (baik udara ataupun bahan bakar) dapat dibuat turbulen. Salah satu cara yang dapat digunakan untuk membuat alirannya turbulen adalah dengan memasang *swirl nozzle*. Dengan *swirl nozzle* juga diharapkan bahan bakar akan bercampur dengan lebih homogen dengan udara sehingga api akan lebih stabil. Batas kestabilan api dapat ditunjukkan dari batas terjadinya *lift off* dan batas terjadinya *blow off*. Dengan kata lain, dengan pemasangan *swirl nozzle* diharapkan api tetap terjaga stasioner terjaga dari peristiwa *lift off* dan *blow off*. Untuk mengetahui besarnya pengaruh variasi *swirl nozzle*, maka perlu dilakukan penelitian khususnya terhadap fenomena *lift off* dan *blow off*. Dalam hal ini yang diteliti adalah pengaruh variasi jenis nosel antara nosel konvergen dan *swirl nozzle* serta variasi sudut alur pada *swirl nozzle* terhadap batas terjadinya *lift off* dan *blow off*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, disusun rumusan masalah sebagai berikut: Bagaimana pengaruh variasi *swirl nozzle* dengan sudut alur yang divariasikan terhadap batas *lift off* dan *blow off* pada pembakaran difusi, serta di bandingkan dengan nosel konvergen.

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Fluida kerja yang digunakan adalah LPG.
2. Aliran fluida dalam instalasi bersifat *steady*.
3. Jenis nosel yang digunakan adalah nosel konvergen dan *swirl nozzle* dengan sudut alur 30°, 60° dan 90°
4. Kondisi lingkungan dianggap konstan.

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin diperoleh dari penelitian ini adalah mengetahui pengaruh variasi model nosel konvergen dan variasi sudut alur pada *swirl nozzle* terhadap batas *lift off* dan *blow off* pada pembakaran difusi.

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang bisa didapatkan dari penelitian ini adalah :

1. Sebagai bahan pertimbangan bagi dunia industri khususnya industri yang berhubungan dengan pembakaran khususnya kompor gas dengan menggunakan *swirl nozzle* untuk dapat meningkatkan efektifitas pembakaran.
2. Sebagai referensi dan dasar pendekatan bagi penelitian selanjutnya.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

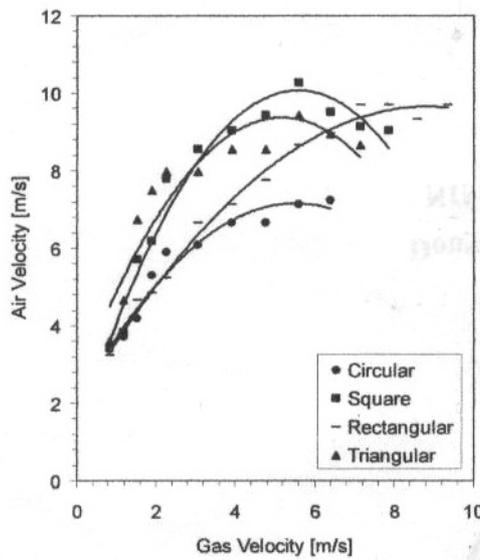
2.1. Penelitian-penelitian Terdahulu

Takahashi dan Schmoll (1990) melakukan penelitian tentang kriteria *lift off* api difusi jet. Penelitian ini dilakukan dengan memvariasikan ketebalan dasar pemegang api (*lip thickness*) yaitu 0,2 mm, 1,2 mm, dan 2,4 mm dengan diameter saluran udara 26,92 mm. Bahan bakar yang digunakan metana (>98%). Dari hasil penelitian ini diperoleh kestabilan api dipengaruhi oleh ketebalan dasar pemegang api, dimana kestabilan terbesar terjadi pada *lip thickness* terbesar yaitu 2,4 mm

Broadwell et al (1984) melakukan penelitian untuk mengetahui terjadinya *blow off* api difusi pada pembakaran gas dengan variasi diameter *burner*. Ternyata, ditemukan suatu korelasi linear antara kecepatan *blow off* dan diameter *burner*.

Mendukung penelitian sebelumnya, Tangirala, et al (1987) dan Masri, et al (2004) dalam penelitiannya menyimpulkan bahwa peningkatan daerah kestabilan api difusi diperoleh dengan memberikan *swirl* (komponen kecepatan tangensial) pada udara pembakaran.

Phillips dan Birouk (2005) meneliti pengaruh bentuk nosel asimetri (dengan penampang berbentuk bujur sangkar, segi empat dan segitiga sama sisi) terhadap *blow off* api difusi pada pembakaran metana (CH_4). Dari penelitian ini disimpulkan bahwa bentuk nosel tidak simetri mempunyai daerah kestabilan api yang lebih luas dan kecepatan *blow off* yang lebih tinggi bila dibandingkan nosel *circular*. Hal ini disebabkan oleh *spreading* (penyebaran) bahan bakar ke udara lebih besar sehingga mengakibatkan *mixing* (pencampuran) antara bahan bakar dan udara pembakaran yang lebih homogen.



Gambar 2.1 : *Blow off* pada api difusi dengan variasi bentuk nosel
 Sumber : Philip dan Birouk, 2005

Hadiyana (2005) menganalisa tentang pengaruh variasi sudut *swirling vanes* (sudut $10^\circ, 20^\circ, 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$) terhadap kestabilan nyala dan distribusi temperatur pada api difusi *annulus jet*. dari hasil pengamatan disimpulkan bahwa semakin besar sudut *swirling vane* maka kestabilan akan semakin meningkat. Daerah kestabilan api difusi *annulus jet* diperoleh pada sudut *swirling vane* 50° .

Wiyono (2005) melakukan penelitian dengan membuat konsep aliran yang di *swirl* adalah aliran dalam nosel. Dari konsep tersebut dianalisa pola aliran *swirl nozzle* dengan memvariasikan sudut alur *spray nozzle* yakni dengan sudut $30^\circ, 60^\circ, \text{ dan } 90^\circ$. fluida yang digunakan adalah air. Dari hasil penelitian didapatkan kesimpulan bahwa sudut *spray nozzle* dengan sudut alur 30° lebih besar dibandingkan dengan sudut alur 60° dan 90° .

2.2 Proses Pembakaran

Pembakaran merupakan reaksi oksidasi yang terjadi antara bahan bakar dengan udara (oksigen) dengan bantuan energi dari luar (energi aktivasi) disertai timbulnya cahaya dan menghasilkan kalor (Turns, 1996: 6). Energi tersebut berfungsi sebagai pemutus ikatan-ikatan bahan bakar menjadi radikal (ion) dan sangat reaktif. Ion-ion akan bereaksi dengan oksigen membentuk ikatan yang lebih kuat dan kelebihan-kelebihan energi ikatan akan dilepas ke dalam sistem, sehingga menyebabkan kenaikan temperatur yang sangat tinggi.

Persamaan reaksi pembakaran secara umum dituliskan sebagai berikut (Wijayanti, 2005: 1):



2.2.1 Reaksi kimia pada proses pembakaran

Pembakaran ideal adalah pembakaran yang dapat menghasilkan produk pembakaran secara sempurna. Kondisi ini disebut dengan kondisi stoikiometri dimana produk pembakaran untuk senyawa hidrokarbon adalah CO₂, H₂O, dan N₂ sebagai *inert* gas. Pembahasan akan dibatasi pada proses pembakaran antara bahan bakar hidrokarbon dan oksigen dari udara. Udara memiliki komposisi sebagai berikut:

Tabel 2.1 Komposisi udara kering

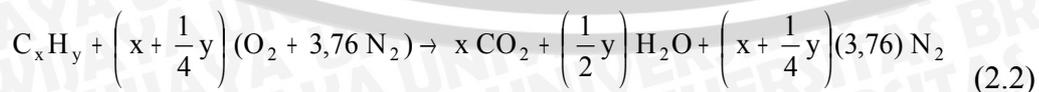
Unsur / senyawa	Persentase volume (%)	Persentase berat (%)	Berat molekul Lb per mole
Oksigen (O ₂)	20.99	23.19	32.00
Nitrogen (N ₂)	78.03	75.47	28.016
Argon (Ar)	0.94	1.30	39.944
Karbon dioksida (CO ₂)	0.03	0.04	44.003
Hidrogen (H ₂)	0.01	0.00	2.016
Udara kering	100.00	100.00	28.967

Sumber : Tjokroawidjojo, 1986 : 47

Untuk perhitungan dalam reaksi pembakaran, udara dianggap terdiri dari 21% volume O₂ dan 79% volume N₂, sehingga untuk penggunaan 1 mol O₂ akan

melibatkan penggunaan $\left(\frac{79,0}{21,0} \right) = 3,76$ mol N₂.

Dalam proses pembakaran sempurna, semua C bereaksi menjadi CO₂ dan semua H₂ akan bereaksi menjadi H₂O. Reaksi pembakaran sempurna antara bahan bakar (C_xH_y) dengan udara secara matematis dituliskan sebagai berikut (Wardana, 1995: 21):



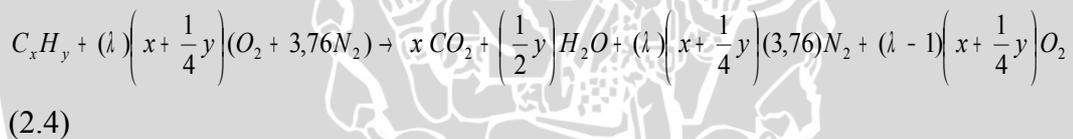
Pada semua proses pembakaran, diusahakan terjadi pembakaran yang sempurna. Untuk memperoleh hal ini, ada empat syarat yang harus dipenuhi, yaitu :

1. Bahan bakar menguap secara efisien
2. Digunakan cukup udara pembakaran
3. Terjadi campuran yang homogen antara bahan bakar dan udara
4. Suhu pembakaran cukup tinggi

Apabila syarat-syarat diatas tidak terpenuhi, maka akan terjadi pembakaran yang tidak sempurna. Reaksi pembakaran yang tidak sempurna misalnya seperti dibawah ini:



Untuk menghindari terbentuknya gas CO akibat pembakaran yang tidak sempurna maka salah satu cara untuk memperbesar kemungkinan terjadinya pembakaran sempurna adalah dengan menggunakan jumlah udara berlebih (*excess air*). Apabila digunakan udara pembakaran sebanyak λ x jumlah udara teoritis, persamaan reaksinya akan menjadi:



dengan: λ = faktor kelebihan udara
 $\lambda = 1$, apabila dipergunakan udara teoritis
 $\lambda > 1$, apabila dipergunakan udara berlebih
 $\lambda < 1$, apabila kekurangan udara

Penggunaan udara berlebih tersebut memerlukan sebuah parameter untuk menyatakan banyaknya udara pembakaran tiap satuan kuantitas bahan bakar. Parameter tersebut adalah *air-to-fuel ratio* (AFR). AFR dapat dinyatakan dalam mol udara per mol bahan bakar atau massa udara per massa bahan bakar, seperti terlihat pada persamaan berikut:

$$(AFR)_{\text{teoritis}} = \left(\frac{m_{\text{udara}}}{m_{\text{bahan bakar}}} \right)_{\text{teoritis}} = \left(\frac{\text{kg udara}}{\text{kg bahan bakar}} \right) \quad (\text{Turns, 1996: 19}) \quad (2.5)$$

Pada pembakaran stoikiometri dengan bahan bakar LPG *Mix* 70% propana dan 30% butana nilai AFRnya adalah 15,567.

Perbandingan antara $(AFR)_{\text{teoritis}}$ dengan AFR_{aktual} dinyatakan dengan *equivalence-ratio* (Φ), sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{(AFR)_{\text{teoritis}}}{(AFR)_{\text{aktual}}} = \frac{1}{\lambda} \quad (\text{Turns, 1996: 19}) \quad (2.6)$$

dengan: $\Phi > 1$, apabila campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixtures*)

$\Phi < 1$, apabila campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixtures*)

$\Phi = 1$, apabila campuran stoikiometri

Salah satu keuntungan dari proses pembakaran adalah dapat memperoleh energi yang cepat dengan adanya reaksi kimia pembakaran yang berlangsung sangat cepat. Oleh karena itu peningkatan kecepatan reaksi pembakaran merupakan faktor penting di dalam pembakaran. Hal-hal yang dilakukan untuk meningkatkan kecepatan reaksi pembakaran :

- Membuat aliran turbulen untuk pengadukan bahan bakar dan udara
- Memperluas daerah kontak reaksi antara bahan bakar dan udara
- Meningkatkan temperatur pembakaran

Hal yang paling mudah untuk dilaksanakan pada bagian a dan b dengan cara memvariasikan model nosel yang akan digunakan di dalam penelitian yakni nosel konvergen dan variasi sudut alur *swirl nozzle*. Dengan variasi tersebut maka akan didapatkan daerah kontak yang paling luas dan turbulen sehingga reaksi pembakaran yang berlangsung mendekati sempurna.

2.2.2 Proses pembakaran gas

Proses pembakaran gas terjadi lebih cepat daripada fase cair atau padat karena fase gas memiliki jarak antar atom yang lebih besar daripada kedua fase lainnya sehingga percampuran antara bahan bakar dan udara dapat terjadi dengan lebih baik. Pembakaran terjadi pada fase uap (kecuali untuk unsur karbon). Fase uap pada dasarnya sama dengan fase gas, ditinjau dari jarak antar partikelnya. Fase cair dan fase padat harus lebih dahulu menjadi gas sebelum benar-benar terbakar, sedangkan bahan bakar pada fase gas tidak perlu lagi bertransformasi menjadi fase lainnya. Hal ini menjadi dasar bagi batasan masalah penelitian ini. Proses pembakaran pada bahan bakar gas dapat terjadi melalui salah satu atau kombinasi dari ketiga proses di bawah ini (Tjokroawidjojo, 1996: 39)

a. *Homogeneous combustion*

Pembakaran ini terjadi pada suhu rendah, sekitar 400°C, dan seringkali pada pembakaran ini tidak menunjukkan adanya *flame front*. Kecepatan reaksinya

terutama tergantung pada susunan campuran, tekanan, temperatur awal dari campuran dan tergantung pada faktor perpindahan panas dari atau ke sekelilingnya.

b. *Isopiestic flame propagation*

Merupakan salah satu bentuk pembakaran dimana nyala yang timbul pada reaksi pembakaran memberikan temperatur yang tinggi hingga pembakaran dapat berjalan dengan sendirinya. Pada pembakaran ini tidak terjadi kenaikan tekanan karena adanya kenaikan volume gas, sehingga dapat dikatakan bahwa gas melakukan ekspansi bebas. Pembakaran ini biasa dijumpai dalam praktek.

c. *Pressure temperature flame propagation*

Pembakaran ini menimbulkan nyala yang membangkitkan suhu yang tinggi sehingga pembakaran dapat terjadi dengan sendirinya. Pada pembakaran ini tidak terjadi kenaikan volume karena adanya kenaikan tekanan gas.

Pembakaran yang dapat diamati dengan adanya nyala merupakan pembakaran *isopiestic flame propagation* dan *pressure temperature flame propagation*. Pada kenyataannya, kedua jenis pembakaran yang menimbulkan nyala tersebut adalah pembakaran yang digunakan di dunia industri, sebab kedua jenis pembakaran itulah yang dapat memberikan atau membangkitkan suhu tinggi yang merupakan tujuan dari proses pembakaran di industri. Pembakaran homogen hanyalah pembakaran yang terkondisikan dan dapat dibuat di laboratorium, namun tidak untuk kepentingan komersil.

2.3 LPG (*Liquified Petroleum Gas*)

LPG dihasilkan melalui proses pengolahan gas alam dan gas minyak bumi di instalasi pencairan dan pemisahan (*Gas Liquid Extraction Plant*). Proses produksi LPG diawali oleh pembersihan gas alam dari berbagai kotoran. Selanjutnya gas yang sudah bersih dikeringkan, lalu didinginkan sehingga menjadi cair. Gas yang sudah cair ini dipisahkan dengan proses *physico-chemical* di instalasi pemisahan berturut-turut mengeluarkan senyawa metana (CH_4), ethana (C_2H_6), propana (C_3H_8), butana (C_4H_{10}) dan seterusnya. LPG merupakan suatu senyawa hidrokarbon dengan karbon yang rendah dan termasuk senyawa

hidrokarbon jenuh (*alkane*). LPG bisa dibuat dari senyawa propana (*propane*), butane (*butane*) atau campuran keduanya dengan perbandingan tertentu. Berdasarkan penggunaannya, LPG dibedakan menjadi (www.pertamina.com, September 2006):

1. LPG *Mix*

Merupakan campuran propana dan butana dengan komposisi 70% volume propana dan 30% volume butana dan ditambahkan zat odor yaitu *mercaptant*, yang berbau menyengat. Biasanya digunakan sebagai bahan bakar di rumah tangga.

2. LPG *Propane*

Terdiri dari 95% propana dan ditambahkan zat odor yaitu *mercaptant*, yang berbau menyengat.

3. LPG *Butane*

Terdiri dari 97.5% butana dan ditambahkan zat odor yaitu *mercaptant*, yang berbau menyengat. LPG propana dan LPG butana biasanya digunakan sebagai bahan bakar di industri.

Dalam penelitian ini bahan bakar yang digunakan adalah LPG (*Liquified Petroleum Gas*) *Mix* produksi Pertamina dengan komposisi 70 % volume propana dan 30% volume butana. Berikut spesifikasi untuk *commercial propane* dan *n-butane*:

Tabel 2.2. Spesifikasi untuk *commercial propane* dan *n-butane*

Properties		Hydrocarbon	propane	n - butane
High heating value	(kcal.kg ⁻¹)		12.034	11.832
	(kcal.m ⁻³)		24.290	31.990
Low heating value	(kcal.kg ⁻¹)		11.079	10.926
	(kcal.m ⁻³)		22.370	29.540
kg air / kg fuel			15,63	15,42
(NTP) m ³ air / kg fuel			12,09	11,93
(NTP) m ³ air / m ³ fuel			24,41	32,25
Maximum CO ₂ in wet flue gas (% volume)			11,56	11,90
Maximum CO ₂ in dry flue gas (% volume)			13,64	13,99
Temperature (°C) of adiabatic combustion In stoichiometric air at (°C) and 1 bar			1.994	1.996
Temperature of autoignition (°C) in stoichiometric air			480	420

Sumber: Monnot, 1984: 8

Dalam kondisi atmosfer, elpiji akan berbentuk gas. Volume elpiji dalam bentuk cair lebih kecil dibandingkan dalam bentuk gas untuk berat yang sama. Karena itu elpiji dipasarkan dalam bentuk cair dalam tabung-tabung logam bertekanan. Untuk memungkinkan terjadinya ekspansi panas (*thermal expansion*) dari cairan yang dikandungnya, tabung elpiji tidak diisi secara penuh, hanya sekitar 80-85% dari kapasitasnya. Rasio antara volume gas bila menguap dengan gas dalam keadaan cair bervariasi tergantung komposisi, tekanan dan temperatur, tetapi biasanya sekitar 250:1.

Tekanan dimana elpiji berbentuk cair, dinamakan tekanan uap-nya, juga bervariasi tergantung komposisi dan temperatur; sebagai contoh, dibutuhkan tekanan sekitar 220 kPa (2,2 bar) bagi butana murni pada 20 °C (68 °F) agar mencair, dan sekitar 2,2 MPa (22 bar) bagi propana murni pada 55°C (131 °F)

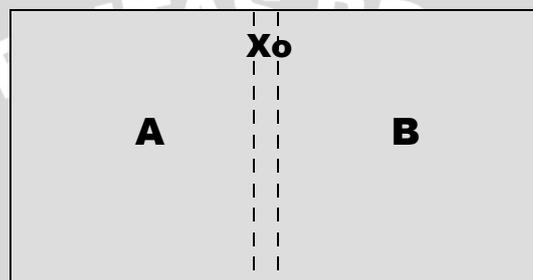
Sifat dari LPG terutama adalah sebagai berikut :

- Cairan dan gasnya sangat mudah terbakar
- Gas tidak beracun, tidak berwarna dan biasanya berbau menyengat
- Gas dikirimkan sebagai cairan yang bertekanan di dalam tangki atau silinder.
- Cairan dapat menguap jika dilepas dan menyebar dengan cepat.

- Gas ini lebih berat dibanding udara sehingga akan banyak menempati daerah yang rendah.

2.4 Pembakaran Difusi

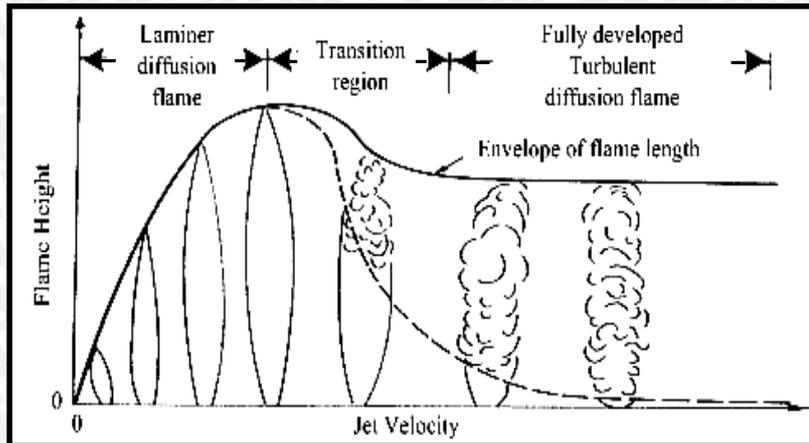
Pembakaran difusi adalah pembakaran antara bahan bakar dan udara yang tidak bercampur lebih dulu secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Pembakaran difusi tersebut dapat dilihat pada berbagai proses pembakaran seperti nyala lilin, api korek api, api kebakaran, pembakaran di industri, pembakaran di turbin gas dan lain sebagainya.



Gambar 2.2 : Difusi komponen A ke dalam komponen B
Sumber : Holman, 1985: 533

Pada gambar 2.2 dimisalkan terdapat ruangan tertutup yang disekat oleh bidang yang khayal X_0 . Bagian di sebelah kiri X_0 berisi partikel gas A, sedangkan bagian di sebelah kanan X_0 berisi partikel gas B pada tekanan yang sama, sehingga tidak ada potensial aliran. Sesaat setelah bidang X_0 dibuka, partikel gas A bergerak secara ke dua arah, demikian pula partikel gas B, sehingga dalam ruangan tercapai keseimbangan konsentrasi pada gas A dan gas B. Laju difusi diberikan oleh hukum *Fick* tentang difusi, yang menyatakan bahwa fluks massa dari satu konstituen per satuan luas berbanding lurus dengan gradien suhu.

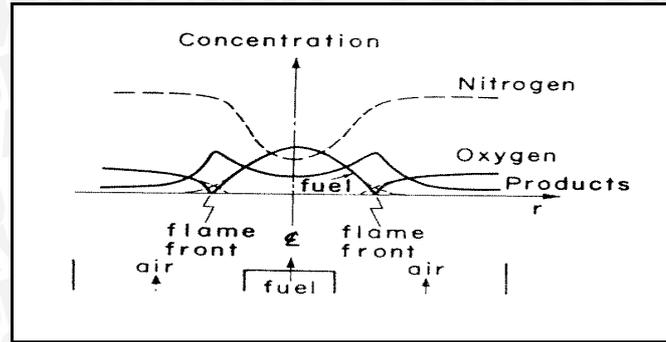
Salah satu jenis api pada pembakaran difusi adalah api difusi *jet*. Api difusi *jet* adalah api difusi yang terjadi karena aliran *jet* bahan bakar dari nosel ke dalam aliran udara pada *burner*. Nyala api difusi *jet* terdiri dari api difusi *jet* laminar dan api difusi *jet* turbulen.



Gambar 2.3 : Perubahan aliran dan struktur api
 Sumber : Kuo, 1986: 359

Gambar 2.3 menjelaskan tentang perubahan aliran api difusi *jet* laminar ke api difusi *jet* turbulen. Perubahan aliran api tersebut disebabkan oleh pemanjangan api dan peningkatan kecepatan aliran (*jet*) bahan bakar. Peningkatan kecepatan bahan bakar mengakibatkan karakter api berubah. Pada kecepatan *jet* bahan bakar yang rendah, struktur api adalah laminar. Panjang api laminar tersebut akan meningkat seiring dengan peningkatan kecepatan *jet* bahan bakarnya sampai pada suatu batas aliran api menjadi turbulen. Pada kondisi transisi terjadi perubahan dari aliran laminar menjadi turbulen. Panjang api laminar akan mengalami penurunan seiring dengan peningkatan kecepatan *jet* bahan bakar dan panjang api turbulen akan mengalami kenaikan seiring dengan peningkatan kecepatan *jet* bahan bakarnya, kemudian panjang api total akan menurun karena kecepatan pengadukan api yang turbulen.

Nyala api (*flame*) adalah daerah tempat terjadinya reaksi pembakaran. Nyala api dibatasi oleh permukaan nyala (*flame front*), yaitu permukaan yang membatasi gas yang terbakar dan tidak terbakar. Bentuk *flame* ditentukan oleh *mixing* bahan bakar dan udara dalam ruang bakar. Proses pembakaran dan *flame* akan terjadi pada daerah dimana campuran bahan bakar dan udara mendekati stoikiometrik. Konsentrasi bahan bakar, udara dan produk hasil pembakaran dalam ruang bakar dapat dilihat pada gambar 2.4.

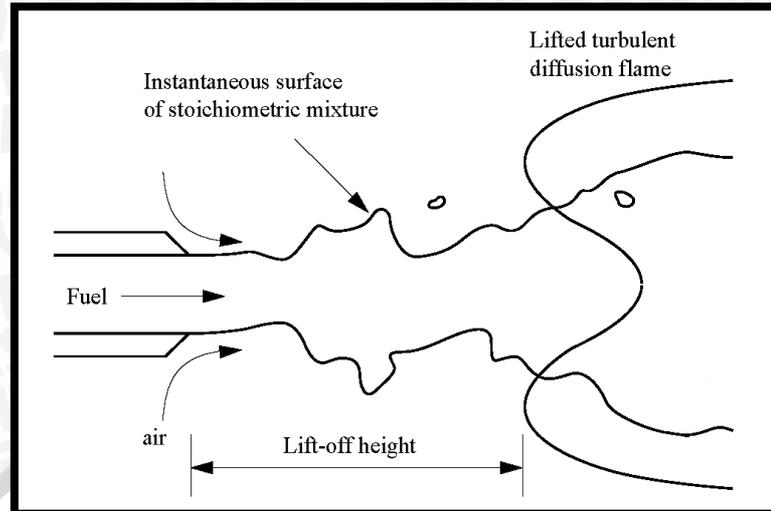


Gambar 2.4 : Reaksi yang terjadi pada api
 Sumber : Kuo Kenneth Kuan Yuan, 1986: 348

Batas kestabilan api pada umumnya menjelaskan batas operasional dari sistem pembakaran. Pada penelitian ini terdapat dua kondisi aliran batas yang berhubungan dengan kestabilan api difusi, yaitu *lift off* dan *blow off*. Kondisi kritis kestabilan ini sangat tergantung pada konfigurasi alirannya.

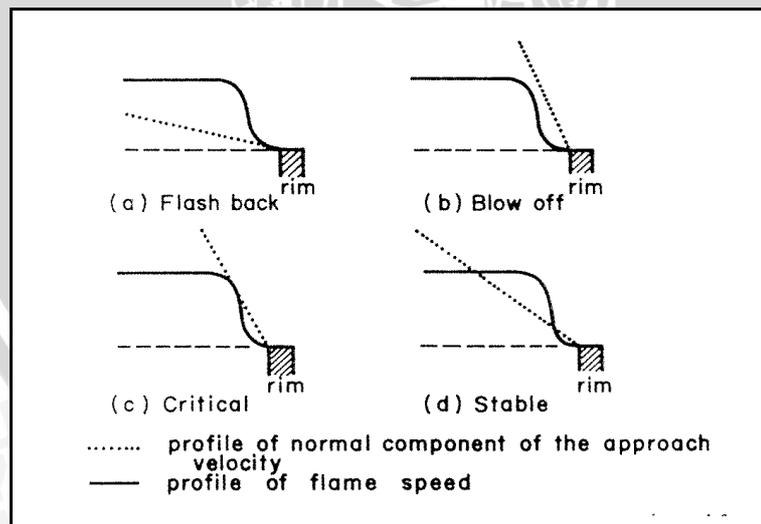
Jika kecepatan reaktan lebih kecil daripada kecepatan produk maka api akan bergerak ke mulut nosel dan kejadian ini disebut *flash back*. Jika kecepatan reaktan lebih besar daripada kecepatan produk maka api akan bergerak menjauh dari mulut nosel dan kejadian ini disebut *blow off*. *Flame stretch* atau pemanjangan api terjadi akibat efek *blow off* yaitu kecepatan reaktan yang lebih cepat dari kecepatan pembakaran dan juga akibat gradien kecepatan dalam aliran terlalu besar yang mengakibatkan hilang panas dan laju reaksi menurun.

Kondisi *lift off* pada penelitian ini didefinisikan sebagai suatu kondisi api yang terjadi saat api mulai tidak menempel pada mulut nosel (Gambar 2.5). Hal ini terjadi karena kecepatan api lebih kecil dari kecepatan gas reaktan, sehingga api akan bergerak menjauhi mulut nosel.



Gambar 2.5 : Skema *lift off* pada api difusi jet
 Sumber : Peters, 1997: 95

Panjang *lift off* adalah jarak antara mulut nosel dan pangkal api. Panjang *lift off* akan meningkat seiring dengan penambahan kecepatan *jet* bahan bakar sampai api mengalami *blow off* (kondisi api menjadi padam setelah mengalami *lift off*). *Blow off* dapat terjadi bila api difusi telah melewati batas kritis *lift off*. Pada saat terjadi *blow off* telah dijelaskan bahwa api akan menjauhi nosel terlebih dahulu kemudian mati. Pada saat itu aliran udara yang terbentuk disekitar api akan berbeda karena api terbentuk di atas nosel, panas yang semakin hilang dan laju reaksi yang semakin menurun.



Gambar 2.6 : Jenis profil api
 Sumber : Kuo, 1986 : 324

Kondisi pembakaran yang stabil akan terjadi jika garis kecepatan gas reaktan menyinggung garis kecepatan pembakaran di dua titik seperti

ditunjukkan gambar 2.6 (d). Jika garis kecepatan reaktan tidak memotong garis kecepatan pembakaran, maka akan terjadi *blow off* yang ditunjukkan pada gambar 2.6 (b). Pada kondisi lain jika garis kecepatan gas reaktan memotong garis kecepatan pembakaran di dua titik, yaitu kondisi dimana kecepatan gas reaktan lebih rendah daripada kecepatan pembakaran, maka akan terjadi peristiwa *flash back* ditunjukkan pada gambar 2.6 (a). Peristiwa ini merupakan rambatan dengan kecepatan yang tinggi menuju mulut nosel.

Baik *lift off* maupun *blow off* merupakan kondisi yang harus dihindari dalam proses pembakaran. Takahashi dalam “*Lifting Criteria of Jet Diffusion Flame*” (1990) menyatakan bahwa kondisi *lift* dipengaruhi oleh pangkal api akibat ketidakseimbangan antara kecepatan penyalaan maksimum. Selain pengaruh kecepatan pancar bahan bakar yang membuat angka Reynold aliran bertambah besar, sebenarnya suatu fenomena *lift* dipengaruhi oleh banyak faktor. Lee (1994), menyatakan bahwa semakin besar diameter pipa bahan bakar maka kecenderungan untuk mengalami *lift off* semakin sulit. Takahashi (1990), juga menyatakan bahwa *lift* dipengaruhi oleh *lip thickness* pipa bahan bakar dan keturbulensian aliran dalam pipa.

2.5 Penyalaan dan Batas Ketidaknyalaan (*Limit of Inflammability*)

Penyalaan adalah suatu proses transisi dari keadaan tidak reaktif ke keadaan reaktif dan untuk menimbulkan transisi ini diperlukan rangsangan dari luar untuk menimbulkan proses termokimia yang berjalan dengan sendirinya, yang kemudian diikuti oleh transisi yang terjadi dengan sangat cepat untuk menghasilkan proses pembakaran yang mandiri (Kuo, 1986: 734). Pembakaran mandiri adalah proses pembakaran yang dapat berlangsung terus-menerus selama bahan bakar dan udara pembakaran masih tersedia, tanpa memerlukan sebab-sebab eksternal apapun dan yang menjaga proses itu berlangsung adalah proses itu sendiri.

Penyalaan, sebagaimana proses lainnya memerlukan tingkat energi tertentu agar dapat berlangsung. Jika tingkat energi yang diperlukan tidak mencukupi, maka penyalaan tidak akan terjadi, sekalipun telah ada cukup bahan bakar dan udara pembakaran. Sebagai suatu proses transisi, penyalaan memiliki kondisi awal tanpa energi, yang berarti bahwa tingkat energi yang ada di

lingkungan penyalaan masih belum cukup untuk menimbulkan penyalaan. Karena itu diperlukan tambahan energi dari luar, tambahan energi tersebut disebut energi aktifasi.

Penyalaan seperti pembakaran juga memerlukan syarat yang dikenal sebagai *3T rule of thumb ignition* (Kuo, 1986: 735):

1. Suhu (*temperature*)

Suhu harus cukup tinggi agar timbul reaksi kimia yang signifikan, berkaitan dengan energi aktifasi seperti dijelaskan pada awal bagian.

2. Waktu (*time*)

Waktu harus cukup lama agar panas masuk (yang berasal dari sebab eksternal) dapat diserap (melalui proses absorpsi) oleh reaktan sehingga proses termokimia dapat terjadi .

3. Turbulensi (*turbulence*)

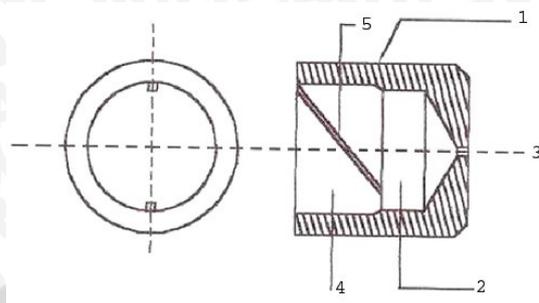
Turbulensi harus cukup besar agar terjadi pembakaran yang baik antara bahan bakar dan udara pembakaran, agar panas dapat dipindahkan dari konstituen yang bereaksi ke konstituen yang belum bereaksi.

2.6 Nosel Konvergen (*circular nozzle*) dan *swirl nozzle*

Dalam pembakaran, nosel digunakan untuk mengalirkan bahan bakar ke ruang bakar. Pola aliran bahan bakar dalam ruang bakar ditentukan oleh model nosel. Pola aliran bahan bakar dalam ruang bakar menentukan proses pencampuran (*mixing*) antara bahan bakar dengan udara. Hal ini akan menentukan kesempurnaan dan kestabilan dalam proses pembakaran difusi. Karena itu perlu diperhatikan pemilihan nosel bahan bakar dalam pembakaran difusi.

Fungsi utama Nosel adalah merubah energi tekanan fluida masuk nosel menjadi energi kinetik atau kecepatan fluida keluar nosel. Dalam pembakaran gas biasanya digunakan model nosel konvergen (*circular nozzle*). Aliran bahan bakar dari nosel terdistribusi dalam daerah berbentuk silinder sepanjang sumbu ruang bakar. *Swirl nozzle* mulai banyak digunakan dalam pembakaran bahan bakar cair, menggantikan pemakaian *circular nozzle*. Hal ini dikarenakan *swirl nozzle* bisa menghasilkan *spray* bahan bakar dengan *droplet* yang halus pada tekanan yang lebih rendah bila dibandingkan dengan *circular nozzle*, *Swirl nozzle* memiliki

bagian-bagian utama yaitu alur/slot pada inti, *swirl chamber*, dan *orifice* seperti yang terlihat dari gambar 2.7 di bawah ini:



1. casing, 2. *swirl chamber*, 3. *orifice*, 4. inti,
5. alur/slot

Gambar 2.7 : Bagian – bagian *swirl nozzle*

Sumber : Anonimous, 2001

Dengan *swirl nozzle*, maka aliran bahan bakar akan di *swirl* sebelum keluar nosel sehingga bahan bakar akan lebih mudah mengalami turbulensi saat bahan bakar bercampur dengan udara. Turbulensi adalah suatu keadaan dimana partikel-partikel (massa-massa molar yang kecil) fluida bergerak dalam lintasan-lintasan yang sangat tidak teratur, yang mengakibatkan pertukaran momentum dari suatu bagian fluida ke bagian yang lainnya dengan cara yang agak menyerupai perpindahan molekuler. Dengan lintasan yang sangat tidak teratur inilah maka semakin mudah terjadi *mixing* antara bahan bakar dan udara.

2.7 Distribusi Kecepatan Dalam Aliran Berputar

Aliran berputar didefinisikan dengan perbandingan laju aliran berputar (G_ϕ) dengan laju aliran aksial (G_x). Bentuk ini dijabarkan sebagai berikut:

$$G_\phi = \int_0^{r_0} 2\pi \rho U W r^2 dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2.7)$$

dengan :

G_ϕ = laju aliran berputar ($\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$)

G_x = laju aliran aksial ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)

ρ = densitas udara ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

r = jari titik r dari sumbu burner dan r_0 jari-jari silinder *burner*.

U = kecepatan aksial di titik r ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

W = kecepatan tangensial di titik r ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Selama variasi tekanan dalam *burner* kecil, ρ diasumsikan konstan sehingga :

$$G_{\phi} = 2\pi \rho \int_0^{r_0} U W r^2 dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2.8)$$

Penjelasan untuk aliran aksial ditulis:

$$G_x = \int_0^{r_0} 2\pi \rho U^2 r dr + 2\pi \int_0^{r_0} \frac{\partial p}{\partial x} r dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2.9)$$

sehingga:

$$G_x = 2\pi \rho \int_0^{r_0} U^2 r dr + 2\pi \int_0^{r_0} \frac{\partial p}{\partial x} r dr \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2.10)$$

Bentuk kedua dalam penjelasan di atas untuk G_x adalah tekanan, dan tidak begitu berpengaruh jika penurunan tekanan statik di sumbu aksis *burner* kecil.

Percobaan menunjukkan bahwa $\frac{\partial p}{\partial x}$ tidak hanya kecil tetapi kenyataannya *uniform* pada bidang yang tegak lurus pada sumbu *burner*. Untuk merubah

perbandingan $\frac{G_{\phi}}{G_x}$ menjadi suatu nilai tidak berdimensi, G_x dikalikan dengan panjangnya, sebagai contoh r_0 . G_x dan nilai yang tidak berdimensi ini disebut sebagai angka *swirl* yang seringkali digunakan untuk menentukan intensitas gerakan berotasi. Angka *swirl* dirumuskan :

$$S = \frac{G_{\phi}}{r G_x} \quad (\text{Monnot, 1984: 93}) \quad (2.11)$$

Intensitas pembakaran untuk aliran yang bersirkulasi dipengaruhi oleh derajat dari *swirl* yang dipasang di dalam aliran. Derajat dari *swirl* tersebut ditunjukkan oleh *swirl number* (S), derajat *swirl* mengakibatkan terjadinya peningkatan ketebalan batas-batas *jet flow*. Lilley (1997) menyatakan bahwa semakin tinggi derajat *swirl*, maka tekanan ke arah radial akan menguat menjauhi mulut nosel, sehingga akan menggeser zona resirkulasi mendekati mulut nosel, akibatnya api akan mengalami penebalan ke arah radial dan pemendekan ke arah aksial.

2.8 Konservasi Massa.

Hukum konservasi massa pada suatu kontrol volume menyatakan bahwa laju perubahan massa dalam suatu sistem + fluks total massa yang masuk melalui *control surface* = 0. Secara matematis pernyataan tersebut diatas dinyatakan dengan :

$$\left(\frac{dM}{dt} \right)_{sistem} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho V dA \quad (2.12)$$

Dengan $\left(\frac{dM}{dt} \right)_{sistem} = 0$ maka,

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} \rho dV + \int_{cs} \rho V dA = 0 \quad (2.13)$$

Untuk aliran incompressible ($\rho = \text{kons tan}$), persamaan diatas menjadi:

$$\rho \frac{\partial}{\partial t} \int_{cv} dV + \rho \int_{cs} V dA = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \rho \int_{cs} V dA = 0 \quad (2.14)$$

Untuk volume control dengan ukuran dan bentuk yang tetap maka $V = \text{konstan}$ sehingga :

$$\rho \int_{cs} V dA = 0$$

Untuk aliran yang steady yang tidak bervariasi terhadap waktu :

$$\rho \int_{cs} V dA = 0 \quad (2.15)$$

Jadi persamaan konservasi massa untuk aliran fluida *incompressible*, steady :

$$\rho \int_{cs} V dA = 0$$

Untuk aliran fluida melewati orifis, maka persamaan diatas menjadi :

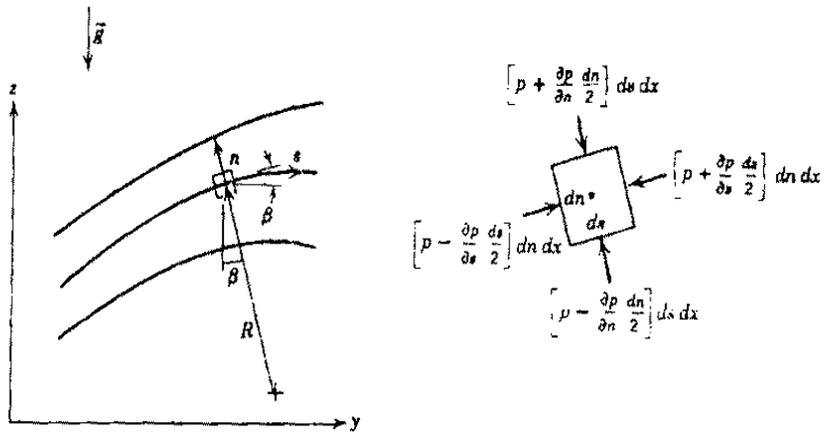
$$- |\rho V_1 A_1| + |\rho V_2 A_2| = 0$$

Atau

$$|\rho V_1 A_1| = |\rho V_2 A_2| \quad (2.16)$$

$$\dot{m} = |\rho VA| \text{ sehingga berlaku } \dot{m}_1 = \dot{m}_2 \quad (2.17)$$

2.9 Persamaan Bernouli



Gambar 2.8: Gerakan partikel fluida sepanjang streamline

Sumber : Fox, Robert.W, T.McDonald, Alan, 1994:221

Berdasarkan gambar 2.8 maka penulisan hukum kedua Newton

$$\Sigma F = m \cdot a_s \text{ disepanjang garis arus adalah } - \frac{\partial p}{\partial s} - \rho g \sin \beta = \rho a_s \quad (2.18)$$

Karena $\sin \theta = \frac{\partial z}{\partial s}$ maka jika persamaan tersebut disederhanakan didapatkan

$$- \frac{\partial p}{\partial s} - \rho g \frac{\partial z}{\partial s} = \rho a_s \quad (2.19)$$

Jika kecepatan V merupakan fungsi terhadap letak dan waktu maka $V = V(s,t)$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial s} ds + \frac{\partial V}{\partial t} dt$$

Atau

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{\partial V}{\partial s} \frac{\partial s}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial t}$$

Karena kecepatan disepanjang garis arus maka:

$$V = \frac{\partial s}{\partial t} \text{ dan } a_s = \frac{\partial V}{\partial t} = V \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{\partial V}{\partial t} \quad (2.20)$$

Dapat disederhanakan menjadi persamaan Euler :

$$- \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} - g \frac{\partial z}{\partial s} = \frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial s}$$

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + \vec{V} \frac{\partial \vec{V}}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} = 0 \quad (2.21)$$

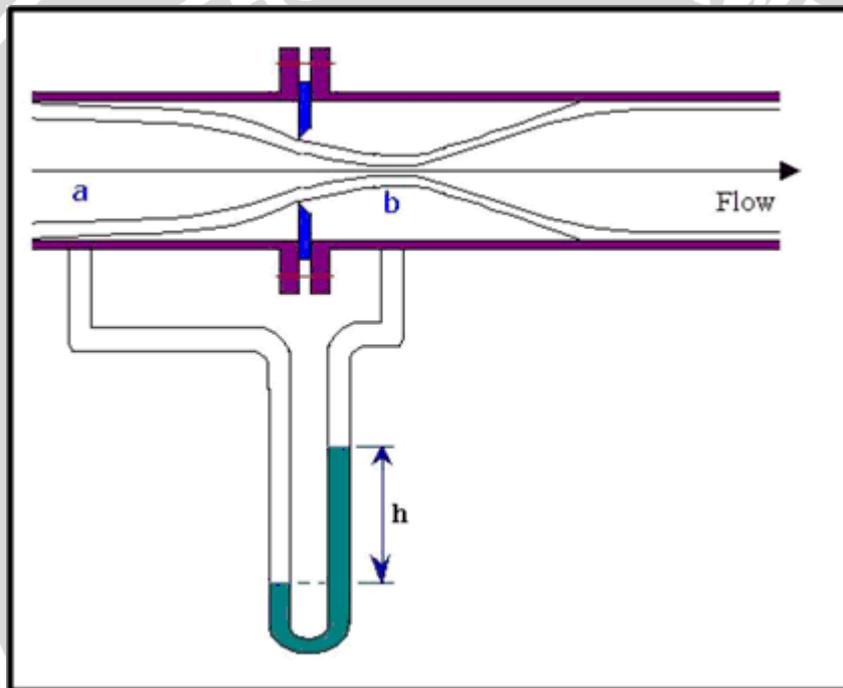
Persamaan ini disebut persamaan Euler untuk gerak sepanjang garis arus untuk fluida ideal (tidak viskos)

Untuk persamaan Euler aliran steady dan *incompressible* jika diintegrasikan sepanjang garis arus (*streamline*) maka didapatkan persamaan Bernoulli :

$$\int \left(V \frac{\partial V}{\partial s} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial s} + g \frac{\partial z}{\partial s} \right) ds = V \cdot dV + \frac{1}{\rho} dp + g dz = \frac{V^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = c \quad (2.22)$$

Persamaan (2.22) digunakan pada aliran dalam *orifice* dengan melakukan penurunan persamaan dari persamaan berikut :

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2$$



Gambar 2.9 : Gambar Profil pengukuran pada manometer dengan orifis

Sumber : Holman (1985)

Sesuai dengan gambar 2.9 dimana $z_1 = z_2$

Sehingga persamaan tersebut menjadi menjadi

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.23)$$

Dengan Persamaan konservasi massa yakni $|\rho V_1 A_1| = |\rho V_2 A_2|$ sehingga untuk aliran yang *incompressible* maka $V_1 A_1 = V_2 A_2$

$$v_1 = v_2 \frac{A_2}{A_1} \quad (2.24)$$

$$\frac{d_2}{d_1} = \beta \Rightarrow \frac{A_2}{A_1} = \frac{\pi d_2^2}{4} = \beta^2 \quad (2.25)$$

Sehingga dengan mensubstitusi persamaan (2.25) ke persamaan (2.24) akan didapatkan :

$$v_1 = v_2 \beta^2 \quad (2.26)$$

Kemudian substitusikan persamaan (2.26) kedalam persamaan (2.22)

$$\begin{aligned} \frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} &= \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \\ \frac{v_2^2 - v_2^2 \beta^4}{2g} &= \frac{P_1 - P_2}{\gamma} \\ \frac{v_2^2(1 - \beta^4)}{2g} &= \frac{\Delta P}{\gamma} \\ v_2^2 &= \frac{2g\Delta P}{\gamma(1 - \beta^4)} \end{aligned} \quad (2.27)$$

Dengan $\gamma = \rho g$ maka didapatkan :

$$v_2 = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho(1 - \beta^4)}} \quad (2.28)$$

HIPOTESIS

Dari uraian diatas dapat di ambil suatu hipotesa bahwa nosel konvergen akan lebih mudah mengalami *lift off* an *blow off* yang ditunjukkan dari batas *lift off* dan *blow off* yang lebih rendah jika dibandingkan dengan batas *lift off* dan *blow off swirl nozzle*.

Disamping itu semakin semakin kecil sudut alur pada *swirl nozzle* maka api akan semakin sulit mengalami *lift off* dan *blow off* sehingga grafik yang terbentuk lebih tinggi. Hal ini menunjukkan api difusi lebih stabil.

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian yang dilakukan menggunakan metode eksperimental nyata (*true experimental research*) yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung untuk mencari data sebab akibat melalui eksperimental guna mendapatkan data empiris. Dalam hal ini obyek penelitiannya adalah pengaruh variasi nosel (nosel konvergen dan *swirl nozzle*) terhadap batas *lift off* dan *blow off* api difusi.

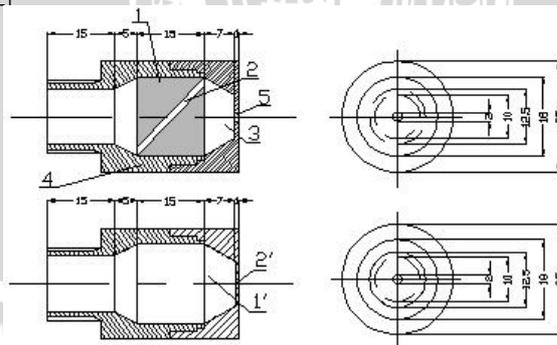
3.2 Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilaksanakan di Laboratorium Motor Bakar, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.

3.3 Variabel Penelitian

1. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang ditetapkan oleh peneliti dan ditentukan sebelum penelitian dilakukan. Dalam penelitian ini variabel bebas yang digunakan adalah variasi nosel serta variasi kecepatan udara. Dalam penelitian ini digunakan nosel konvergen dan *swirl nozzle* dengan sudut alur 30° , 60° , 90° seperti pada gambar 3.1. Sedangkan kecepatan udara yaitu $0,507 \text{ m.s}^{-1}$, $0,635 \text{ m.s}^{-1}$, $0,742 \text{ m.s}^{-1}$, $0,829 \text{ m.s}^{-1}$, $0,896 \text{ m.s}^{-1}$



Keterangan :

- | | |
|------------------------------------|--|
| 1. inti <i>swirl nozzle</i> | 5. orifice pada <i>swirl chamber</i> |
| 2. alur pada inti | 1' <i>circular nozzle</i> |
| 3. <i>swirl chamber</i> | 2' orifice pada <i>circular nozzle</i> |
| 4. casing pada <i>swirl nozzle</i> | |

Gambar 3.1 : *Circular nozzle* dan *swirl nozzle*

2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang besarnya tergantung dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Dalam penelitian ini variabel terikatnya adalah batas *lift off* dan batas *blow off* dengan memvariasikan kecepatan bahan bakar.

3.4 Peralatan Penelitian

Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Blower*

Blower digunakan untuk mensuplai udara pembakaran pada arah aksial. *Blower* yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut :

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

2. *Stop valve*

Digunakan untuk mengatur kapasitas bahan bakar dan udara yang akan digunakan.

3. *Orifice*

Digunakan untuk mengetahui beda tekanan gas LPG dan beda tekanan udara yang mengalir melalui saluran.

4. Pipa udara

Berfungsi sebagai saluran udara pembakaran yang dihasilkan dari *blower* dan *compressor*. Pipa udara yang digunakan untuk aliran udara aksial berdiameter 100mm

5. *Manometer*

Digunakan untuk mengukur beda tekanan gas LPG dan beda tekanan udara yang mengalir melalui *orifice*.

6. Tabung gas

Tabung gas digunakan untuk menampung bahan bakar gas LPG.

7. Nosel konvergen dan *swirl nozzle*

Berfungsi untuk menyemprotkan bahan bakar ke ruang bakar. Nosel

yang digunakan berdiameter 2 mm.

8. Kamera digital

Digunakan untuk mengambil gambar nyala api. Kamera digital yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

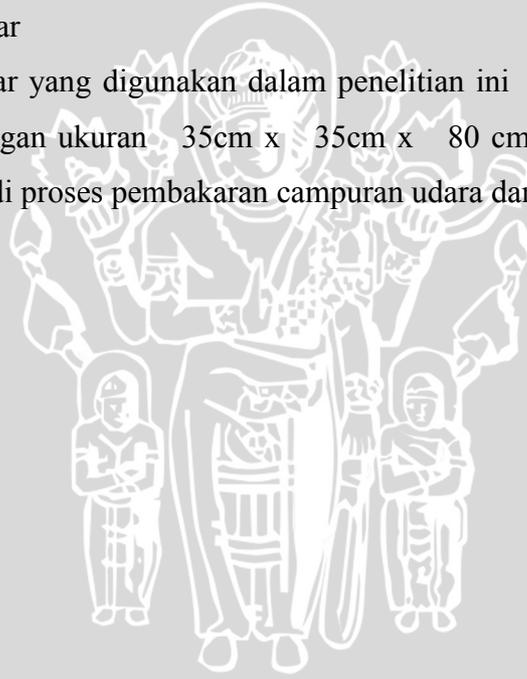
- a. *Merk* : *Olympus*
- b. *Model* : *FE - 150*
- c. *Resolution* : *5 Mega pixels*
- d. *Optical zoom* : *3 x*
- e. *File formats* : *JPEG*

9. Kaca pengamatan

Digunakan untuk melakukan pengamatan terhadap api difusi yang terjadi selama penelitian berlangsung. Kaca pengamatan tersebut berukuran 35 cm x 60 cm.

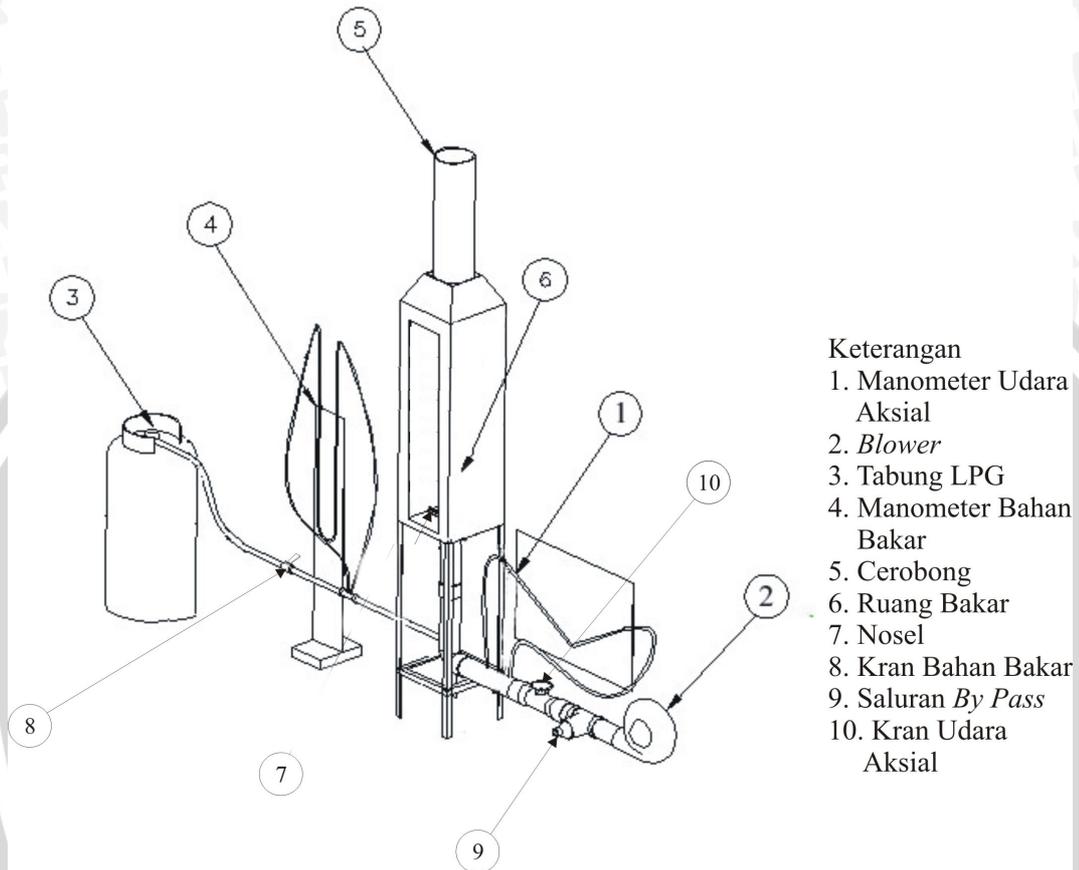
10. Ruang Bakar

Ruang bakar yang digunakan dalam penelitian ini berbentuk prisma segi 4 dengan ukuran 35cm x 35cm x 80 cm. Di dalam ruang bakar terjadi proses pembakaran campuran udara dan bahan bakar.



3.5 Instalasi Penelitian

Susunan alat yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah seperti gambar 3.2 berikut ini:



Gambar 3.2: Skema instalasi penelitian

3.6 Metode Pengambilan Data

Untuk mendapatkan data penelitian yang diinginkan, maka langkah-langkah yang dilakukan untuk mengetahui kestabilan api difusi adalah:

1. Mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan.
2. Mengatur *blower* dengan bukaan *stop valve* pada kecepatan aliran $0,50764\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.
3. Membuka *stop valve* bahan bakar pada kecepatan aliran tertentu.
4. Menyalakan api pada saat kondisi tersebut.
5. Memperbesar aliran bahan bakar (massa alir udara adalah konstan) sampai terjadi *lift off* dan dilanjutkan sampai api menjadi *blow off*.

6. Mengambil gambar nyala api difusi pada kondisi tertentu untuk mengetahui fenomena yang terjadi dengan bantuan kamera digital.
7. Mengulang langkah 2 – langkah 6 dengan bukaan *stop valve* yang berbeda yaitu dengan kecepatan aliran udara $0,63484 \text{ m.s}^{-1}$, $0,74204 \text{ m.s}^{-1}$, $0,82924 \text{ m.s}^{-1}$, $0,89644 \text{ m.s}^{-1}$.
8. Mengganti nosel dan melakukan langkah yang sama dari langkah 2 sampai langkah 7.

3.7 Rencana Analisa Data

Untuk mengetahui pengaruh variasi sudut alur *swirl nozzle* serta perbandingannya dengan nosel konvergen maka data yang di dapatkan dari hasil penelitian dibuatkan suatu tabel. Tabel 3.1 ini memuat : besarnya beda tekanan pada manometer bahan bakar, beda tekanan manometer udara, serta variasi dari sudut alur dan nosel konvergen. Bentuk tabel 3.1 tersebut adalah sebagai berikut :

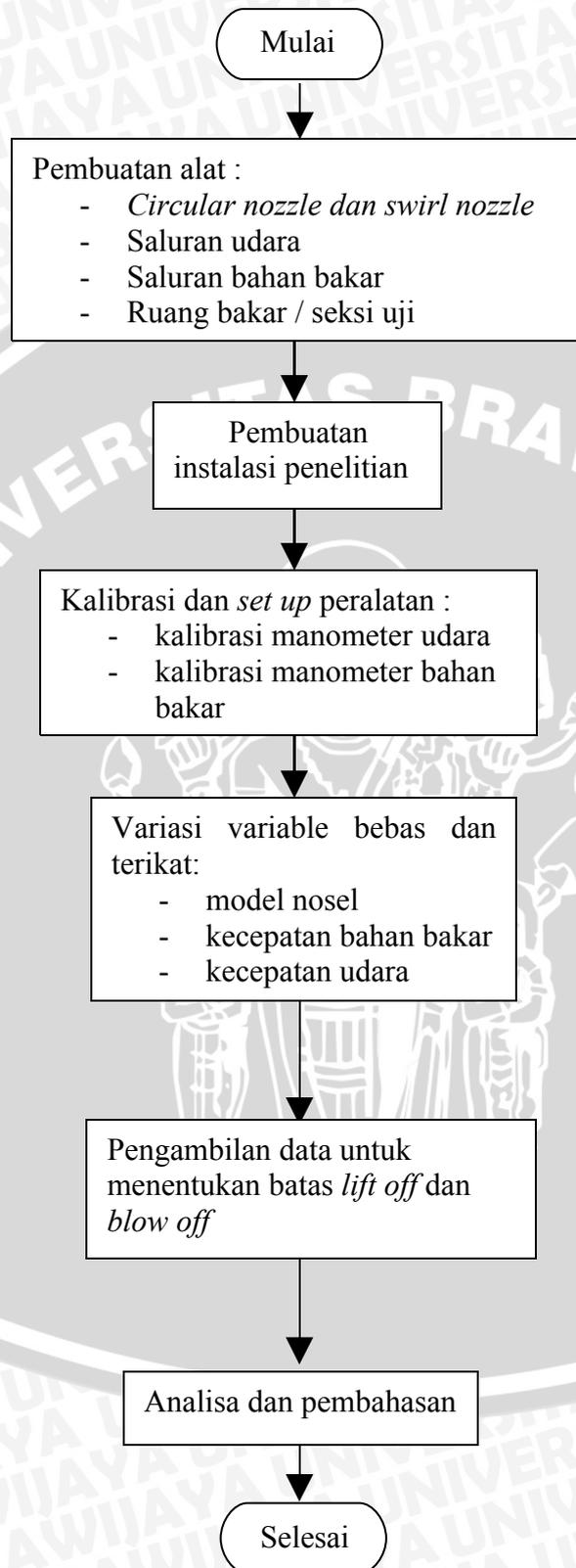
Tabel 3.1 Tabel pengambilan data

Δh udara	sudut alur 30°		sudut alur 60°		sudut alur 60°		nosel konvergen	
	Δh bahan bakar		Δh bahan bakar		Δh bahan bakar		Δh bahan bakar	
	<i>lift off</i>	<i>blow off</i>						
20								
30								
40								
50								
60								
70								

Dengan cara mengkonversikan Δh menjadi Δv maka akan didapatkan kecepatan pada saat api mengalami *lift off* dan *blow off*. Selanjutnya membandingkan batas *lift off* pada berbagai variasi nosel dalam sebuah grafik perbandingan kecepatan bahan bakar pada sumbu Y dan kecepatan udara pada sumbu X. Analisa dilakukan dengan mempertimbangkan batas *lift off* pada setiap variasi nosel.

Kemudian untuk batas *blow off*, data yang didapatkan diolah sebagaimana data *lift off* kemudian di buat suatu grafik perbandingan kecepatan bahan bakar pada sumbu Y dan kecepatan udara pada sumbu X. Dari grafik tersebut kemudian dianalisa serta kemudian ditarik suatu kesimpulan.

3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.3 Diagram alir penelitian

BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN

4.1. Data Hasil Penelitian

Data yang diperoleh dalam penelitian ini berupa kecepatan aliran udara yang diukur dengan manometer melalui *orifice* udara arah aksial dan kecepatan aliran bahan bakar yang diukur dengan manometer melalui *orifice* bahan bakar. Dengan prinsip beda tekanan pada penampang saluran akibat melalui *orifice*, maka dapat kita tentukan kecepatan aliran dengan persamaan Bernoulli.

Data yang diperoleh merupakan nilai rata-rata setelah dilakukan pengulangan pengambilan data sebanyak 3 (tiga) kali, sehingga bisa mewakili keragaman dari data yang diperoleh.

4.2. Perhitungan Data

Dengan mengambil contoh data saat kondisi *lift off* dan *blow off* pada nosel konvergen dengan beda ketinggian pada manometer udara (Δh_{udara}) yang sama. Pada saat beda ketinggian pada manometer udara ($\Delta h_{\text{udara}} = \cos 45^\circ \times 30$ mm), beda ketinggian pada manometer bahan bakar (Δh) saat kondisi mulai terjadi *lift off* adalah 4 mmHg sedangkan beda ketinggian pada manometer bahan bakar (Δh) saat kondisi akan *blow off* adalah 96 mmHg

a. Perhitungan Kecepatan Aliran Bahan Bakar

Data yang diketahui sebagai berikut :

Massa jenis bahan bakar (ρ_{bb})	= 2,009 kg.m ⁻³
Massa jenis raksa (ρ_{Hg})	= 13.600 kg.m ⁻³
Percepatan gravitasi bumi (g)	= 9,81 m.s ⁻²
Diameter pipa bahan bakar (D_{bb})	= 0,01 m
Diameter dalam orifis bahan bakar (d_{bb})	= 0,004 m
Diameter nosel bahan bakar (D_{nos})	= 0,002 m
Rasio diameter orifis dan diameter saluran (β)	= 0,4
Luas penampang nosel bahan bakar (A_{nos})	= 3,14.10 ⁻⁶ m ²
Luas penampang pipa saluran bahan bakar	= 7,85 .10 ⁻⁵ m ²

Massa alir bahan bakar pada saat kondisi *lift off* ($\dot{m}_{\text{bahan bakar}}$):

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = \rho_{bb} \cdot A_{nos} \cdot v_{nos}, \text{ atau } \dot{m}_{\text{bahan bakar}} = \rho_{bb} \cdot A_0 \cdot v_0 \text{ dengan } \Delta h = 4 \text{ mm}$$

(Hg)

$$v_0 = C \frac{d_{bb}^2}{D_{bb}^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (\rho_{Hg} \cdot g \cdot \Delta h) / 1000}{\rho_{bb} \cdot (1 - \beta^4)}}$$

$$\beta = \frac{d_{bb}}{D_{bb}} = \frac{0,004 \text{ m}}{0,01 \text{ m}} = 0,4$$

$$v_0 = (0,157) \frac{(0,004)^2}{(0,01)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (13600 \cdot 9,81 \cdot 6) / 1000}{2,009 \cdot (1 - (0,4)^4)}} = 2,17 \text{ m.s}^{-1}$$

$$v_{nos} A_{nos} = v_0 A_0$$

$$v_{nos} = \frac{A_0}{A_{nos}} x v_0 \Rightarrow v_{nos} = \frac{D_{bb}^2}{D_{nos}^2} x v_0 = 14,46$$

$$v_{nos} = \frac{0,01^2}{0,002^2} x 2,17 = 54,25 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = 2,009 [\text{kg.m}^{-3}] \cdot 3,14 \cdot 10^{-6} [\text{m}^2] \cdot 54,25 [\text{m.s}^{-1}] = 3,42 \cdot 10^{-4} \text{ kg.s}^{-1}$$

Massa alir bahan bakar pada saat kondisi *blow off* ($\dot{m}_{\text{bahan bakar}}$):

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = \rho_{bb} \cdot A_{nos} \cdot v, \text{ dengan } \Delta h = 96 \text{ mm (Hg)}$$

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

$$\beta = \frac{d_{bb}}{D_{bb}} = \frac{0,004 \text{ m}}{0,01 \text{ m}} = 0,4$$

$$v_0 = (0,552) \frac{(0,004)^2}{(0,01)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (13600 \cdot 9,81 \cdot 92) / 1000}{2,009 \cdot (1 - (0,4)^4)}} = 9,89 \text{ m.s}^{-1}$$

$$v_{nos} A_{nos} = v_0 A_0$$

$$v_{nos} = \frac{A_0}{A_{nos}} x v_0$$

$$v_{nos} = \frac{0,01^2}{0,002^2} \times 9,89 = 147,25 \text{ m.s}^{-1} \text{ (fluida dalam bentuk compressible)}$$

karena ($M > 0,3$) sehingga hukum kontinuitas tidak bisa di pakai karena massa jenis bahan bakar yang telah keluar nosel sangat sulit di ketahui, sehingga diambil kecepatan pada pipa saluran bahan bakar sebagai acuan kecepatannya).

$$\dot{m}_{\text{bahan bakar}} = 2,009 \text{ [kg.m}^{-3}] \cdot 7,85 \cdot 10^{-5} \text{ [m}^2] \cdot 9,89 \text{ [m.s}^{-1}] = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ kg.s}^{-1}$$

b. Perhitungan Kecepatan Aliran Udara

$$\text{Massa jenis udara } (\rho_{ud}) = 1,208 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\text{Massa jenis minyak tanah } (\rho_m) = 835 \text{ kg.m}^{-3}$$

$$\text{Percepatan grafitasi bumi (g)} = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$$

$$\text{Diameter pipa udara } (D_{ud}) = 0,06 \text{ m}$$

$$\text{Diameter dalam orifis udara } (d_{ud}) = 0,02 \text{ m}$$

$$\text{Rasio diameter orifis dan diameter saluran } (\beta) = 0,333$$

$$\text{Luas penampang pipa saluran udara } (A_{ud}) = 2,826 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$\text{Massa alir udara aksial pada ketinggian } (\Delta h \text{ minyak}) = 30 \text{ mm}$$

$$\dot{m}_{\text{udara}} = \rho_{ud} \cdot A_{ud} \cdot v_0$$

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

$$\beta = \frac{d_{ud}}{D_{ud}} = \frac{0,02 \text{ m}}{0,06 \text{ m}} = 0,333$$

$$v_0 = (0,61) \frac{(0,02)^2}{(0,06)^2} \sqrt{\frac{2 \cdot (835 \cdot 9,81 \cdot 30 \cos 45^\circ) / 1000}{1,208 \cdot (1 - (0,333)^4)}} = 1,158 \text{ m.s}^{-1}$$

$$\dot{m}_{\text{udara}} = 1,208 \text{ [kg.m}^{-3}] \cdot 2,826 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^2] \cdot 1,158 \text{ [m.s}^{-1}] = 3,952 \cdot 10^{-3} \text{ kg.s}^{-1}$$

Hal ini berarti kecepatan udara keluar pada diameter 0.1m adalah

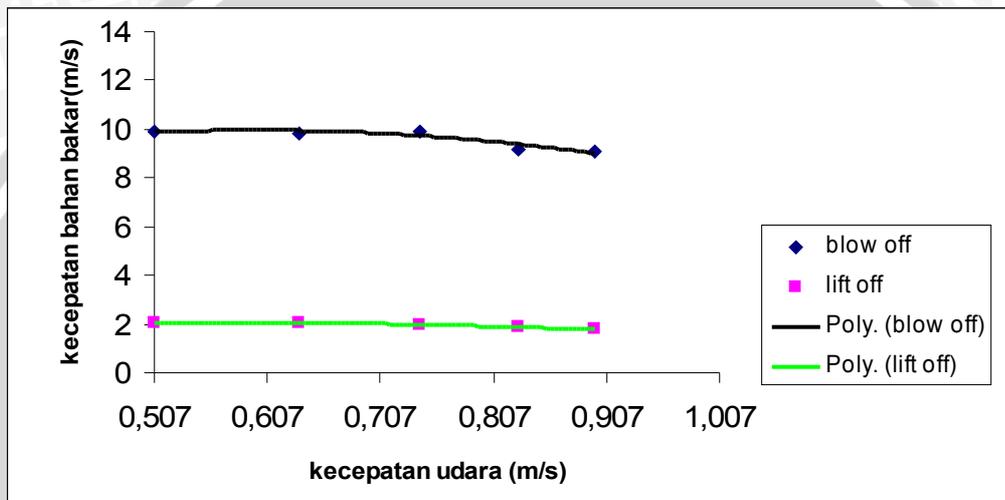
$$v = \frac{3,952 \times 10^{-3}}{1,208 \times \left(\frac{3,14}{4} \times 0,1^2\right)} = 0,63484 \text{ m.s}^{-1}$$

4.3 Pembahasan

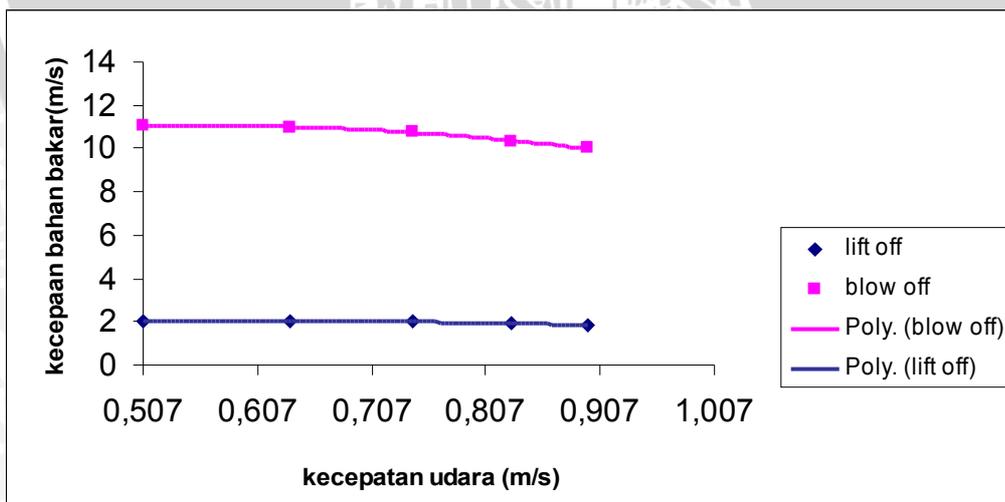
4.3.1 Diagram Kestabilan Api Difusi

Diagram kestabilan api difusi dibuat dengan menerangkan hubungan antara kecepatan aliran udara dengan kecepatan aliran bahan bakar. Pada masing-

masing variasi penelitian, diagram kestabilan api difusi dibagi menjadi tiga bagian dengan melihat kecenderungan batas yang terjadi yaitu daerah api stabil, daerah api *lift off* dan daerah api *blow off*. Batas masing-masing daerah tersebut didapat dengan menarik batas ketika api mengalami *lift off* dan *blow off*.



(A)



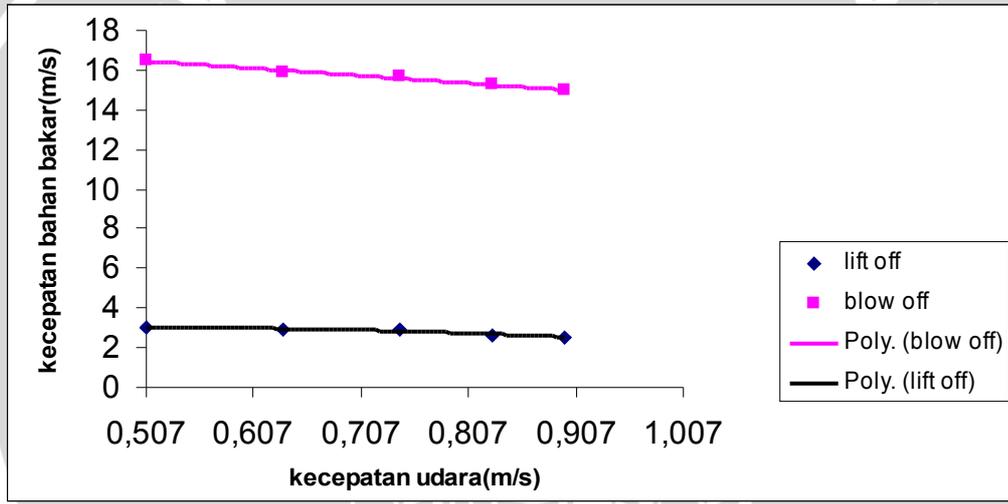
(B)

Gambar 4.1 : Batas *lift off* dan batas *blow off* pada masing-masing variasi jenis

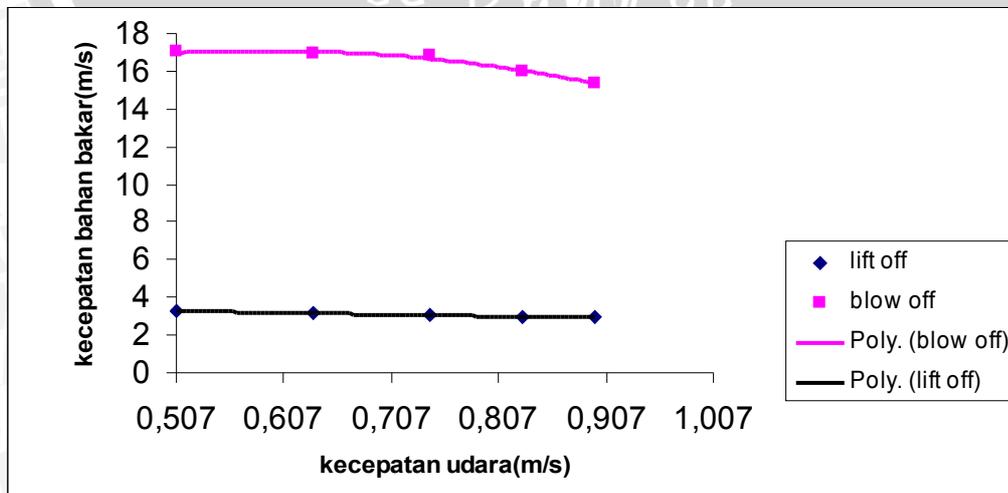
nosel

(a) nosel konvergen

(b) *swir nozzle* sudu alur 90°



(C)



(D)

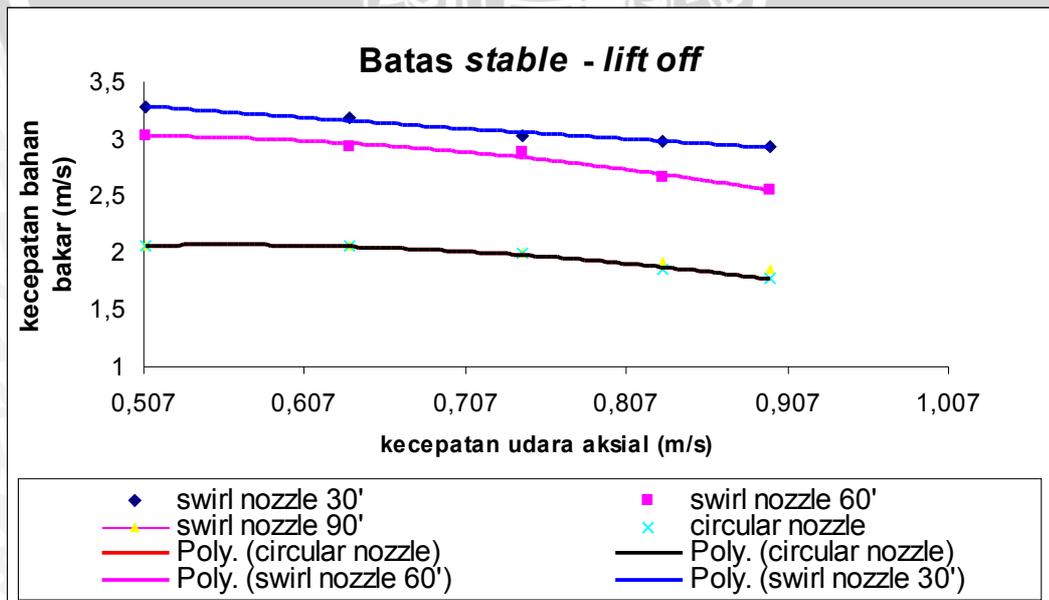
Gambar 4.1 (lanjutan) : Batas *lift off* dan batas *blow off* pada masing-masing variasi jenis nosel

(c) *swirl nozzle* sudut alur 60°

(d) *swirl nozzle* sudut alur 30°

Dari grafik diatas terlihat dengan jelas perbedaan batas mulai terjadinya *lift off* dan batas *blow off* pada masing-masing jenis nosel. Perbedaan yang paling nampak adalah perbedan batas *blow off* (luas daerah *lift off*) pada gambar (a), (b), (c) dan (d). Gambar (a) menunjukkan batas *lift off* dan batas *blow off* api difusi pada nosel konvergen. Gambar (a) mempunyai batas *blow off* yang rendah atau luas daerah *lift off* nya kecil. Berbeda dengan gambar (d) yang terlihat mempunyai batas *blow off* yang tinggi. Sehingga dari ke 4 (empat) gambar diatas, kecendengungan untuk tidak terjadinya *blow off* (api yang lebih stabil) terlihat pada gambar (d) yang menunjukkan batas *lift off* dan *blow off* api difusi pada *swirl nozzle* sudut alur 30°. Pembahasan yang lebih jelas dilakukan dengan membandingkan batas *lift off* dan batas *blow off* api difusi untuk masing-masing jenis nosel dalam satu grafik.

Grafik dibawah ini menyatakan daerah kestabilan dari pembakaran difusi pada masing- masing model nosel dengan menarik garis batas terjadinya *lift off*. Daerah yang berada di bawah garis batas *lift off* adalah daerah stabil.



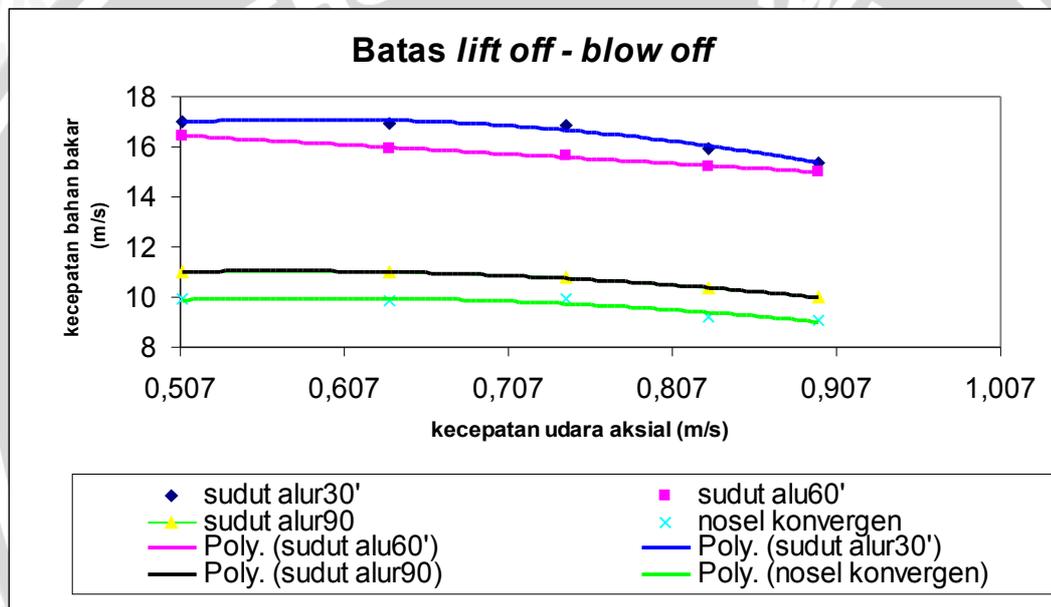
Gambar 4.2 : Grafik Batas *lift off* antara kecepatan udara dan kecepatan bahan bakar

Dari gambar 4.2 dapat dilihat bahwa daerah kestabilan api pada masing-masing jenis nosel mempunyai batas *lift off* yang berbeda-beda. Semakin tinggi batas *lift off* yang terlihat pada grafik maka semakin stabil nyala api pada pembakaran difusi. Dari grafik terlihat bahwa *swirl nozzle* dengan sudut alur 30° mempunyai batas *lift off* yang paling tinggi. Hal ini berarti pada jenis nosel tersebut sulit terjadi *lift off* atau nyala api difusi yang terbentuk paling stabil dari pada ke-3 nosel yang lainnya. Kemudian diikuti oleh jenis *swirl nozzle* dengan sudut alur 60° , *swirl nozzle* dengan sudut 90° dan yang terakhir nosel konvergen. Pada sudut alur 30° daerah kestabilan paling besar terlihat pada kecepatan udara 0,507 dengan kecepatan bahan bakar $3,278 \text{ m/s}^2$, karena pada kondisi tersebut mulai terjadi *lift off*. Panjang *lift off* akan meningkat seiring dengan penambahan kecepatan reaktan sampai api mengalami *blow off* (kondisi api padam setelah mengalami *lift off*). Panjang *lift off* merupakan jarak antara mulut nosel dan pangkal api yang ditunjukkan dari gambar 4.4 – 4.6.

Swirl nozzle dengan sudut alur 30° mempunyai daerah kestabilan yang paling besar karena memiliki perbandingan kecepatan tangensial terhadap kecepatan aksial (angka *swirl*) yang paling besar jika dibandingkan dengan nosel konvergen dan *swirl nozzle* dengan sudut 60° , dan sudut 90° . Angka *swirl* merupakan perbandingan antara kecepatan tangensial terhadap kecepatan aksialnya. Dengan angka *swirl* yang besar maka kecenderungan fluida yang keluar nosel akan bergerak ke arah tangensial, hal ini akan mengakibatkan fluida yang keluar dari nosel tersebut berbentuk suatu daerah yang menyerupai kerucut sedangkan pada nosel konvergen lebih menyerupai bentuk tabung. Daerah tersebut merupakan daerah yang biasa disebut daerah kontak antara bahan bakar dan udara. Dengan bentuk yang menyerupai daerah kerucut maka *swirl nozzle* akan mempunyai daerah kontak antara bahan bakar dan udara yang lebih luas. Disamping itu, dengan kecepatan aksial yang lebih kecil, maka akan ada cukup waktu bagi bahan bakar untuk bercampur dengan udara saat keluar dari nosel. Hal inilah yang menyebabkan *swirl nozzle* dengan sudut alur 30° lebih sulit mengalami *lift off* dibandingkan dengan model nosel yang lain. Dengan demikian

semakin kecil sudut alur *swirl nozzle* maka terjadinya peristiwa *lift off* pada api difusi akan semakin sulit.

Grafik yang terbentuk cenderung menurun yang menunjukkan fenomena *lift off* terjadi lebih cepat. Hal ini di sebabkan kecepatan udara yang lebih tinggi akan menimbulkan efek pendinginan disekitar api sehingga temperatur api turun, kecepatan reaksi pembakaran juga menurun akibat terlalu cepatnya udara sehingga belum sempat bereaksi sempurna dengan bahan bakar. Dengan menurunnya kecepatan dari reaksi pembakaran maka proses terjadinya *lift off* akan lebih cepat terjadi.



Grafik 4.3 : Grafik Batas *blow off* antara kecepatan udara dan kecepatan bahan bakar

Dari gambar 4.3 menunjukkan batas terjadinya *blow off* pada pembakaran difusi. Dari grafik terlihat bahwa batas *blow off* terbesar terjadi pada jenis nosel yang sama seperti pada grafik 4.2 yaitu *blow off* yang paling sulit terjadi pada model nosel *swirl nozzle* dengan sudut alur 30° . Sedangkan jenis model nosel yang paling mudah terjadinya *blow off* adalah nosel konvergen. Pada sudut alur 30° , batas *lift off* tertinggi terjadi pada kecepatan udara 0,507 m/s dengan kecepatan bahan bakar 17,019 m/s

Dari kedua gambar diatas terdapat persamaan urutan kecepatan dimana *lift*

off dan tingkatan *blow off*. Pada penelitian yang telah dilakukan, kecenderungan batas *lift off* dan batas *blow off* terlihat sama. Hal ini berarti semakin cepat terjadinya *lift off* maka kemungkinan terjadinya *blow off* semakin cepat pula. Dengan demikian, untuk menghindari terjadinya *blow off* maka diperlukan batas *lift off* yang tinggi.

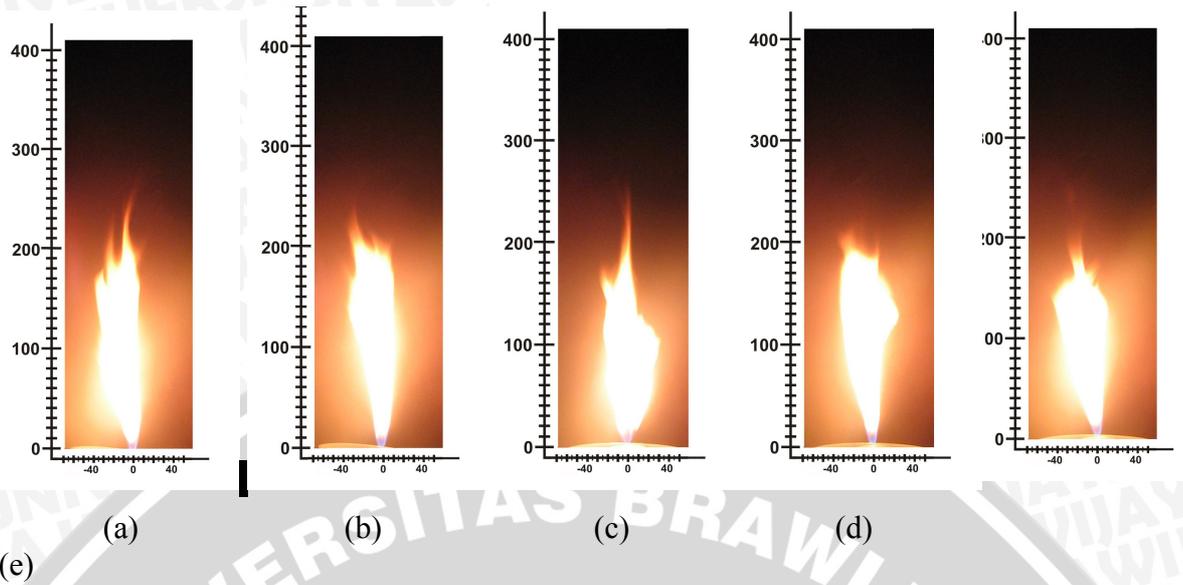
Kedua gambar juga memperlihatkan bahwa pada nosel konvergen lebih mudah terjadi *lift off* dan *blow off*. Sebagaimana yang telah dijelaskan diatas, maka hal ini dikarenakan garis alir bahan bakar saat keluar dari nosel terbentuk lurus sehingga luas daerah kontak antara bahan bakar dan udara relatif lebih kecil dari pada jenis *swirl nozzle*. Jenis *swirl nozzle* yang paling stabil adalah *swirl nozzle* dengan sudut alur 30° . Hal ini dikarenakan semakin kecil sudut alur maka kecepatan tangensial yang terjadi semakin besar sedangkan kecepatan aksialnya semakin kecil. Sebagaimana penjelasan diatas yakni dengan kecepatan aksial yang lebih kecil, maka akan ada cukup waktu bagi bahan bakar untuk bercampur dengan udara saat keluar dari nosel. Disamping itu, dengan semakin besar kecepatan tangensialnya maka bahan bakar akan cenderung berbentuk kerucut sedangkan dengan semakin tinggi kecepatan aksialnya maka bahan bakar yang keluar nosel akan cenderung berbentuk silinder. Dengan demikian, *swirl nozzle* dengan sudut alur 30° akan mempunyai daerah kontak antara bahan bakar dan udara yang lebih luas dibandingkan dengan yang lainnya. Luas daerah kontak antara bahan bakar dan udara merupakan salah satu faktor yang mempengaruhi kestabilan nyala api dimana semakin besar luas daerah kontaknya maka api cenderung akan lebih stabil.

4.3.2 Visualisasi Api Difusi

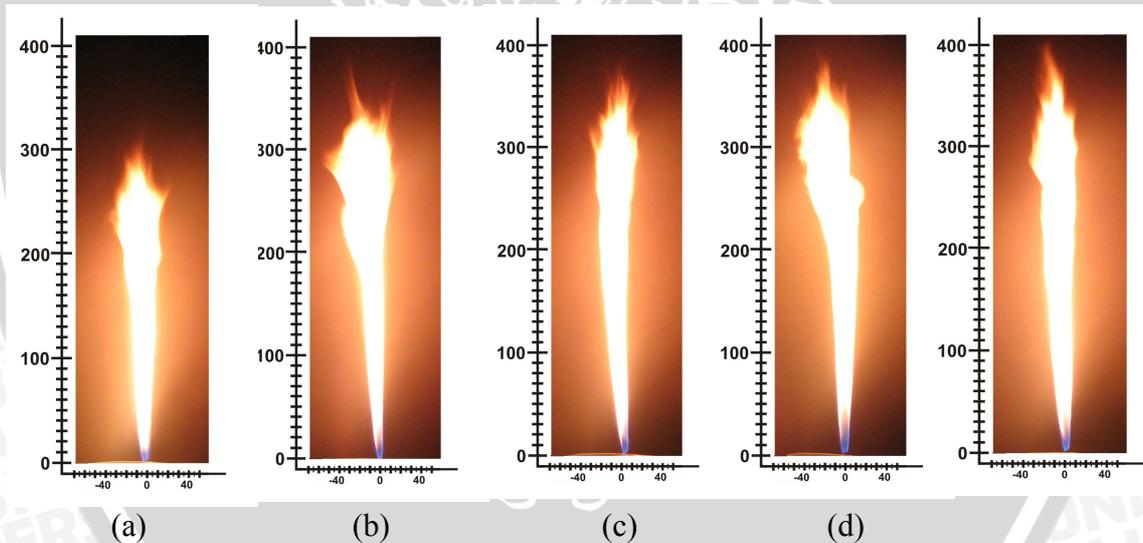
Visualisasi api digunakan untuk mengetahui karakter api pada berbagai kondisi, sehingga dapat diketahui fenomena yang terjadi pada api difusi.

Disamping itu analisis yang dilakukan terhadap karakteristik api menjadi lebih mudah

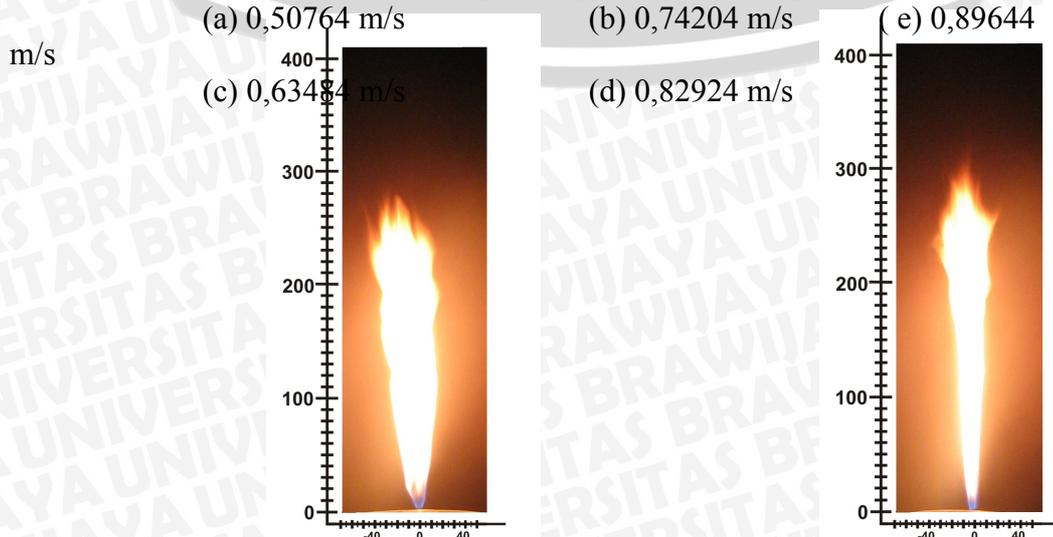
- a. Visualisasi api saat mulai terjadi *lift off* untuk beberapa jenis nosel serta perbandingan untuk setiap jenis nosel :

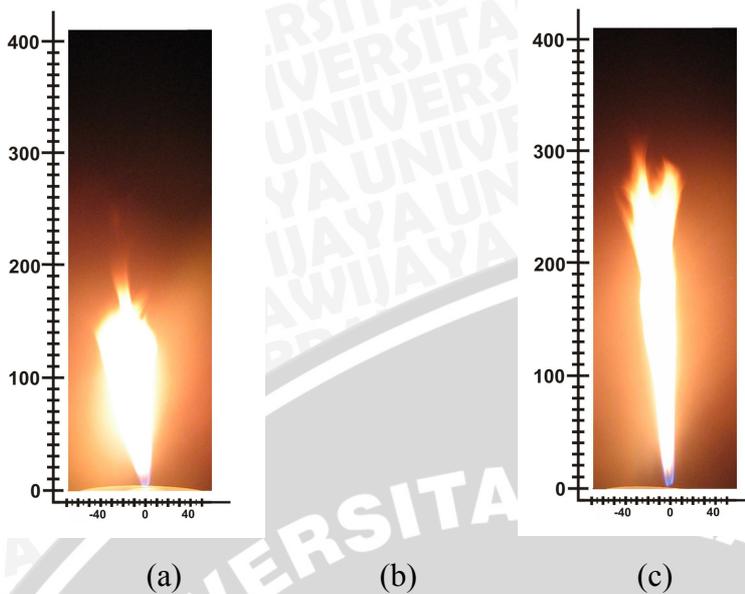


Gambar 4.4 Visualisasi api saat mulai terjadi *lift off* pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *swirl nozzle* sudut alur 30°
 (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s (e) 0,89644 m/s



Gambar 4.5 Visualisasi api saat mulai terjadi *lift off* (pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *konvergen nozzle*)
 (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s (e) 0,89644 m/s





(a) (b) (c) (d)
 Gambar 4.6 Visualisasi api saat mulai terjadi *lift off* pada berbagai variasi nosel dengan kecepatan udara sebesar 0,50764 m/s

- (a) *swirl nozzle* sudut alur 30° (b) *swirl nozzle* sudut alur 60°
 (c) *swirl nozzle* sudut alur 90° (d) *konvergen nozzle*

Pada Gambar 4.4, Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 terlihat visualisasi api pada saat akan terjadi *lift off*. Gambar 4.4 merupakan visualisasi api pada kecepatan bahan bakar antara 2,92 - 3,27 m/s. (lampiran 4). Gambar 4.5 merupakan visualisasi api pada kecepatan bahan bakar 1,78 - 2,05 m/s (lampiran 4). sedangkan gambar 4.9 merupakan visualisasi api pada setiap variasi nosel pada saat mulai terjadi *lift off*. Dengan kecepatan udara 0,507 m/s.

Pada gambar 4.4 dengan memvariasikan kecepatan udara ternyata visualisasi yang terlihat relatif sama. Hal ini di karenakan perbedaan kecepatan udara terlalu kecil. sedangkan pada gambar 4.5 terlihat visualisasi api yang semakin tinggi tiap sedikit kenaikan kecepatan udara. Hal ini disebabkan pada nosel konvergen, bentuk semprotannya lebih menyerupai tabung sehingga luas daerah kontak sangat dipengaruhi oleh kecepatan udara aksialnya. Oleh karena itu semakin besar kecepatan udara maka api akan semakin tinggi walaupun dengan penambahan yang sangat kecil.

Panjang dan lebar api difusi dapat diketahui dari visualisasi yang ditunjukkan pada gambar 4.6 untuk variasi jenis nosel. Pada saat mulai terjadi *lift off* terlihat dengan jelas tinggi api untuk tiap-tiap jenis nosel. *Swirl nozzle* dengan

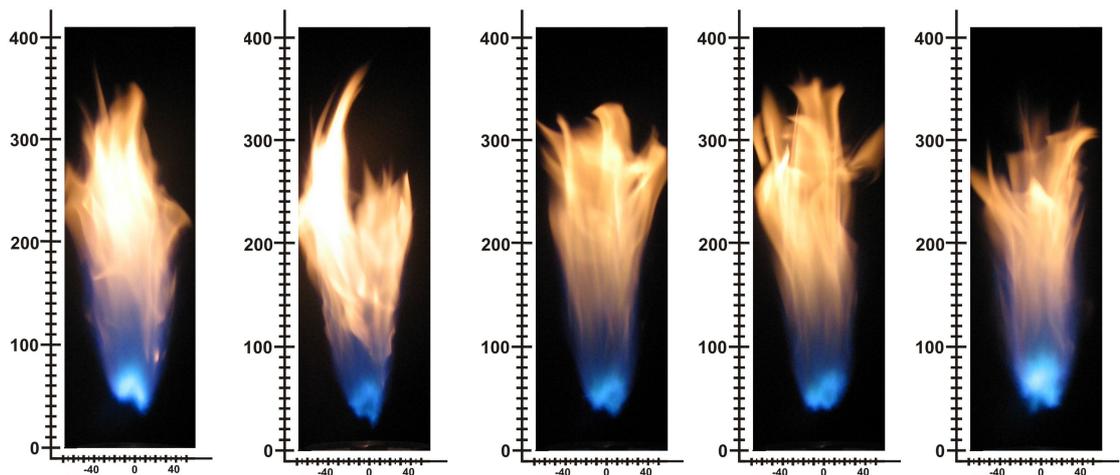
sudut alur 30° mempunyai tinggi api sekitar 200 mm dengan lebar sekitar 60 mm, *Swirl nozzle* dengan sudut alur 60° mempunyai tinggi api sekitar 260 mm dengan lebar sekitar 50 mm, *Swirl nozzle* dengan sudut alur 90° dan nosel konvergen hampir mirip yakni mempunyai tinggi api sekitar 300 mm dengan lebar sekitar 30 mm.

Panjang api difusi dipengaruhi oleh kecepatan reaktan, khususnya dalam hal ini kecepatan aksial bahan bakar. Apabila kecepatan aksial dari bahan bakar semakin cepat, maka bahan bakar yang akan berdifusi (bereaksi) dengan udara semakin jauh meninggalkan mulut nosel sehingga api yang tampak akan semakin panjang. Sedangkan semakin kecil kecepatan aksialnya, maka api yang terlihat akan semakin pendek.

Lebar api difusi dipengaruhi oleh luasan daerah kontak antara bahan bakar dengan udara. Semakin besar luasan daerah kontak antara bahan bakar, maka api akan terlihat semakin lebar. Luas daerah kontak sangat dipengaruhi oleh perbandingan kecepatan tangensial terhadap kecepatan aksial bahan bakar (angka *swirl*). Semakin besar angka *swirl*, maka api akan cenderung melebar.

Panjang dan lebar api dipengaruhi oleh jenis nosel yang digunakan. *Swirl nozzle* mempunyai ketinggian api yang paling rendah karena dengan sudut tersebut kecepatan aksialnya lebih kecil kecil sedangkan kecepatan tangensial yang dihasilkan lebih besar dari sudut 60° , 90° dan nosel konvergen. Efek dari kecepatan aksial yang kecil dan kecepatan tangensial yang tinggi adalah api akan terlihat lebih pendek dan lebar jika dibandingkan dengan yang lainnya.

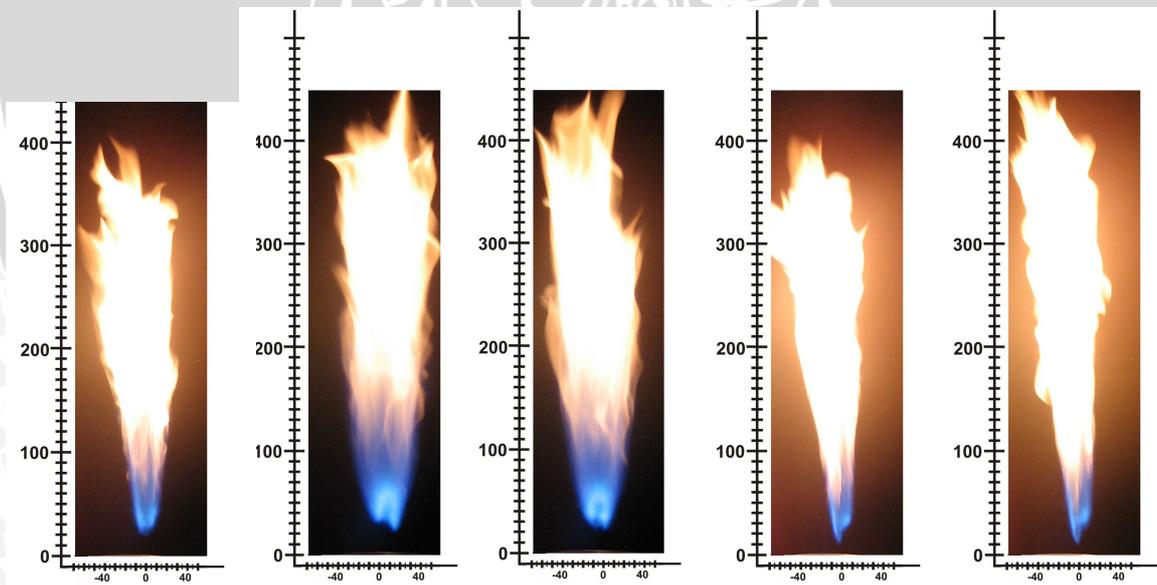
b. Visualisasi api saat akan mengalir *blow off* untuk beberapa jenis nosel serta perbandingan untuk tiap-tiap jenis nosel :



(a) (b) (c) (d) (e)

Gambar 4.7 Visualisasi api sesaat sebelum terjadi *blow off* pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *swirl nozzle* sudut alur 30°

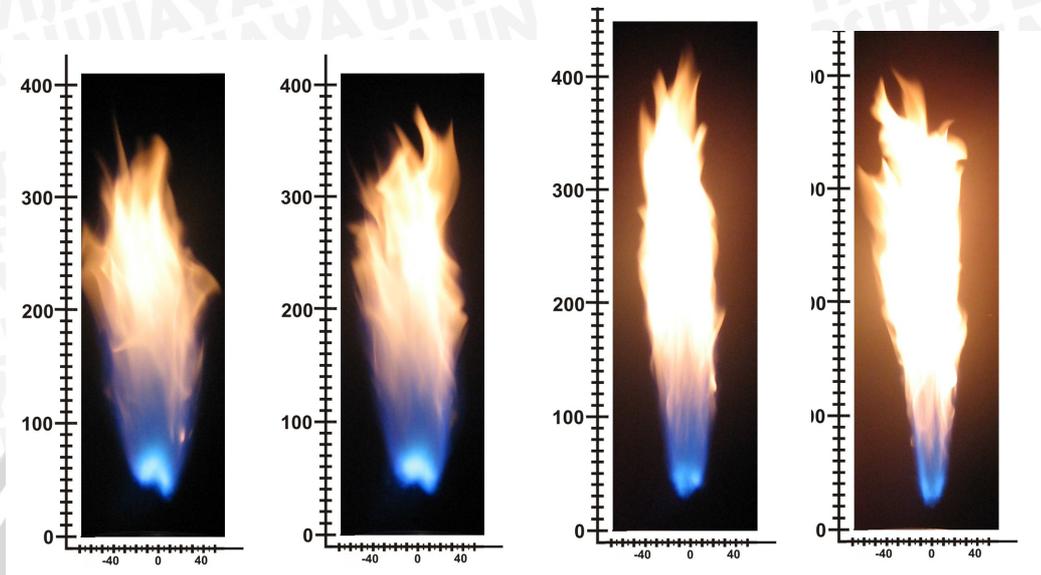
- (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (e) 0,89644 m/s
 (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s



(a) (b) (c) (d) (e)

Gambar 4.8 Visualisasi api sesaat sebelum terjadi *blow off* pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *konvergen nozzle*

- (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (e) 0,89644 m/s
 (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s



Gambar 4.9 Visualisasi api sesaat sebelum terjadi *blow off* pada berbagai variasi nosel dengan kecepatan udara sebesar 0,50764 m/s

- (a) *swirl nozzle* sudut alur 30°
- (b) *swirl nozzle* sudut alur 60°
- (c) *swirl nozzle* sudut alur 90°
- (d) *konvergen nozzle*

Pada Gambar 4.7, Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 terlihat visualisasi api pada saat akan terjadi *blow off*. Gambar 4.7 merupakan visualisasi api pada kecepatan bahan bakar antara 13 – 15 m/s yakni sesaat sebelum *blow off*. Data batas *blow off* pada model *swirl nozzle* sudut alur 30 berkisar antara 14-17 m/s pada masing-masing variasi kecepatan udara (lampiran 5). Gambar 4.8 merupakan visualisasi api pada kecepatan bahan bakar antara 8 - 9 m/s dimana untuk nosel konvergen, batas *blow off* nya berkisar antara 9-10 m/s. sedangkan gambar 4.9 merupakan perbandingan variasi nosel sesaat sebelum terjadinya *blow off* pada kecepatan udara sebesar 0,507 m/s.

Panjang dan lebar visualisasi api difusi ditunjukkan pada gambar 4.9 untuk variasi jenis nosel. Pada saat sebelum *blow off* terlihat dengan jelas tinggi api untuk tiap-tiap jenis nosel. *Swirl nozzle* dengan sudut alur 30° mempunyai tinggi api sekitar 340 mm dengan lebar sekitar 90mm, *Swirl nozzle* dengan sudut alur 60°

mempunyai tinggi api sekitar 370 mm dengan lebar sekitar 80 mm, *Swirl nozzle* dengan sudut alur 90° dan nosel konergen mempunyai tinggi api sekitar 400 mm dengan lebar sekitar 60 mm.

Sebagaimana pembahasan tentang visualisasi api pada batas *lift off*, panjang dan lebar api dipengaruhi oleh jenis nosel yang digunakan. *Swirl nozzle* dengan sudut 30° mempunyai ketinggian api yang paling rendah karena dengan sudut tersebut maka kecepatan tangensial yang dihasilkan lebih besar dari sudut 60° , 90° dan nosel konergen. Efek dari kecepatan aksial yang rendah dan kecepatan tangensial yang tinggi adalah api akan terlihat lebih pendek dan lebar jika dibandingkan dengan yang lainnya.

Dari gambar 4.7, 4.8, dan 4.9 nampak dengan jelas panjang *lift off* yang terjadi sebelum api mengalami *blow off*. Perbandingan panjang *lift off* untuk masing-masing jenis nosel terlihat pada gambar 4.9. pada gambar tersebut, *swirl nozzle* dengan sudut alur 30° mempunyai panjang *lift off* terbesar yakni sekitar 40 mm sedangkan panjang *lift off* terkecil terjadi pada nosel konergen yakni sekitar 25 mm. *Swirl nozzle* dengan sudut alur 30° mempunyai panjang *lift off* terbesar disebabkan oleh kecepatan total bahan bakar saat akan mengalami *blow off* lebih tinggi dari variasi nosel lainnya (data di lampiran2). Api difusi pada *swirl nozzle* tidak mengalami *blow off* meskipun kecepatan bahan bakarnya lebih tinggi dari model yang lain disebabkan oleh kecepatan tersebut lebih kearah tangensial daripada kecepatan aksialnya.

BAB V PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Dari analisis data yang telah dilakukan maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- *Swirl nozzle* dengan sudut alur 30° mempunyai batas *lift off* dan batas *blow off* yang paling tinggi, hal ini menunjukkan bahwa jenis nosel tersebut paling stabil jika dibandingkan dengan *swirl nozzle* dengan sudut alur 60° dan 90° .
- *Konvergen nozzle (circular nozzle)* mempunyai batas *lift off* dan *blow off* yang lebih rendah dari semua model *swirl nozzle* dengan variasi sudut alur, sehingga menunjukkan bahwa nosel konvergen lebih mudah mengalami *lift off* dan *blow off*.

5.2. Saran

1. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh variasi kecepatan udara dengan perbedaan yang lebih besar
2. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pola aliran bahan bakar gas yang melewati *swirl nozzle*
3. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pengaruh pemasangan *swirl nozzle* terhadap distribusi temperatur
4. Perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai efek dari warna api difusi saat mulai terjadi *lift off* dan saat akan mengalami *blow off*

DAFTAR PUSTAKA

- Broadwell, J. E., et al, 1984, *Effect of Burner Diametric on the Blow Out Limit of Diffusion Flame*, proceedings of the Combustion Institute pp303-310
- Culp, Archie W., 1996, *Prinsip-prinsip Konversi Energi*, Jakarta: Erlangga.
- Elbe, G. V. dan Lewis, Benard, 1961, *Combustion, Flames and Explosions of Gases*, : Academic Press.
- Hadiyana, Endra.,2005 *Pengaruh variasi sudut swirling vanes terhadap kestabilan nyala dan distribusi temperatur pada api difusi annulus jet*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.
- Holman, J.P., 1985, *Metode Pengukuran Teknik*, Jakarta: Erlangga.
- Kuo K., 1986, *Principles of Combustion*, New York : John Wiley & Sons, Inc.
- Kurniawan, G.I., *Pengaruh ukuran dan letak ketinggian grid terhadap fenomena lift off api difusi*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.
- Lilley, David G., 1977, *Swirl Flow in Combustion: A Review*, AIAA
- Monnot, G., et al., 1984, *Principles of Turbulent Fired Heat*, Texas: Gulf Publishing Company.
- Milton,Brian E.,1995, *Thermodynamics, Combustion and Engines*, London: Chapman&Hall.
- Phillips, T.M., et all, 2005, *A Qualitative Study of the effect of assymmetric Fuel Nozzles on the Blow Out Limits of Non and Swirling CH₄-air Diffusion Flame*, Canada
- Peters, N, 1997, *Four Lectures on Turbulent Combustion*, Ercoftac Summer School, Aachen, Germany.
- Potter, C. P., David, C. W. dan Midhat, Hondzo, 1997, *Mechanics of fluids*, Singapore: Prentice – Hall, Inc.
- Takahashi, F., et al., 1996, *Structure of Turbulent Hydrogen Jet Diffusion Flames With or Without Swirl*, Journal of Heat Transfer, ASME.
- Takahashi, F., et al., 1998, *Turbulence Structure of Swirling Hydrogen Jet Diffusion Flames*, Journal of Heat Transfer, ASME.
- Turns, Stephen R., 1996, *An Introduction to Combustion*, New York : McGraw-

Hill, Inc

Wardana, I. N. G., 1995, *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.

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

Widodo II, A. S., 2005, *Hand Out Mata Kuliah Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang.

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

Wiyono E, S., 2005, *Pengaruh Variasi Sudut alur terhadap karakteristik spray pada swirl nozzle*, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Malang

www.planetmath.org/encyclopedia/Annulus.html.

www.pertamina.com/pertamina.php?irwcontents=webpage&menu=40202&page_id=45



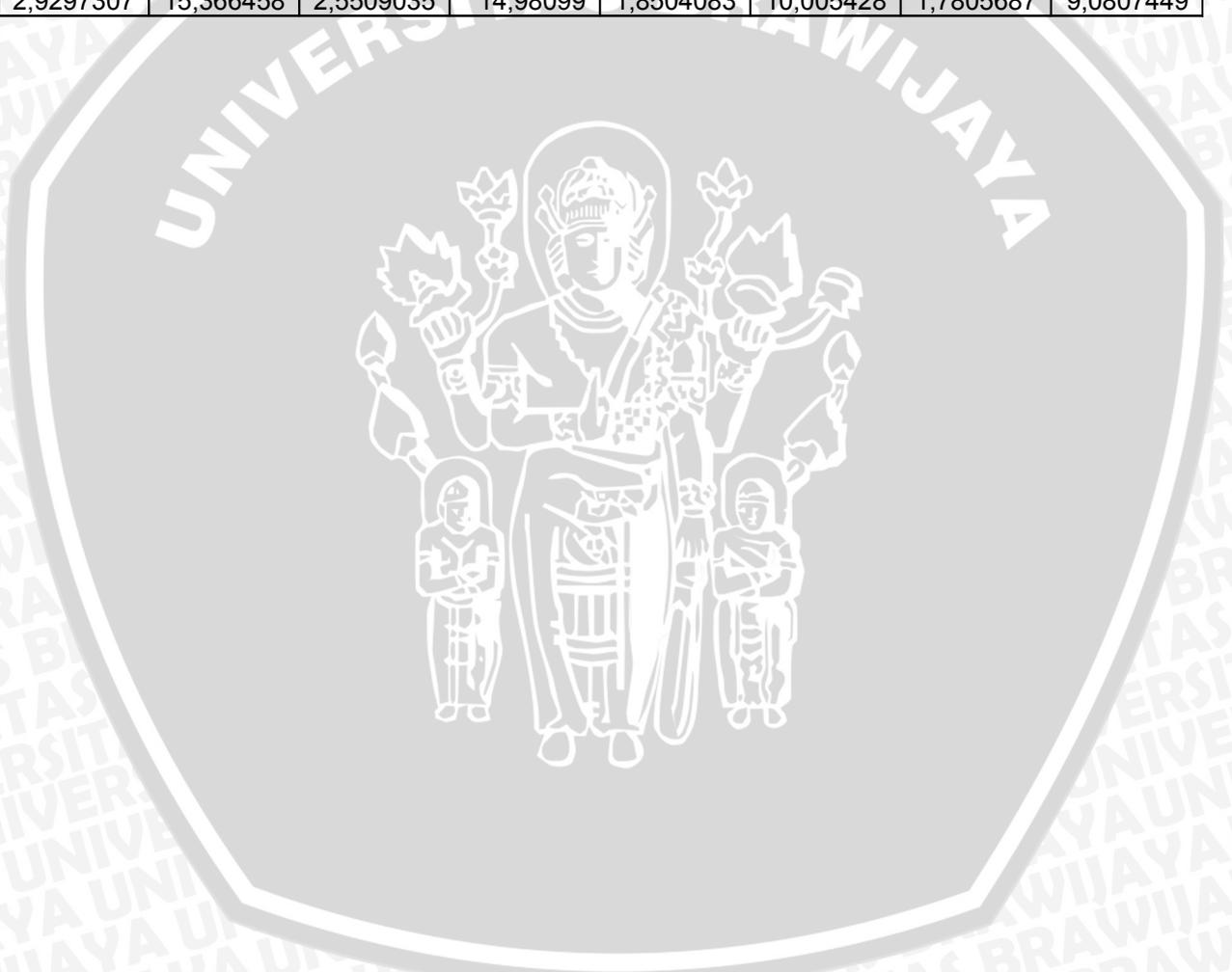
Data hasil penelitian

ΔP Blower	Sudut alur 30°				Sudut alur 60°				Sudut alur 90°				nosel konvergen			
	lift off		blow off		lift off		blow off		lift off		blow off		lift off		blow off	
	ΔP	Rata-rata	ΔP	Rata-rata	ΔP	Rata-rata	ΔP	Rata-rata	ΔP	Rata-rata	ΔP	Rata-rata	ΔP	Rata-rata	ΔP	Rata-rata
20	12		370		12		312		6		114		6		94	
	13	12,33333	354	369,3333	12	11,33333	314	318	5	5,666667	110	114	6	5,666667	92	92
	12		384		10		328		6		118		5		90	
30	12		356		11		282		6		114		6		90	
	14	13	360	356	10	10,66667	284	282	6	5,666667	112	113,3333	6	5,666667	92	91,33333
	13		352		11		280		5		114		5		92	
40	11		360		11		260		6		108		5		92	
	12	11,33333	348	354	10	10,33333	268	266	6	5,333333	108	109,3333	6	5,333333	94	92
	11		354		10		270		4		112		5		90	
50	10		288		10		246		5		108		5		90	
	11	11	280	283,3333	8	9	250	246	5	5	110	109,3333	5	4,666667	92	92,66667
	12		282		9		242		5		110		4		96	
60	10		244		9		240		5		106		4		98	
	11	10,66667	240	244	8	8,333333	244	242	4	4,666667	110	108,3333	5	4,333333	90	92,66667
	11		248		8		242		5		109		4		90	

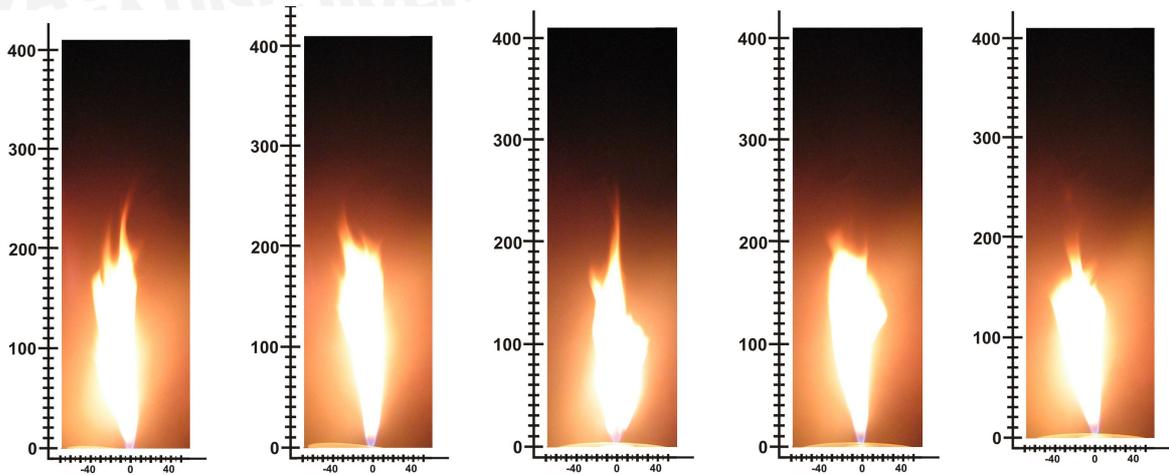
Pengolahan data hasil penelitian

Data kecepatan udara dan kecepatan bahan bakar

Vudara	sudut alur 30°		sudut alur 60°		sudut alur 90°		Nosel konvergen	
	Vbahan bakar		Vbahan bakar		Vbahan bakar		Vbahan bakar	
	lift off	blow off	lift off	blow off	lift off	blow off	lift off	blow off
0,50764	3,278568	17,019357	3,0321153	16,459997	2,0599273	11,015772	2,0599273	9,8960398
0,63484	3,1825227	16,895715	2,9297307	15,921606	2,0599273	10,984197	2,0599273	9,859019
0,74204	3,0321153	16,875905	2,8785383	15,638457	1,9900877	10,792547	1,9900877	9,9325033
0,82924	2,980923	15,943877	2,6614805	15,24258	1,920248	10,323962	1,8504083	9,202884
0,89644	2,9297307	15,366458	2,5509035	14,98099	1,8504083	10,005428	1,7805687	9,0807449



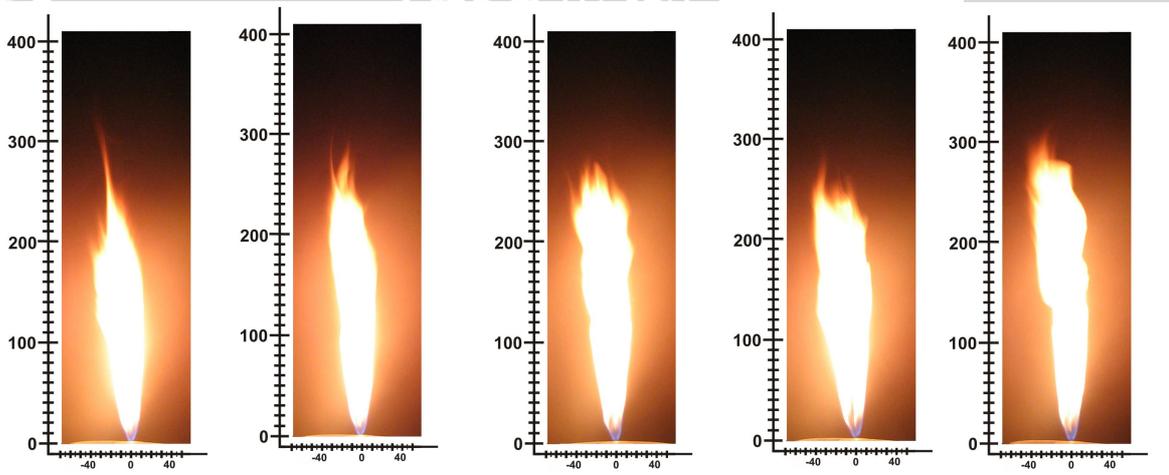
Visualisasi api difusi saat mulai *lift off* dan sesaat sebelum terjadi *blow off*



(a) (b) (c) (d) (e)

Visualisasi api saat mulai terjadi *lift off* pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *swirl nozzle* sudut alur 30°

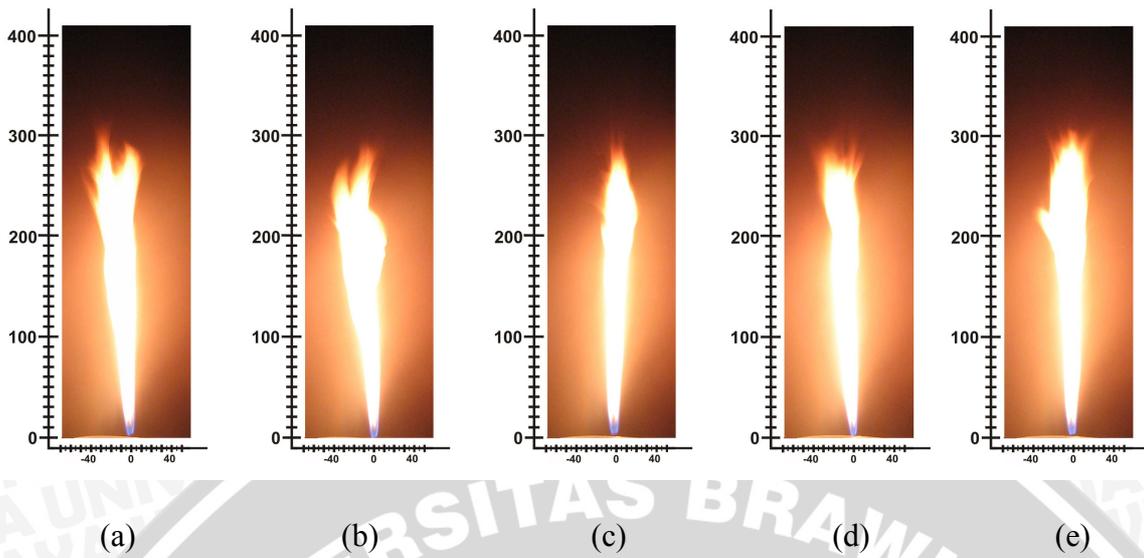
- (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (e) 0,89644 m/s
 (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s



(a) (b) (c) (d) (e)

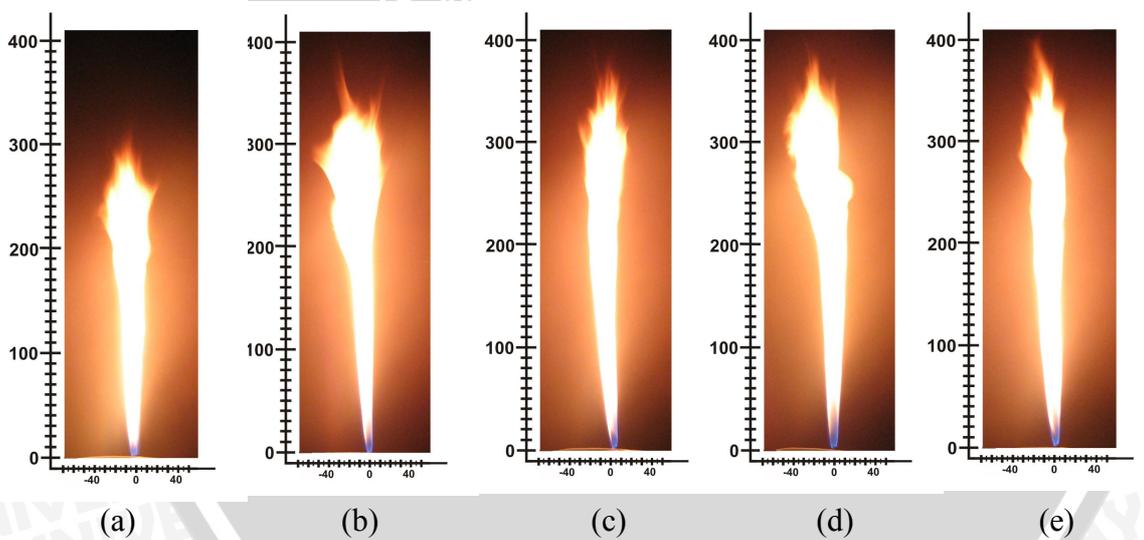
Visualisasi api saat mulai terjadi *lift off* pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *swirl nozzle* sudut alur 60°

- (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (e) 0,89644 m/s
 (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s



Visualisasi api saat mulai terjadi *lift off* pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *swirl nozzle* sudut alur 60°

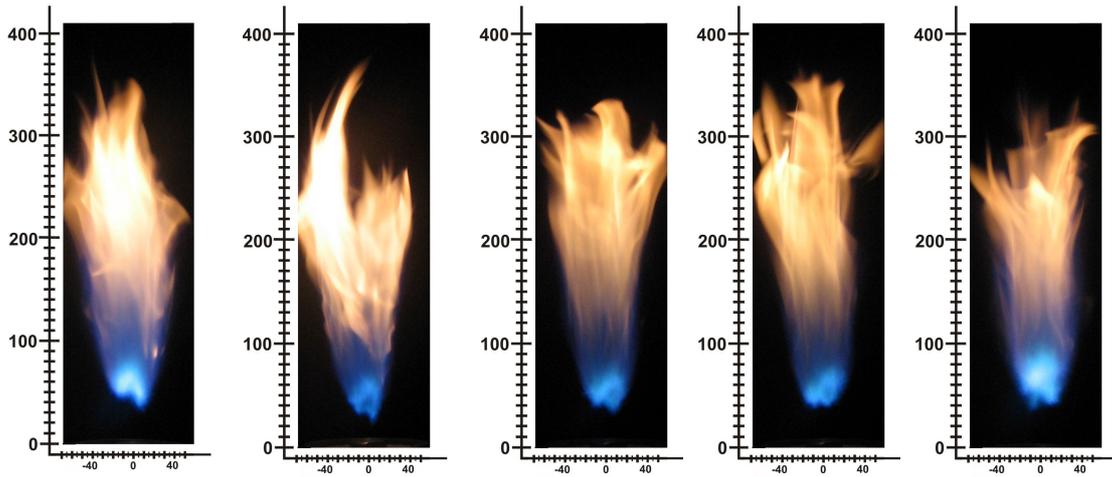
- (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (e) 0,89644 m/s
 (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s



Visualisasi api saat mulai terjadi *lift off* (pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *konvergen nozzle*

- (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (e) 0,89644 m/s
 (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s

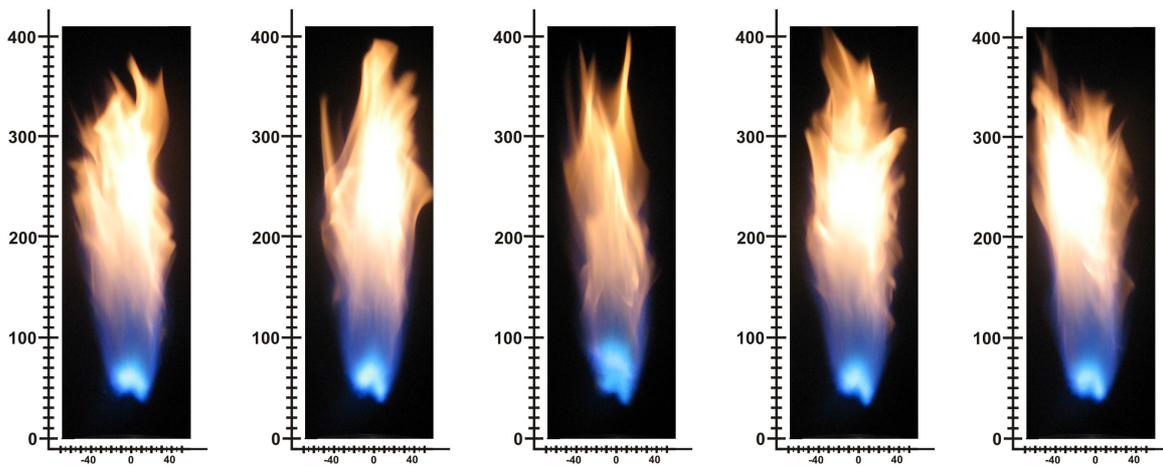




(a) (b) (c) (d) (e)

Visualisasi api sesaat sebelum terjadi *blow off* pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *swirl nozzle* sudut alur 30°

- (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (e) 0,89644 m/s
 (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s

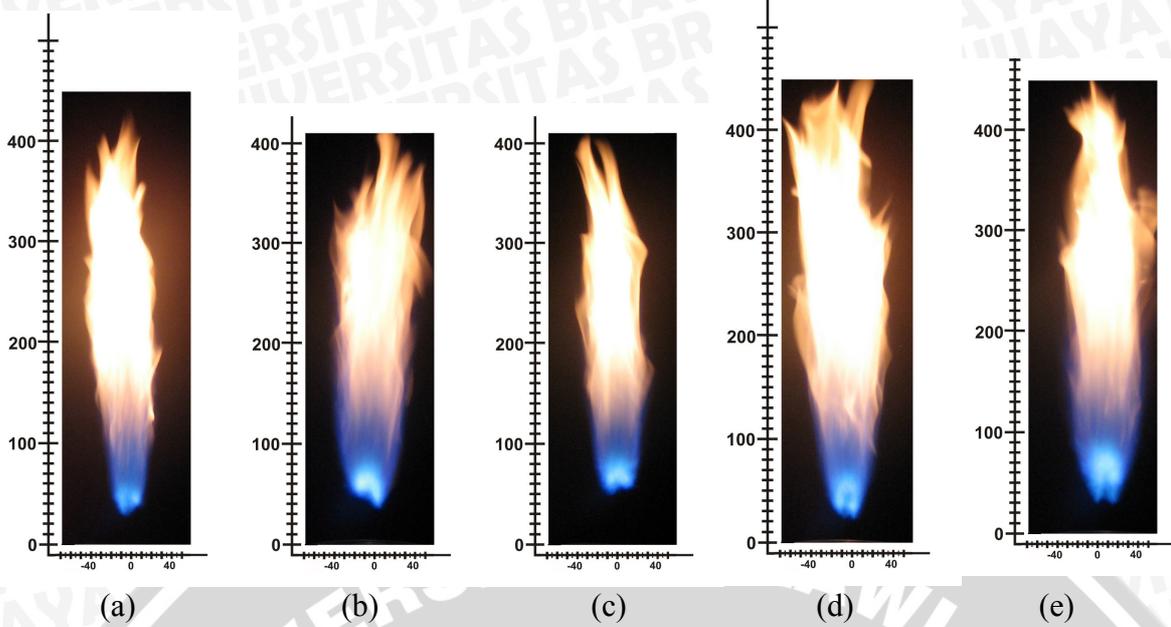


(a) (b) (c) (d) (e)

Visualisasi api sesaat sebelum terjadi *blow off* pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *swirl nozzle* sudut alur 60°

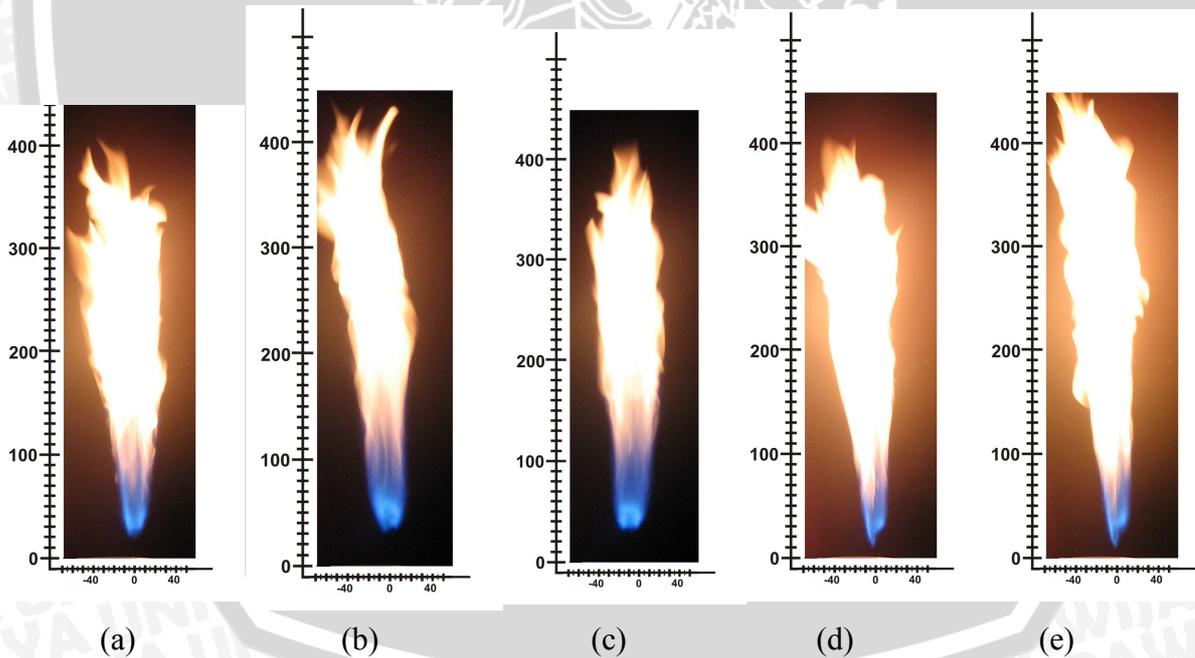
- (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (e) 0,89644 m/s
 (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s





Visualisasi api sesaat sebelum terjadi *blow off* pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *swirl nozzle* sudut alur 90°

- (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (e) 0,89644 m/s
 (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s



Visualisasi api sesaat sebelum terjadi *blow off* pada berbagai variasi kecepatan udara aksial dengan menggunakan *konvergen nozzle*

- (a) 0,50764 m/s (b) 0,74204 m/s (e) 0,89644 m/s
 (c) 0,63484 m/s (d) 0,82924 m/s

