



**PENGARUH VARIASI DIAMETER *BUNSEN BURNER* TERHADAP
KARAKTERISTIK NYALA API PREMIX GAS METANA**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**WINEDI KURNIAWAN
NIM. 135060201111079**

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

FAKULTAS TEKNIK

MALANG

2017

**JUDUL SKRIPSI:****PENGARUH VARIASI DIAMETER BUNSEN BURNER TERHADAP
KARAKTERISTIK NYALA API PREMIX GAS METANA****Nama Mahasiswa : Winedi Kurniawan****NIM : 135060201111079****Program Studi : Teknik Mesin****Konsentrasi : Konversi Energi****KOMISI PEMBIMBING:****Dosen Pembimbing I : Agung Sugeng Widodo, ST.,MT.,Ph.D****Dosen Pembimbing II : Francisca Gayuh Utami Dewi, ST., MT****TIM PENGUJI:****Dosen Penguji I : Ir. Soeharto, MT.****Dosen Penguji II : Dr. Eng. Eko Siswanto, ST., MT.****Dosen Penguji III : Dr. Femiana Gapsari Madhi Fitri, ST., MT.****Tanggal Ujian : 07 Juni 2017****SK Penguji : 639/UN10.6.62/AK/2017**

**LEMBAR PENGESAHAN****PENGARUH VARIASI DIAMETER *BUNSEN BURNER* TERHADAP
KARAKTERISTIK NYALA API PREMIX GAS METANA****SKRIPSI
TEKNIK MESIN KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



**WINEDI KURNIAWAN
NIM. 135060201111079**

Skripsi ini telah direvisi dan disetujui oleh dosen pembimbing
pada tanggal 12 Juli 2017

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Agung Sugeng Widodo, ST., MT., Ph.D.
NIP. 19710321 199802 1 001

Francisca Gayuh Utami Dewi, ST., MT.
NIP. 2011038209192 001

Mengetahui
Ketua Program Studi S1

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



PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelurusan 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 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, Mei 2017

Mahasiswa,

Winedi Kurniawan

NIM. 135060201111079

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala limpahan rahmat, hidayah dan karunia-Nya yang telah diberikan kepada penulis sehingga dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Pengaruh Variasi Diameter Bunsen Burner terhadap Karakteristik Nyala Api Premix Gas Metana” dengan baik.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini dapat terselesaikan berkat bantuan, petunjuk dan bimbingan dari berbagai pihak dalam proses penyelesaian skripsi ini dengan baik. Oleh karena itu, dalam kesempatan kali ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak-pihak yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi ini:

1. Bapak Agung Sugeng Widodo, ST.,MT.,Ph.D selaku dosen pembimbing I yang telah memberikan motivasi, bimbingan dan arahan demi kesempurnaan penulisan skripsi.
2. Ibu Francisca Gayuh Utami Dewi, ST., MT selaku dosen pembimbing II sekaligus Ketua Kelompok Dasar Keahlian Konsentrasi Teknik Konversi Energi Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah memberikan bimbingan sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.
3. Bapak Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang
4. Bapak Purnami, ST., MT. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang
5. Ibu Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. selaku Ketua Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang.
6. Seluruh Dosen Pengajar Jurusan Teknik Mesin Universitas Brawijaya Malang yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan yang sangat mendukung selama penyusunan skripsi.
7. Kedua orang tua yang telah mendukung moril maupun materil sampai sekarang ini.
8. Kakak Rizalatul Rohmah yang senantiasa selalu mendoakan dan memotivasi penulis.
9. Firdaus Sutra K., Rachmad Budi W., Yasykur Nasrulloh dan Ahmad Syai Gufron selaku teman-teman seperjuangan yang membantu dalam menyelesaikan pengerjaan skripsi ini.
10. Rizki Yulia yang senantiasa selalu mendoakan dan memotivasi penulis.
11. Seluruh teman-teman asisten Laboratorium Metrologi Industri yang telah memberikan banyak masukan dan bantuan kepada penulis.



12. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Mesin (KBMM) Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang yang telah memberikan bantuan kepada penulis.
13. Semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

Penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun untuk dapat digunakan sebagai perbaikan karena penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna. Akhir kata, penulis berharap agar skripsi ini dapat berguna bagi kita semua sehingga dapat menjadi acuan untuk penelitian lebih lanjut demi kemajuan kita bersama.

Malang, Juli 2017

Penulis

RINGKASAN

Winedi Kurniawan, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2017, *Pengaruh Variasi Diameter Bunsen Burner terhadap Karakteristik Nyala Api Premix Gas Metana*, Dosen Pembimbing: Agung Sugeng Widodo dan Francisca Gayuh Utami Dewi.

Gas alam merupakan salah satu bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar minyak (BBM) yang semakin pesat penggunaannya saat ini. Dalam gas alam, terkandung kurang lebih 96% gas metana (CH_4). Berdasarkan kandungan metana yang cukup tinggi tersebut, sangat penting memperoleh pengetahuan lebih banyak sehubungan dengan karakteristik pembakaran metana. Salah satunya adalah dengan mengkaji menggunakan kecepatan api laminer. Kecepatan api laminer merupakan sebuah parameter dari proses pembakaran dimana sangat penting untuk pemodelan pembakaran turbulen, validasi mekanisme kinetik mesin dan desain mesin. Untuk mengetahui reaksi pembakaran yang sesuai, diperlukan sebuah alat pengujian karakteristik nyala api, salah satunya adalah *bunsen burner*.

Pada penelitian ini, dilakukan penelitian karakteristik nyala api laminer menggunakan *bunsen burner* dengan variasi ukuran diameter dikarenakan diameter *bunsen burner* pada penelitian-penelitian sebelumnya hanya digunakan sebagai variabel terkontrol, sedangkan saat ini belum diperoleh ukuran diameter *bunsen burner* yang terstandarisasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh variasi diameter *bunsen burner* terhadap karakteristik nyala api *premixed* dengan bahan bakar metana. Pada penelitian ini dilakukan lima variasi ukuran diameter *bunsen burner* yaitu 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm dan 12 mm untuk mengetahui pengaruhnya terhadap karakteristik nyala api dengan diuji menggunakan variasi ekuivalen rasio 1,05; 1,12; 1,23; 1,36; 1,49 dan 1,68.

Hasil dari penelitian ini adalah variasi diameter *bunsen burner* memiliki pengaruh terhadap karakteristik nyala api. Kecepatan api laminer akan semakin kecil sering bertambahnya ukuran diameter, tinggi api dan temperatur api akan semakin rendah seiring semakin besar ukuran diameter *bunsen burner*. Berdasarkan pengujian dengan nilai ekuivalen rasio maka tinggi api akan semakin naik, kecepatan dan temperatur api akan turun seiring dengan kenaikan nilai ekuivalen rasio.

KATA KUNCI: *Bunsen burner*, metana, karakteristik nyala api, ekuivalen rasio.

SUMMARY

Winedi Kurniawan, *Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, University of Brawijaya, May 2017, The Effect of Variation Bunsen Burner's Diameters to The Characteristics Premixed Flames of Methane Fuel, Academic Supervisor: Agung Sugeng Widodo dan Francisca Gayuh Utami Dewi.*

Natural gas is one of the alternative fuel to substitute oil fuel on this day. Natural gas approximately contains of 96 % methane gas (CH₄), so it is important to gain more knowledge about the characteristic of methane's combustion. One of them is by examining the characteristic using laminar's flames speed. Laminar's flames speed is an important parameter of a combustion process which are necessary for turbulent combustion model, mechanism validation of mechanical kinetic and machine design. To know the appropriate combustion reaction, is need a device to test the flame characteristic, especially bunsen burner.

In this research, examined the characteristics of laminar flames using bunsen burner with variation of bunsen burner's diameter, because in previous research were only used bunsen burners diameter as controlled variables, while there is no standart size of bunsen burner diameter. The purpose of this research was to determine the effect of bunsen burner diameter variation on characteristics of premixed flame with methane fuel. This research, used five variations of bunsen burner diameter were 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm and 12 mm to determine the effect on flame characteristics tested by variation of equivalent ratio of 1.05; 1.12; 1.23; 1.36; 1.49 and 1.68.

The result of this research is variation of bunsen burner diameter have influence to flame characteristic. The laminar flame speed will be smaller as the diameter increases, the flame height and flame temperature will be decreased when the bunsen burner diameter was increasing. Based on the examine with increasing the ratio equivalent, the flame's height will increase, then the laminar flame speed and temperature will decrease.

Keywords: *Bunsen burner, methane, flame characteristic, the ratio equivalent.*

**DAFTAR ISI**

	Halaman
KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
SUMMARY	ix
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Penelitian Sebelumnya	5
2.2 Pembakaran	6
2.3 Klasifikasi Pembakaran.....	7
2.3.1 Pembakaran Berdasarkan Reaktan Terbakar pada Zona Reaksi.....	7
2.3.2 Pembakaran Berdasarkan Perilaku Aliran Reaktan saat Melewati Zona Reaksi.....	8
2.3.3 Pembakaran Berdasarkan Keadaan Fisik Awal dari Bahan Bakar	9
2.4 Karakteristik Nyala Api	9
2.5 Api <i>Premixed</i> Laminer.....	11
2.6 Bahan Bakar	13
2.7 Metana.....	14
2.8 Perbandingan Udara dan Bahan Bakar (AFR).....	15
2.9 <i>Equivalence Ratio</i> (Φ).....	16
2.10 Kestabilan Nyala Api	16
2.10.1 <i>lift-off</i>	17



2.10.2 <i>Flashback</i>	17
2.10.3 <i>Blow off</i>	17
2.10 <i>Bunsen Burner</i>	18
2.11 Bilangan <i>Reynold</i>	18
2.12 Hipotesa	19

BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian	21
3.2 Tempat dan Waktu Penelitian	21
3.2.1 Tempat Penelitian	21
3.2.2 Waktu Penelitian	21
3.3 Variabel Penelitian	21
3.4 Alat dan Bahan Penelitian.....	22
3.5 Instalasi Penelitian	26
3.6 Metode Pengumpulan Data.....	27
3.7 Metode Pengolahan Data	28
3.8 Diagram Alir Penelitian	29

BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Visualisasi Nyala Api	31
4.2 Pengolahan Data Karakteristik Nyala Api.....	33
4.2.1 Pengolahan Data Visual.....	33
4.3.2 Tabel Hasil Perhitungan Karakteristik Nyala Api.....	35
4.3 Perhitungan Bilangan <i>Reynold</i>	36
4.4 Grafik dan Pembahasan.....	37
4.4.1 Grafik Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Kecepatan Api Laminer...	37
4.4.2 Grafik Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Temperatur Api Laminer .	40
4.4.3 Grafik Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Tinggi Api.....	42

BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan	45
5.2 Saran.....	45

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN



DAFTAR TABEL

No.	Judul	Hal.
Tabel 4.1	Tabel Data <i>Bunsen Burner</i> diameter 8 mm	34
Tabel 4.2	Tabel Data <i>Bunsen Burner</i> diameter 9 mm	34
Tabel 4.3	Tabel Data <i>Bunsen Burner</i> diameter 10 mm	34
Tabel 4.4	Tabel Data <i>Bunsen Burner</i> diameter 11 mm	34
Tabel 4.5	Tabel Data <i>Bunsen Burner</i> diameter 12 mm	34
Tabel 4.6	Hasil Perhitungan Karakteristik Nyala Api Masing-masing Variasi Diameter <i>Bunsen Burner</i>	36
Tabel 4.7	Hasil Perhitungan Bilangan Reynolds untuk Variasi Diameter <i>Bunsen Burner</i>	37



DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Reaksi pembakaran	7
Gambar 2.2	Pembakaran difusi.....	8
Gambar 2.3	Pembakaran <i>Premix</i>	8
Gambar 2.4	(a) api premix laminer; (b) api premix turbulen	9
Gambar 2.5	Detail struktur di dalam api <i>premixed</i>	10
Gambar 2.6	Struktur api laminer	11
Gambar 2.7	Skema nyala api pada <i>bunsen burner</i>	12
Gambar 2.8	Vektor diagram kecepatan nyala api laminer.....	13
Gambar 2.9	<i>lifted</i> dan <i>blow-off</i> . (a) <i>flashback</i> ; (b) stabil; (c) <i>lift-off</i> ; (d) <i>lifted</i> ; (e) <i>blow-off</i>	18
Gambar 3.1	Desain <i>Bunsen Burner</i>	23
Gambar 3.2	Kompresor Udara.....	24
Gambar 3.3	<i>Mixing Chamber</i>	24
Gambar 3.4	<i>Flowmeter</i>	24
Gambar 3.5	<i>Thermocouple</i>	25
Gambar 3.6	Selang.....	25
Gambar 3.7	Instalasi Penelitian	27
Gambar 3.8	Diagram Alir	29
Gambar 4.1	Nyala api <i>bunsen burner</i> pada diameter 8 mm dengan variasi ekuivalen rasio.....	32
Gambar 4.2	Nyala api <i>bunsen burner</i> pada variasi diameter dengan ekuivalen rasio 1,36.....	32
Gambar 4.3	Pengolahan data karakteristik nyala api <i>bunsen burner</i> pada diameter 10 mm dengan ekuivalen rasio 1,36	33
Gambar 4.4	Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Kecepatan Api Laminer	37
Gambar 4.5	Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Temperatur Atas Api Laminer	40
Gambar 4.6	Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Temperatur Tengah Api Laminer.....	40
Gambar 4.7	Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Tinggi Api	42

**DAFTAR LAMPIRAN**

No.	Judul
Lampiran 1	Gambar Data Visual Api
Lampiran 2	Pengolahan Data Visual Sudut dan Tinggi Api
Lampiran 3	Pengolahan Data Visual Tinggi Api Luar
Lampiran 4	Tabel Hasil Karakteristik Nyala Api
Lampiran 5	Data Kalibrasi Flowmeter Gas metana
Lampiran 6	Data Kalibrasi Flowmeter Udara



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada era modern saat ini, teknologi pembakaran merupakan salah satu cabang ilmu dalam konversi energi yang sering dipelajari. Teknologi pembakaran sendiri merupakan ilmu yang mempelajari tentang termofluida terapan dimana digunakan dalam menganalisa dan mempelajari tentang proses pembakaran, bahan bakar, dan karakteristik nyala api. Pengertian pembakaran sendiri secara umum adalah suatu proses reaksi kimia antara material mampu bakar (bahan bakar) dan oksigen sebagai pengoksidasi yang menghasilkan panas dan cahaya (Wardana, 2008). Adapun bahan bakar yang dipelajari dalam pembakaran dapat berupa bahan bakar padat, cair, maupun gas.

Gas alam merupakan salah satu bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar minyak (BBM) yang semakin meningkat pesat penggunaannya saat ini. Hampir semua sektor, baik rumah tangga, transportasi, hingga industri telah banyak yang mulai beralih menggunakan gas alam. Menurut Wardana (2008, p.17), dalam gas alam, terkandung kurang lebih 96% gas metana (CH_4). Berdasarkan kandungan metana yang cukup tinggi tersebut, sangat penting memperoleh pengetahuan lebih banyak sehubungan dengan sifat dan properti pembakaran yang tepat untuk metana.

Reaksi pembakaran merupakan suatu hal yang umum sering terjadi dalam kehidupan sehari-hari. Agar mendapatkan hasil pembakaran yang efisien dan sempurna, maka dibutuhkan pengetahuan mengenai karakteristik pembakaran dari suatu bahan bakar. Kecepatan api laminar adalah sebuah parameter penting dari suatu proses pembakaran dimana mengandung informasi mendasar mengenai difusifitas, reaktifitas, dan *exothermicity*. Parameter-parameter tersebut sangat penting untuk pemodelan pembakaran turbulen, validasi mekanisme kinetik mesin, dan desain mesin.

Untuk mengetahui reaksi pembakaran yang sesuai, diperlukan sebuah piranti pengujian karakteristik nyala api. Terdapat berbagai macam piranti yang digunakan untuk pengujian karakteristik nyala api pembakaran, salah satu yang umum digunakan adalah dengan menggunakan *bunsen burner*. *Bunsen burner* adalah suatu alat pembakaran yang memiliki katup udara untuk mengatur campuran bahan bakar dan udara.

Terdapat berbagai penelitian pengujian karakteristik nyala api dengan menggunakan *bunsen burner*. Zhen et al. (2014) melakukan penelitian tentang karakteristik api premix

biogas-hidrogen menggunakan *bunsen burner* dengan diameter dalam 9 mm. Zhen et all. (2016) meneliti tentang dampak pemanasan udara terlebih dahulu terhadap karakteristik pembakaran dan perpindahan panas pada *bunsen burner* dengan ukuran diameter dalam 8,5 mm. Dalam penelitian Chris (2016) dilakukan penelitian tentang karakteristik nyala api gas LPG menggunakan *bunsen burner* berdiameter dalam 6 mm. Akan tetapi pada penelitian-penelitian ini, diameter *bunsen burner* hanya digunakan sebagai variabel terkontrol, sedangkan saat ini belum diperoleh ukuran diameter *bunsen burner* yang terstandarisasi.

Semakin besar ukuran diameter *bunsen burner* maka kecepatan api semakin rendah, suhu semakin rendah dan tinggi api semakin rendah. Berdasarkan permasalahan tersebut, dilakukan penelitian karakteristik nyala api *premixed* menggunakan piranti *bunsen burner* dengan memvariasikan diameter dalam dari *bunsen burner* sehingga diperoleh diameter yang sesuai untuk menentukan pengujian karakteristik nyala api *premixed*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang diatas, maka didapat rumusan masalah yaitu “Bagaimana pengaruh variasi diameter *bunsen burner* terhadap karakteristik nyala api premix metana?”

1.3 Batasan Masalah

Untuk menjadikan penelitian ini lebih terarah, maka penulis memberikan batasan-batasan masalah adalah sebagai berikut:

1. *Losses* aliran pada instalasi diabaikan.
2. Tekanan ruangan dianggap 1 atm.
3. Temperatur ruangan saat melakukan pengujian pada $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$
4. Pencampuran udara dan bahan bakar dianggap telah tercampur sempurna.

1.4 Tujuan Penelitian

Adapun penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi diameter *bunsen burner* terhadap karakteristik nyala api *premixed* dengan bahan bakar metana.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Diameter yang efektif dapat diaplikasikan pada penelitian karakteristik nyala api selanjutnya.



2. Mengetahui diameter *bunsen burner* yang efektif pada pembakaran *premixed* gas metana.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Muhaya (2015) melakukan penelitian tentang pembakaran *premixed* minyak nabati pada *bunsen burner*. Dalam penelitiannya, digunakan minyak kelapa murni, jarak pagar, dan biji kapuk sebagai minyak nabati dengan variasi *equivalence ratio* (ϕ), masing-masing adalah sebagai berikut: (2.00, 1.87, 1.78, 1.66), (1.73, 1.62, 1.52, 1.44) dan (1.76, 1.65, 1.55, 1.46). Hasil dari penelitian ini adalah semakin tinggi nilai *equivalence ratio* maka pola api yang terlihat semakin mengecil hingga terjadi *blow off*. Hal tersebut dikarenakan semakin kaya udara akan menyebabkan bahan bakar memiliki udara yang berlebih sehingga bahan bakar yang terbakar secara difusi semakin berkurang dan menyebabkan pembakaran yang dekat dengan permukaan ujung nosel *bunsen burner* sehingga tinggi api yang terbentuk semakin pendek hingga terjadi *blow off* atau padam.

Tamadonfar dan Gülder (2016) dalam jurnalnya melakukan penelitian tentang efek dari diameter *bunsen burner* terhadap kecepatan pembakaran api *premixed* turbulen. Dalam penelitiannya dilakukan variasi diameter *bunsen burner* yaitu 11,1 mm dan 22,2 mm dengan variasi *equivalence ratio* dalam rentang 0,6 sampai 1. Adapun hasil dari penelitiannya adalah semakin besar diameter maka kecepatan pembakarannya semakin tinggi.

Janwar (2016) meneliti tentang karakteristik nyala api laminar pada *bunsen burner* dan *slot burner* dengan menggunakan bahan bakar LPG. Pada penelitian ini, ukuran celah dari *slot burner* yang digunakan adalah 3mm \times 9 mm dan ukuran dari diameter *bunsen burner* adalah 6 mm. Nilai *equivalence ratio* antara campuran udara dan gas LPG yang digunakan dalam penelitian ini adalah 0,67; 0,81; 0,89; 1,07; 1,34; dan 2,2. Adapun hasil dari penelitian ini adalah kecepatan api laminar pada *slot burner* lebih tinggi dari kecepatan api pada *bunsen burner*, tinggi api pada *slot burner* lebih tinggi dari *bunsen burner*, dan temperatur api pada *slot burner* lebih tinggi daripada temperatur api pada *bunsen burner*.

Zhen et all. (2014) pada jurnalnya meneliti tentang karakteristik api premix dari campuran biogas-hidrogen dengan menggunakan *bunsen burner*. Dalam penelitiannya menghubungkan efek penambahan hidrogen pada biogas dan fraksi hidrogen dalam campuran biogas-hidrogen terhadap stabilitas, karakteristik termal dan emisi pembakaran menggunakan *bunsen burner* dengan diameter dalam 9 mm. *Equivalence ratio* pada

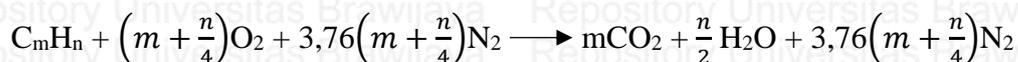
penelitian ini divariasikan dari 0,8 sampai dengan 1,2 dan variasi fraksi hidrogen dalam campuran biogas-H₂ adalah 10% sampai dengan 50%. Hasil dari penelitian ini adalah semakin besar fraksi hidrogen dalam campuran biogas-H₂ maka temperatur api semakin meningkat dan nilai emisi CO semakin menurun.

2.2 Pembakaran

Pembakaran merupakan proses atau reaksi oksidasi yang terjadi bahan bakar dengan oksidator (oksigen) dengan adanya bantuan energi dari luar (energi aktivasi) yang disertai timbulnya cahaya dan energi panas (Turns, 1996). Energi aktivasi sendiri berupa panas dan berfungsi untuk pemutus ikatan-ikatan atom bahan bakar menjadi radikal (ion) dan sangat efektif. Ion-ion tersebut akan bereaksi dengan oksigen untuk membentuk ikatan yang lebih kuat dan kelebihan-kelebihan dari energi ikatan tersebut akan dilepas kedalam sistem. Sehingga menyebabkan kenaikan temperatur yang tinggi.

Pembakaran yang sempurna adalah pembakaran dimana bahan bakar terbakar secara sempurna dengan menghasilkan produk pembakaran secara sempurna. Kondisi ini disebut kondisi stoikiometri yang mana produk dari pembakaran senyawa hidrokarbon adalah CO₂, H₂O, dan N₂ yang merupakan inert gas. Adapun maksud dari inert gas adalah suatu gas yang memiliki bentuk senyawa yang stabil dimana gas tersebut tidak ikut bereaksi dengan oksigen maupun bahan bakar.

Reaksi pembakaran merupakan reaksi eksotermis dikarenakan pada reaksi pembakaran menghasilkan panas. Jika oksigen yang digunakan pada reaksi berasal dari udara, dimana susunan udara adalah 21% oksigen, 78% nitrogen, dan sisanya gas-gas lainnya. Maka akan didapat reaksi stoikiometri pembakarannya dari hidrokarbon murni C_mH_n yang dapat ditulis sebagai berikut:



Pada persamaan reaksi diatas dianggap sebagai reaksi ideal, dimana pada persamaan reaksi diatas merupakan reaksi pembakaran sempurna. Adapun pada makalah ini menggunakan gas metana (CH₄), sehingga diperoleh persamaan reaksinya:





Gambar 2.1 Reaksi pembakaran
Sumber: Wardana (2008, p. 03)

2.3 Pengklasifikasian Pembakaran

Secara umum pembakaran diklasifikasikan menjadi tiga jenis pembakaran yaitu berdasarkan jenis pembakaran yang di tentukan oleh reaktan terbakar pada zona reaksi, perilaku aliran (aerodinamika) reaktan saat melewati zona reaksi dan pembakaran yang ditentukan oleh keadaan fisik awal bahan bakar

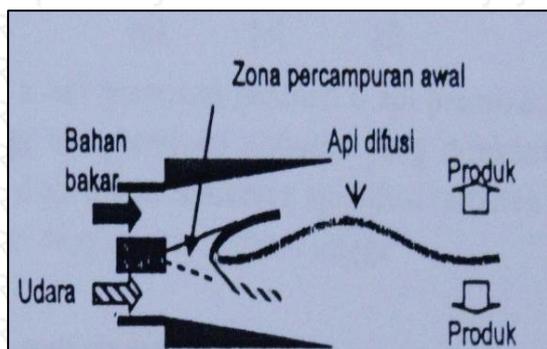
2.3.1 Pembakaran Berdasarkan Reaktan Terbakar pada Zona Reaksi

Berdasarkan reaktan terbakar pada zona reaksi, pembakaran dikelompokkan menjadi dua yaitu pembakaran difusi dan pembakaran *premixed*.

a. Pembakaran Difusi

Pembakaran difusi adalah suatu proses pembakaran dimana bahan bakar dan oksidator (O_2 atau Udara) dicampur dengan cara mekanik, dimana dalam proses pencampurannya secara alami dengan proses difusi. Pada pembakaran difusi, nyala api bergantung pada sifat bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar dengan udara sekitarnya.

Dalam proses pembakaran difusi, api tidak akan menyala apabila laju bahan bakar dengan oksidator yang dialirkan tidak tepat. Ketika kondisi pencampuran bahan bakar dan udara (oksidator) telah mendekati kondisi stoikiometrik, dan api melepaskan panas di daerah pencampuran tersebut sudah cukup maka pembakarannya akan berlangsung. Adapun contoh pembakaran difusi dalam kehidupan sehari-hari adalah nyala api pada proses pembakaran pada kayu bakar dan kertas.

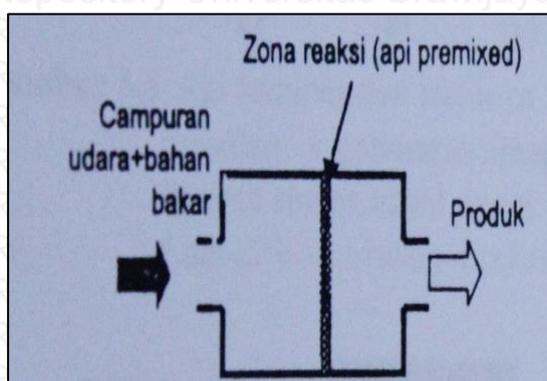


Gambar 2.2 Pembakaran difusi
Sumber: Wardana (2008, p.149)

b. Pembakaran *Premixed*

Pembakaran *premixed* adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan oksidator (oksigen atau udara) telah tercampur secara sempurna sebelum terbakar di zona reaksi. Pada pembakaran *premixed*, proses reaksi antara bahan bakar dan udara berlangsung secara cepat dan biasanya pada tekanan tetap.

Pembakaran *premixed* mempunyai nilai efisiensi pembakaran yang tinggi. Hal ini disebabkan oleh bahan bakar dan udara telah bercampur secara sempurna sebelum masuk dalam reaksi pembakaran. Pada pembakaran *premixed*, pembakaran dalam kondisi stoikiometri sehingga membuat bahan bakar dapat terbakar seluruhnya dan tidak terdapat bahan bakar yang terbentuk pada produk hasil pembakaran.



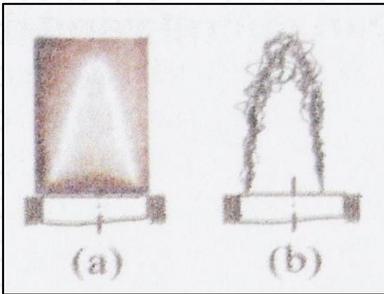
Gambar 2.3 Pembakaran *Premix*
Sumber: Wardana (2008, p.149)

2.3.2 Pembakaran Berdasarkan Perilaku Aliran Reaktan saat Melewati Zona Reaksi

Menurut wardana (2008), pembakaran berdasarkan perilaku reaktan saat melewati zona reaksi dibagi menjadi dua yaitu pembakaran laminar dan pembakaran turbulen. Pada pembakaran laminar, semua proses pencampuran dan proses perjalanan reaktan maupun panas terjadi secara molekuler. Pada pembakaran turbulen keseluruhan pencampuran



maupun proses penjalaran dibantu oleh gerakan pusaran aliran makro turbulen. Turbulensi akan membantu meningkatkan kecepatan api atau kecepatan reaksi pembakaran.



Gambar 2.4 (a) api premix laminar; (b) api premix turbulen
Sumber: wardana (2008)

2.3.3 Pembakaran Berdasarkan Keadaan Fisik Awal dari Bahan Bakar

Untuk karakteristik pembakaran yang ditunjukkan dari keadaan fisik awal dari bahan bakar, maka dibagi menjadi bahan bakar padat, cair dan gas. Pada pembakaran bahan bakar padat dapat diamati pada saat pembakaran batu bara atau pembakaran kayu. Pembakaran bahan bakar cair dapat dilihat pada proses pembakaran di mesin diesel, mesin bensin, maupun pada boiler dengan bahan bakar cair. Adapun pembakaran dengan bahan bakar gas dapat dijumpai pada pembakaran yang terjadi pada kompor yang berbahan bakar LPG.

2.4 Karakteristik Nyala Api

Karakteristik nyala api adalah sesuatu hal yang menjadi pusat perhatian dan di amati pada proses penelitian pembakaran dimana nantinya akan dibandingkan antara karakteristik suatu bahan bakar dengan bahan bakar lain. Adapun karakteristik nyala api yang di amati pada penelitian yang saya lakukan adalah:

a. Temperatur Pembakaran

Temperatur pembakaran adalah temperatur tertinggi yang nantinya diukur pada pusat api saat pembakaran berlangsung. Temperatur pembakaran dipengaruhi oleh nilai kalor bahan bakar itu sendiri. Nilai kalor adalah jumlah energi kalor yang dilepaskan bahan bakar pada waktu terjadinya oksidasi unsur-unsur kimia yang ada pada bahan bakar tersebut.

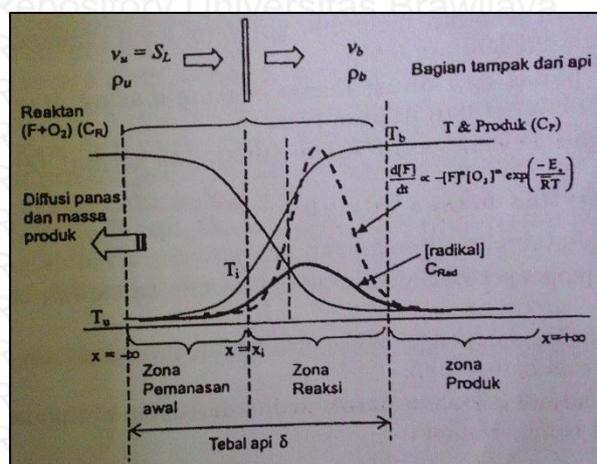
b. Dimensi api

Dimensi api berperan dalam penentuan secara kasat mata apakah pembakaran yang terjadi nantinya merupakan pembakaran dengan reaksi yang cepat atau lambat. Apabila reaksi bahan bakar untuk terbakar semakin cepat, maka dimensi api akan semakin kecil

dan begitu juga sebaliknya, jika reaksi pembakaran lambat, maka api cenderung semakin panjang dan lebar. Hal tersebut dikarenakan semakin lama reaksi pembakaran maka semakin lama pula waktu yang diperlukan oleh bahan bakar untuk dapat beroksidasi dan terbakar.

c. Kecepatan api

Dalam api terjadi gradien temperatur dimana temperatur produk lebih tinggi dari temperatur reaktan. Adapun berdasarkan hukum termodinamika maka akan terjadi proses transfer panas dari produk ke reaktan. Transfer panas yang terjadi secara terus menerus akan meningkatkan temperatur reaktan. Jika temperatur reaktan meningkat maka daerah pemanasan awal akan bergeser ke kanan, sedangkan zona yang tadinya menjadi zona pemanasan awal temperturnya akan lebih tinggi sehingga terjadi pembakaran seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.5. Dengan demikian daerah pemanasan awal akan menjadi zona reaksi. Peristiwa ini akan terjadi secara kontinyu sehingga api akan merambat ke arah reaktan. Kecepatan rambat api tersebut disebut kecepatan pembakaran. Pada pembakaran *premixed* diasanya diberi notasi S_L . (wardana, 2008)



Gambar 2.5 Detail struktur di dalam api *premixed*

Sumber: wardana (2008, p. 155)

Dengan menggunakan pendekatan teori kinetik, dapat diketahui hubungan kecepatan dengan temperatur berdasarkan prinsip gas ideal yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{3}{2} \cdot k \cdot T \dots\dots\dots(2-1)$$

Keterangan:

m = massa molekul

v = kecepatan molekul



11

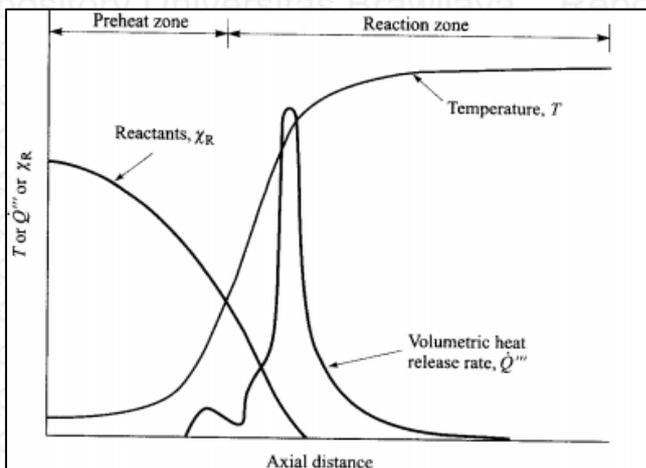
k = konstanta Boltzmann ($1,380 \times 10^{-23}$ J/molekul °K)

T = temperatur

Dimana berdasarkan persamaan (2-1) dapat diketahui bahwa hubungan temperatur dengan kecepatan adalah berbanding lurus. Pada persamaan tersebut menunjukkan bahwa temperatur suatu gas merupakan energi kinetik partikel-partikel dari gas tersebut atau getaran molekul-molekulnya. Apabila dikaitkan dengan reaksi pembakaran, maka untuk membuat molekul-molekul bereaksi atau bertumbukan lebih intens antara satu dengan lainnya maka partikel-partikel gas harus dibuat lebih aktif. Cara konvensional untuk menaikkan energi kinetik molekul-molekul gas adalah dengan menaikkan temperatur gas dengan memanaskan.

2.5 Api Premixed Laminer

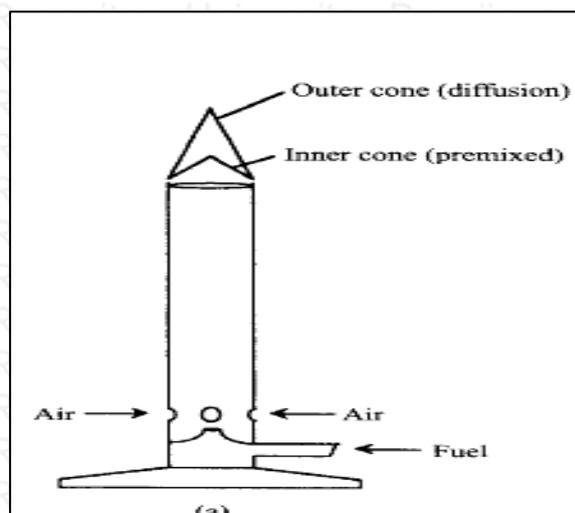
Api laminer adalah bentuk visualisasi api dimana api berbentuk laminer atau teratur. Jenis api ini memiliki bentuk yang mengikuti *strimline* aliran tanpa membentuk gerakan tidak beraturan atau turbulensi. Adapun kecepatan api laminar sendiri didefinisikan sebagai kecepatan normal dari reaktan *premixed* yang mengalir pada zona api, dimana arah alirannya tegak lurus dengan bagian *flame front*. Kecepatan api merupakan nilai yang bisa diukur dari perluasan api dalam reaksi pembakaran.



Gambar 2.6 Struktur api laminer

Sumber: Turn (2010, p.255)

Salah satu metode untuk mengamati nyala api laminer adalah dengan menggunakan piranti *bunsen burner*. Pada *bunsen burner*, api berbentuk kerucut dimana dinding kerucut merupakan permukaan api *premixed*. Api pada *bunsen burner* tidak hanya api *premixed*, namun juga terdapat api difusi di sekitar api laminer.

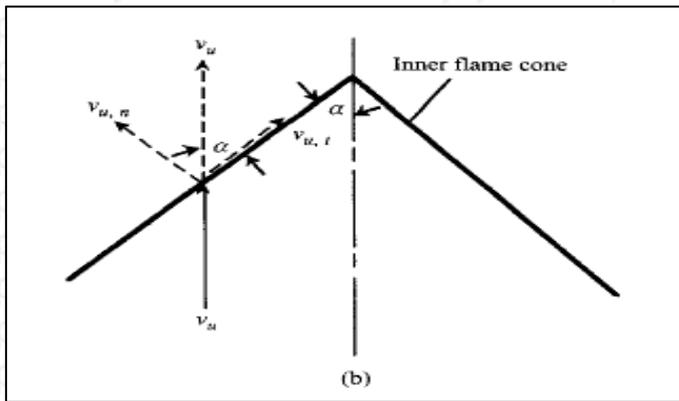


Gambar 2.7 Skema nyala api pada *bunsen burner*

Sumber : Turn (2010, p.257)

Pada gambar 2.5 menunjukkan skema dan bagaimana nyala api dihasilkan oleh *bunsen burner*. Jenis nyala api *bunsen burner* merupakan *dual – flame*, dimana nyala api berbentuk kerucut dengan bagian yang kaya akan bahan bakar akan dikelilingi oleh api difusi. Kerucut pada api *bunsen burner* ada dua, yaitu kerucut bagian dalam adalah kerucut api *premixed* sedangkan kerucut yang bagian luar merupakan kerucut api difusi. Kerucut bagian luar terbentuk karena terdapatnya sebagian bahan bakar yang belum terbakar habis pada api *premixed* yaitu Karbon Monoksida (CO) dan Hidrogen (H_2). Karbon Monoksida (CO) dan Hidrogen (H_2) akan bercampur kembali dengan udara sekitarnya secara difusi molekuler kemudian terbakar membentuk api difusi. Namun, secara ideal api difusi ini dianggap tidak ada sebab diasumsikan bahwa bahan bakar akan habis terbakar sempurna pada zona reaksi *premixed* (Wardhana, 2008).

Pada *bunsen burner*, supaya api yang dihasilkan stasionaris, kecepatan api harus sama dengan kecepatan normal komponen dari gas reaktan pada tiap bagiannya. Seperti yang dijelaskan dengan penggambaran vektor diagram berikut:



Gambar 2.8 Vektor diagram kecepatan nyala api laminer

Sumber : Turn, (2010, p. 257)

Sehingga diperoleh kecepatan api laminer pada metode *bunsen burner*, yang dapat dihitung dengan persamaan:

$$S_L = v_u \cdot \sin \alpha \dots \dots \dots (2-2)$$

Keterangan:

S_L = kecepatan api laminer (cm/s)

v_u = kecepatan reaktan (cm/s)

α = sudut api yang terbentuk ($^\circ$)

Nilai dari kecepatan reaktan/kecepatan pembakaran sendiri dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$v_u = \frac{Q_{fuel} + Q_{air}}{A_b} \dots \dots \dots (2-3)$$

Dengan:

Q_{fuel} = debit aliran bahan bakar (cm^3/s)

Q_{air} = debit aliran udara (cm^3/s)

A_b = luas bagian melintang *burner* (cm^2)

2.6 Bahan Bakar

Secara garis besar, bahan bakar yang dipakai saat ini dikelompokkan menjadi dua kelompok besar yaitu bahan bakar primer dan bahan bakar sekunder. Bahan bakar sendiri menurut El-Mahallawy (2002) didefinisikan sebagai sumber daya terbatas yang berasal dari energi potensial kimia dimana energi disimpan dalam struktur molekul pada senyawa partikel dan akan dilepaskan melalui reaksi kimia yang kompleks. Bahan bakar primer

adalah bahan bakar dimana bahan bakar tersebut secara langsung dapat dipakai (digunakan) seperti gas alam dan kayu. Adapun bahan bakar sekunder adalah bahan bakar yang membutuhkan proses pengolahan terlebih dahulu dari bahan bakar primer sehingga dapat dipakai. Contoh dari bahan bakar sekunder adalah bensin, solar, dan minyak tanah.

Unsur utama penyusun bahan bakar adalah karbon (C) dan hidrogen (H). Adapun nitrogen (N), belerang (S), karbon dioksida (CO₂), air (H₂O) dan oksigen (O₂) merupakan kandungan moniritas yang ada pada bahan bakar.

2.7 Metana

Metana adalah suatu senyawa hidrokarbon yang memiliki susunan paling sederhana yang berbentuk gas dengan rumus kimia CH₄. Sifat metana murni adalah tidak berbau, namun untuk keperluan keamanan, biasanya diberikan penambahan odoran untuk memberikan bau pada metana seperti metanathiol atau etanathiol guna mendeteksi kebocoran apabila terjadi kebocoran gas. Metana merupakan komponen utama gas alam, sehingga metana adalah sumber bahan bakar utama. Adapun reaksi pembakaran satu molekul gas metana adalah sebagai berikut:



Pada umumnya, metana di agkut dalam bentuk cair yang dibekukan yang biasa disebut LNG (*liquid Natural Gas*). Ketika dalam keadaan cairan yang dibekukan, metana akan memiliki massa jenis yang lebih besar dari udara.

Wardhana (2008) dalam bukunya menjelaskan sifat-sifat dari metana adalah sebagai berikut:

- Densitas dalam kondisi standar : 0,7168 gr/dm³
- Berat jenis spesifik dibandingkan air : 0,554
- Nilai kalor tinggi : 9510 kcal/m³
- Nilai kalor rendah : 8570 kcal/m³
- Volume udara yang diperlukan untuk pembakaran stoikiometrik : 9,52 (m³/m³)
- Suhu pembakaran adiabatik kondisi stoikiometrik pada 25 °C : 1952 °C
- Batas konsentrasi mampu bakar diudara tertinggi : 15%
- Batas konsentrasi mampu bakar diudara terendah : 5%
- Temperatur penyalaan : 580 °C
- Kecepatan rambat api pada campuran stoikiometri pada 25 °C : 43,4 cm/det.

2.8 Perbandingan Udara dan Bahan Bakar (AFR)

Perbandingan udara dan bahan bakar merupakan parameter pembakaran lain yang juga penting perannya dalam suatu reaksi pembakaran. Rasio udara/bahan bakar atau *air/fuel ratio* yang disingkat AFR adalah perbandingan antara jumlah mol (N) atau massa molekul (M) udara dengan jumlah mol atau massa molekul bahan bakar (Wardhana, 2008). Adapun campuran stokiometrik untuk persamaan AFR adalah:

$$(AFR)_{stoi} = \left(\frac{N_{udara}}{N_{bb}} \right)_{stoi} \dots\dots\dots(2-4)$$

$$(AFR)_{stoi} = \left(\frac{M_{udara}}{M_{bb}} \right)_{stoi} \dots\dots\dots(2-5)$$

Keterangan:

$(AFR)_{stoi}$ = Perbandingan antara udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik

N_{bb} = Jumlah mol bahan bakar (mol)

N_{udara} = Jumlah mol udara (mol)

M_{bb} = Massa bahan bakar (kg)

M_{udara} = Massa udara (kg)

Untuk proses pembakaran metana (CH_4) secara stoikiometri, dengan menggunakan persamaan massa, dimana massa molar O_2 adalah 32 gram, N_2 adalah 28 gram, dan massa molar CH_4 adalah 16 gram, maka diperoleh AFR dari CH_4 adalah:

$$AFR = \frac{\text{massa molar udara}}{\text{massa molar CH}_4} = \frac{\text{massa molar } 2(\text{O}_2 + 3,76 \text{ N}_2)}{\text{massa molar CH}_4}$$

$$AFR = \frac{2 (32 + 3,76 \times 28) \text{ gram udara}}{16 \text{ gram bahan bakar}}$$

$$AFR = \frac{274,56 \text{ gram udara}}{16 \text{ gram bahan bakar}}$$

$$AFR = 17,2 \frac{\text{gram udara}}{\text{gram bahan bakar}}$$

Dengan diketahuinya massa metana dan massa udara, maka dapat dihitung nilai *AFR* stoikiometri metana bila dinyatakan dalam perbandingan *volume*, dengan berdasarkan densitasnya.

Diketahui :

- Massa jenis udara adalah $0,0012 \text{ gr/cm}^3$.
- Massa jenis metana adalah $0,000716 \text{ gr/cm}^3$.

➤ menghitung *volume* udara dan metana menggunakan persamaan:

$$V = \frac{m}{\rho} \dots\dots\dots (2-6)$$

$$V_{\text{udara}} = \frac{m}{\rho} \\ = \frac{274,56}{0,0012} = 228.800 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{CH}_4} = \frac{m}{\rho} \\ = \frac{16}{0,000716} = 22.346,368 \text{ cm}^3$$

➤ Sehingga perbandingan *volume* antara udara dan metana dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\begin{array}{lcl} V_{\text{udara}} & : & V_{\text{bahan bakar}} \\ 228.800\text{cm}^3 & : & 22.346,368\text{cm}^3 \\ 10,24 \text{ mL} & : & 1 \text{ mL} \end{array}$$

2.9 Equivalence Ratio (Φ)

Equivalence ratio adalah nilai perbandingan antara rasio udara dengan bahan bakar secara stoikiometri $(AFR)_{\text{stoi}}$ dengan rasio udara dengan bahan bakar secara aktual $(AFR)_{\text{act}}$ yang dirumuskan sebagai berikut:

$$\Phi = \frac{(AFR)_{\text{stoi}}}{(AFR)_{\text{act}}} \dots\dots\dots (2-7)$$

Pada umumnya, *equivalence ratio* dipakai untuk menentukan jenis campuran bahan bakar dengan udara. Apakah campuran tersebut adalah kaya, miskin, atau stoikiometri.

- Apabila $\Phi > 1$, disebut campuran kaya karena terjadi kelebihan bahan bakar
- Apabila $\Phi = 1$, disebut sebagai campuran stokiometrik
- Apabila $\Phi < 1$, maka disebut campuran miskin karena miskin akan bahan bakar

Menurut Wardana (2008), kecuali untuk campuran sangat kaya, efek utama dari *equivalence ratio* terhadap kecepatan api untuk bahan bakar sejenis adalah merupakan hasil dari bagaimana parameter tersebut mempengaruhi temperatur api. Adapun kecepatan api adalah maksimum apabila dalam keadaan campuran yang sedikit kaya dan menurun diatas maupun dibawah campuran ini.

2.10 Kestabilan Nyala Api

Kestabilan nyala api memegang peranan yang sangat besar dalam proses pembakaran. Api bisa dikatakan stabil apabila kondisi api tetap stasioner pada posisi tertentu. Kondisi ini bisa terjadi apabila kecepatan gas reaktan sama dengan kecepatan rambat api. Jika kecepatan api lebih besar daripada kecepatan gas reaktan maka api akan bergerak mendekati mulut nosel

namun apabila kecepatan api lebih kecil daripada kecepatan reaktan maka api akan bergerak meninggalkan mulut nosel.

Kriteria utama dalam mendesain suatu alat pembakaran gas adalah menghindari terjadinya *flashback* dan *lift-off*. Apabila api bergerak mendekati mulut nosel merupakan peristiwa akan terjadinya *flash back*, namun apabila gerakan api meninggalkan mulut nosel merupakan peristiwa akan terjadinya *blow-off*. Peristiwa *lift-off*, *blow-off* dan *flashback* merupakan bentuk ketidakstabilan api.

2.10.1 Lift-off

Lift off merupakan peristiwa keadaan nyala api dimana api tidak melekat pada permukaan bibir tabung pembakaran, tetapi api dalam keadaan stabil di jarak tertentu dari tabung pembakar (Turn, 2000: 294). Fenomena dari *lift off* berhubungan dengan nyala api laminar dan kecepatan api yang sebanding.

Keadaan api dan sifat aliran di dekat mulut *burner* menjadi faktor yang mempengaruhi dalam fenomena *lift-off*. *Lift-off* terjadi apabila kecepatan reaktan meningkat yang menyebabkan sudut kerucut api mengecil, permukaan api menjauh sedikit dari mulut *burner*. Peningkatan kecepatan reaktan lebih lanjut akan menyebabkan meningginya bagian hulu api ke posisi hilir api yang jauh dari mulut *burner* yang disebut *lifted* (terangkat).

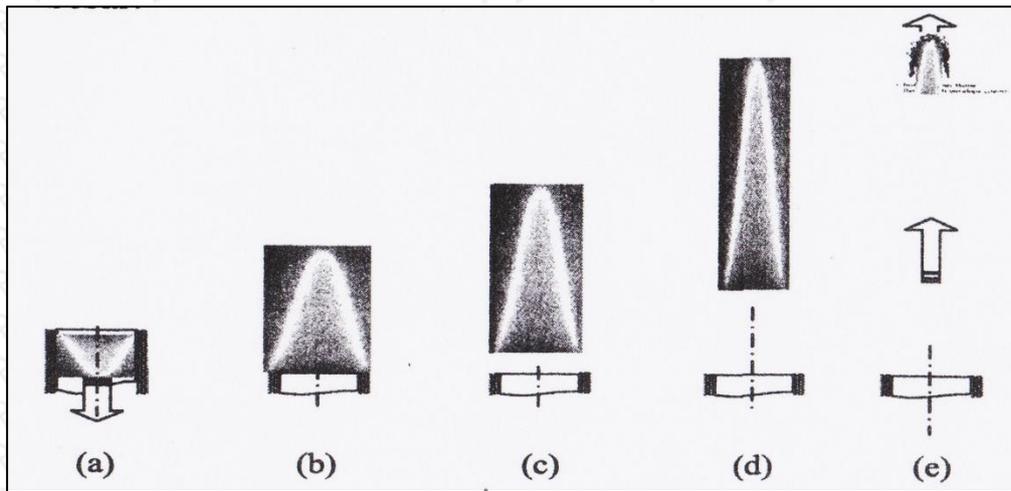
2.10.2 Flashback

Peristiwa *flashback* terjadi akibat permasalahan di dalam kesetimbangan antara kecepatan api dan kecepatan reaktan. *Flashback* terjadi apabila api masuk dan merambat tabung pembakaran tanpa mengalami pendinginan. *Flashback* tidak hanya sebuah gangguan tetapi juga merupakan resiko keselamatan. Dalam instalasi gas, fenomena *flashback* dapat menyebabkan terjadinya ledakan.

Peristiwa *Flashback* terjadi akibat aliran bahan bakar yang dikurangi atau langsung ditutup. Ketika kecepatan nyala api melebihi kecepatan aliran, perambatannya menjahui api. Ketika aliran bahan bakar dihentikan, api akan *flashback* melalui silinder pembakaran dimana lebih besar dari jarak pendinginan. Fenomena *flashback* dipengaruhi oleh efek pendinginan, tipe bahan bakar, ekuivalen rasio, kecepatan aliran, dan geometri pembakaran.

2.10.3 Blow-off

Blow-off merupakan keadaan nyala api yang terangkat dari mulut *burner* kemudian padam. peristiwa *blow-off* disebabkan oleh kecepatan reaktan yang lebih tinggi daripada kecepatan pembakaran. Apabila api dalam keadaan tidak stabil dalam keadaan mendekati *blow-off*, maka api akan mengalami pemanjangan.



Gambar 2.9 *lifted* dan *blow-off*. (a) *flashback*; (b) stabil; (c) *lift-off*; (d) *lifted*; (e) *blow-off*
 Sumber: Wardana (2008, p. 169)

2.11 Bunsen Burner

Pembakaran api *premixed* yang dikenal dengan *Bunsen* baru dikenal sekitar tahun 1855. Api difusi sebelumnya sudah digunakan sebelum adanya *Bunsen*. Efektifitas Termal pada api difusi lebih rendah jika dibandingkan dengan api *premix* dengan cara pembakaran *bunsen*. Pengembang dari *bunsen burner* adalah Robert Bunsen (1811-1899) dengan menggunakan sistem kerja pengaturan bahan bakar dan campuran udara secara kontinyu.

Ketika bahan bakar dan campuran udara diberi energi panas yang cukup, maka akan terjadi reaksi pembakaran diikuti dengan nyala api. Nyala api akan tetap stabil selama laju bahan bakar dan aliran udara serta laju perubahan reaksi (*red of reaction* dipertahankan secara konstan)

2.12 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds merupakan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya viskos yang menghubungkan kedua gaya tersebut dengan kondisi suatu aliran. Penamaan bilangan Reynolds diambil dari nama Osborne Reynolds setelah melakukan eksperimen yang mendalam pada tahun 1880. Osborne Reynolds menemukan bahwa jenis aliran dipengaruhi terutama oleh perbandingan dari gaya inersia dan gaya viskos pada fluida.

Bilangan Reynolds merupakan bilangan tak berdimensi yang digunakan untuk menentukan sifat aliran dari suatu fluida. Terdapat 3 jenis aliran dalam mekanika fluida, yaitu laminar, turbulen, dan transisi. Adapun persamaan untuk bilangan Reynolds adalah

$$Re = \frac{\text{Gaya inersia}}{\text{gaya viskos}} = \frac{vd}{\nu} = \frac{\rho vd}{\mu} \dots \dots \dots (2-8)$$

dengan:

Re = Bilangan *Reynolds*

ν = viskositas kinematik (cm^2/s)

ρ = densitas fluida (g/cm^3)

v = kecepatan fluida (cm/s)

d = diameter pipa (cm)

μ = viskositas dinamik ($\text{g}/\text{cm}\cdot\text{s}$)

Menurut Cengel & Cimbala (2006), dalam aliran pipa, jenis aliran dibagi menjadi 3 menurut nilai bilangan *Reynolds*, yaitu:

- $Re \leq 2300$, yaitu aliran laminar
- $2300 < Re < 4000$, yaitu aliran transisi
- $Re \geq 4000$, yaitu aliran turbulen.

2.13 Hipotesa

Berdasarkan uraian tinjauan pustaka, dapat diambil hipotesa bahwa semakin besar ukuran diameter *bunsen burner* maka kecepatan api akan semakin turun, temperatur dan tinggi api akan semakin rendah. Hal ini disebabkan karena semakin besar diameter *bunsen burner* menyebabkan kecepatan reaktan menjadi menurun, sehingga kecepatan api, temperatur dan tinggi api juga semakin turun.



BAB III METODE PENELITIAN

3.1 Metodologi Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah metode penelitian eksperimental sungguhan (*true experimental research*), yaitu melakukan pengamatan secara langsung untuk mengetahui hubungan sebab akibat. Penelitian ini digunakan untuk menguji pengaruh dari suatu perlakuan atau desain baru terhadap suatu proses atau peristiwa. Dengan menggunakan metode ini, akan dibandingkan karakteristik nyala api *premix* pada *bunsen burner* dengan variasi diameter.

3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

3.2.1 Tempat Penelitian

Penelitian pengujian karakteristik nyala api dengan variasi diameter *bunsen burner* dilaksanakan di Laboratorium Motor Bakar, Jurusan Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya Malang.

3.2.2 Waktu Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan selama kurang lebih 2 bulan pada bulan Februari sampai Maret 2017.

3.3 Variabel Penelitian

Variabel penelitian adalah suatu karakteristik yang mempunyai dua atau lebih nilai, atau sifat yang berdiri sendiri. Tujuan identifikasi variabel adalah untuk menemukan semua karakteristik yang mempengaruhi terjadinya masalah penelitian. Dengan penggunaan variabel, kita dapat dengan mudah memperoleh dan memahami permasalahan. Variabel – variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel Bebas

Variabel bebas adalah variabel yang bebas ditentukan oleh peneliti sebelum melakukan penelitian. Dalam penelitian ini, variabel bebas yang digunakan adalah

- a. Diameter *bunsen burner* yaitu 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm dan 12 mm.
- b. Nilai ekuivalen rasio yaitu 1,05; 1,12; 1,23; 1,36; 1,49 dan 1,68.

2. Variabel Terikat

Variabel terikat adalah variabel yang tidak dapat ditentukan oleh peneliti dan besarnya dipengaruhi oleh variabel bebas. Pada penelitian ini mempunyai variabel terikat yaitu tinggi api, kecepatan api laminar dan temperatur api yang diperoleh dari pengamatan karakteristik nyala api metana pada *bunsen burner* dengan variasi ukuran diameter.

3. Variabel Terkontrol

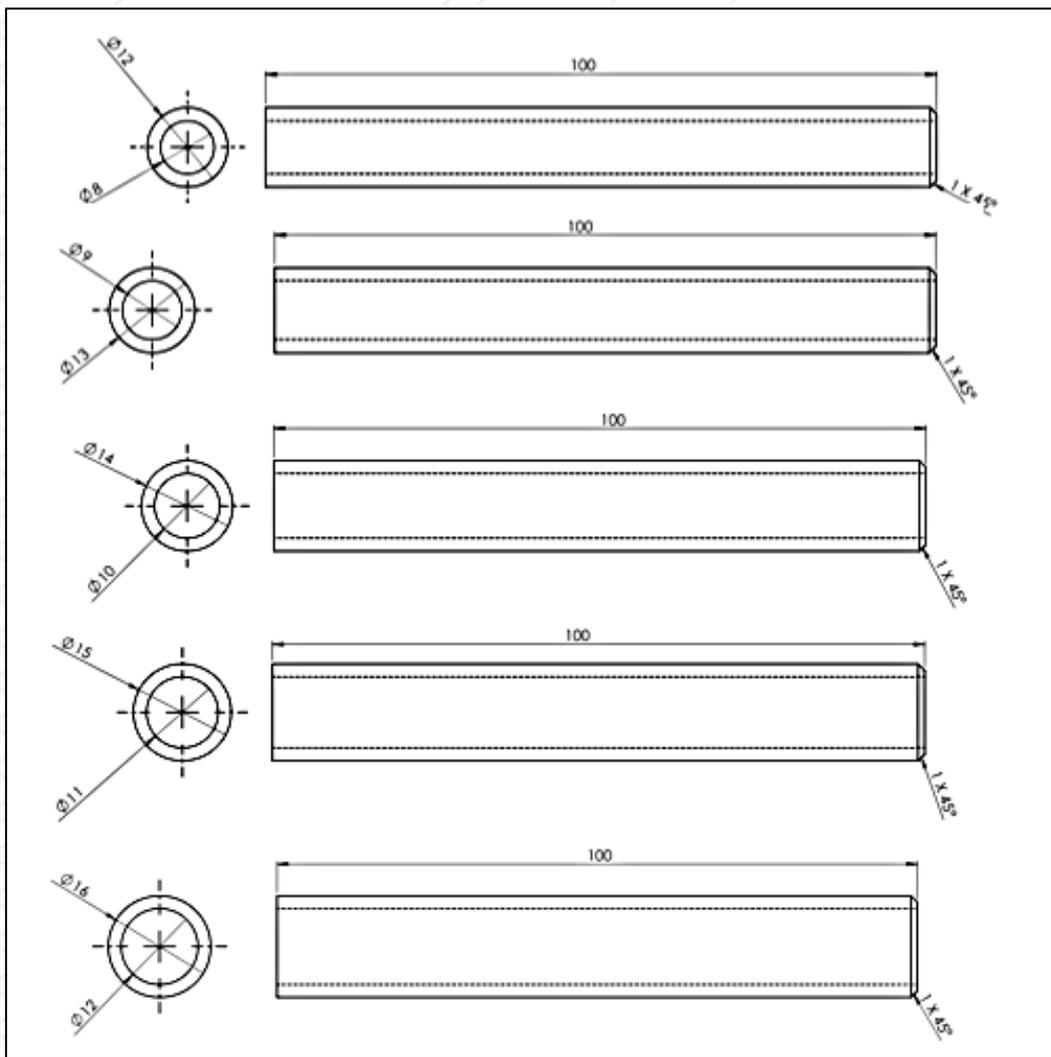
Variabel terkontrol adalah variabel penelitian dimana kondisinya dijaga tetap atau konstan pada saat penelitian. Adapun variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah debit aliran bahan bakar metana yang masuk ke dalam *bunsen burner* yaitu 0.45 L/min. Ketebalan dinding *bunsen burner* 2 mm.

3.4 Alat dan Bahan Penelitian

Adapun alat –alat yang digunakan dalam penelitian ini adalah:

1. *Bunsen Burner*

Bunsen burner yang digunakan pada penelitian ini dibuat dari material kuningan dimana diameter dalamnya bervariasi yaitu 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11mm, dan 12mm dengan panjang 100 mm dan ketebalan dinding 2 mm. Adapun desain dari *bunsen burner* ditunjukkan pada gambar 3.1.



Gambar 3.1 desain Bunsen Burner

2. Kompresor

Kompresor pada penelitian ini digunakan untuk menyuplai udara untuk reaksi pembakaran dimana udara dan bahan bakar akan dicampur dalam *mixing chamber*.

Spesifikasi kompresor yang digunakan adalah sebagai berikut:

- Merk : Lakoni
- Model : *electric blower*
- Ukuran : 2''
- Tegangan : 220 V
- Arus : 1 A
- Putaran : 3600 rpm
- Tekanan max : 8 Bar



Gambar 3.2 kompresor Udara

3. *Mixing Chamber*

Mixing chamber digunakan untuk mencampur udara dan bahan bakar (metana) sebelum memasuki *bunsen burner*, pada penelitian ini *mixing chamber* memiliki diameter luar 17 mm dan diameter dalam 12,7 mm.



Gambar 3.3 Skema *Mixing chamber*

4. *Flowmeter*

Untuk mengukur besar kecepatan aliran udara dan gas, maka dalam penelitian ini menggunakan flowmeter.



Gambar 3.4 *Flowmeter*

5. *Thermocouple*

Thermocouple digunakan untuk mengukur distribusi temperatur pada api premix. Pada penelitian ini digunakan *thermocouple* tipe k.



Gambar 3.5 *Thermocouple*

6. Selang saluran udara dan bahan bakar metana

Untuk mengalirkan udara dan bahan bakar metana kedalam mixing chamber digunakan selang dengan ukuran 0,6 cm dan untuk mengalirkan campuran metana dan udara kedalam *bunsen burner* digunakan selang ukuran 1,2 cm.



Gambar 3.6 Selang

7. Tabung gas CH₄

Tabung gas CH₄ digunakan untuk menampung bahan bakar metana sebagai sumber bahan bakar.

8. Kamera DSLR

Kamera digunakan untuk mengambil gambar nyala api, baik gambar nyala api.

Kamera DSLR yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

- Merk : *Canon*

- Model : 550 D
- Resolution : 18 Mega Pixels
- File Formats : PNG

9. Tripod

Tripod digunakan sebagai alat bantu dalam pengambilan gambar yang berguna sebagai tempat kamera ketika proses pengambilan gambar sehingga gambar yang dihasilkan oleh kamera tajam dan juga berguna untuk menjaga jarak antara kamera dengan objek tidak berpinda-pindah.

10. Laptop

Pada penelitian ini, laptop digunakan sebagai media penyimpanan data yang diperoleh saat penelitian serta digunakan untuk melakukan proses analisa pembahasan dari hasil penelitian. Untuk analisa besar sudut api dan tinggi api digunakan aplikasi Solidwork 2014.

11. Pematik api

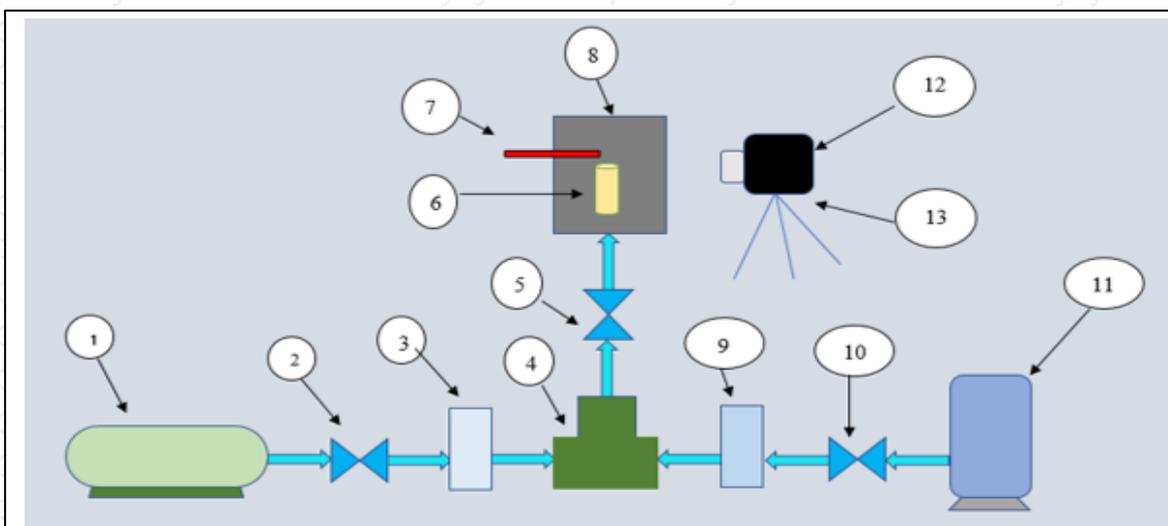
Pematik api digunakan untuk menyalakan api pada *bunsen burner*.

12. Stopwatch

Stopwatch digunakan untuk pemwaktuan saat pengukuran temperatur api.

3.5 Instalasi Penelitian

Instalasi alat yang digunakan pada penelitian ini ditunjukkan pada gambar 3.8. Pada penelitian ini, udara di suplai oleh kompresor sdan diatur jumlah debitnya melalui *flowmeter* sebelum memasuki *mixing chamber*. Bahan bakar pada penelitian di tampung pada tangki metana dan debit dari bahan bakar juga diatur oleh flowmeter. Setelah bahan bakar dan metana bercampur pada *mixing chamber*, campuran udara+bahan bakar akan keluar menuju *bunsen burner*. Setelah keluar *bunsen burner*, campuran *bahan bakar + udara* akan di nyalakan dengan pematik api dan setelah keadaan api stabil, dilakukan proses pengambilan data.



Keterangan:

- | | |
|---------------------------------------|--------------------------|
| 1. Kompresor | 8. Blackbox |
| 2. Katup udara | 9. Flowmeter bahan bakar |
| 3. Flowmeter udara | 10. Katup bahan bakar |
| 4. Mixing chamber | 11. Tabung gas metana |
| 5. Katup campuran bahan bakar + udara | 12. Kamera |
| 6. Bunsen burner | 13. Tripod |
| 7. Thermocouple | |

Gambar 3.7 Instalasi Penelitian

3.6 Metode Pengumpulan Data

Data yang dikumpulkan dalam penelitian ini adalah data primer. Data diperoleh dengan cara mengamati secara langsung karakteristik nyala api pada *bunsen burner* dengan ukuran diameter yang bervariasi dan menganalisa hasil yang diperoleh dengan menggunakan *software*. Adapun prosedur pengumpulan data adalah sebagai berikut:

1. Memasang instalasi penelitian
2. Mengatur debit bahan bakar (metana) dan udara yang masuk ke *bunsen burner* dengan menggunakan *flowmeter* berdasarkan nilai ekuivalen rasio yang telah ditentukan.
3. Menyalakan api dengan menggunakan pematik api setelah bahan bakar dan udara tercampur dalam *mixing chamber*.
4. Menunggu hingga nyala api stabil dan mencatat debit udara serta bahan bakar yang tertera pada *flowmeter*.
5. Melakukan pengambilan data visual setelah bentuk nyala api laminar terbentuk dengan stabil berupa temperatur api dan tinggi api. Setiap ekuivalen rasio didapatkan minimal 3 data gambar nyala api laminar dan 3 data temperatur.
6. Mengulangi langkah 2-6 untuk rasio ekuivalen berikutnya.

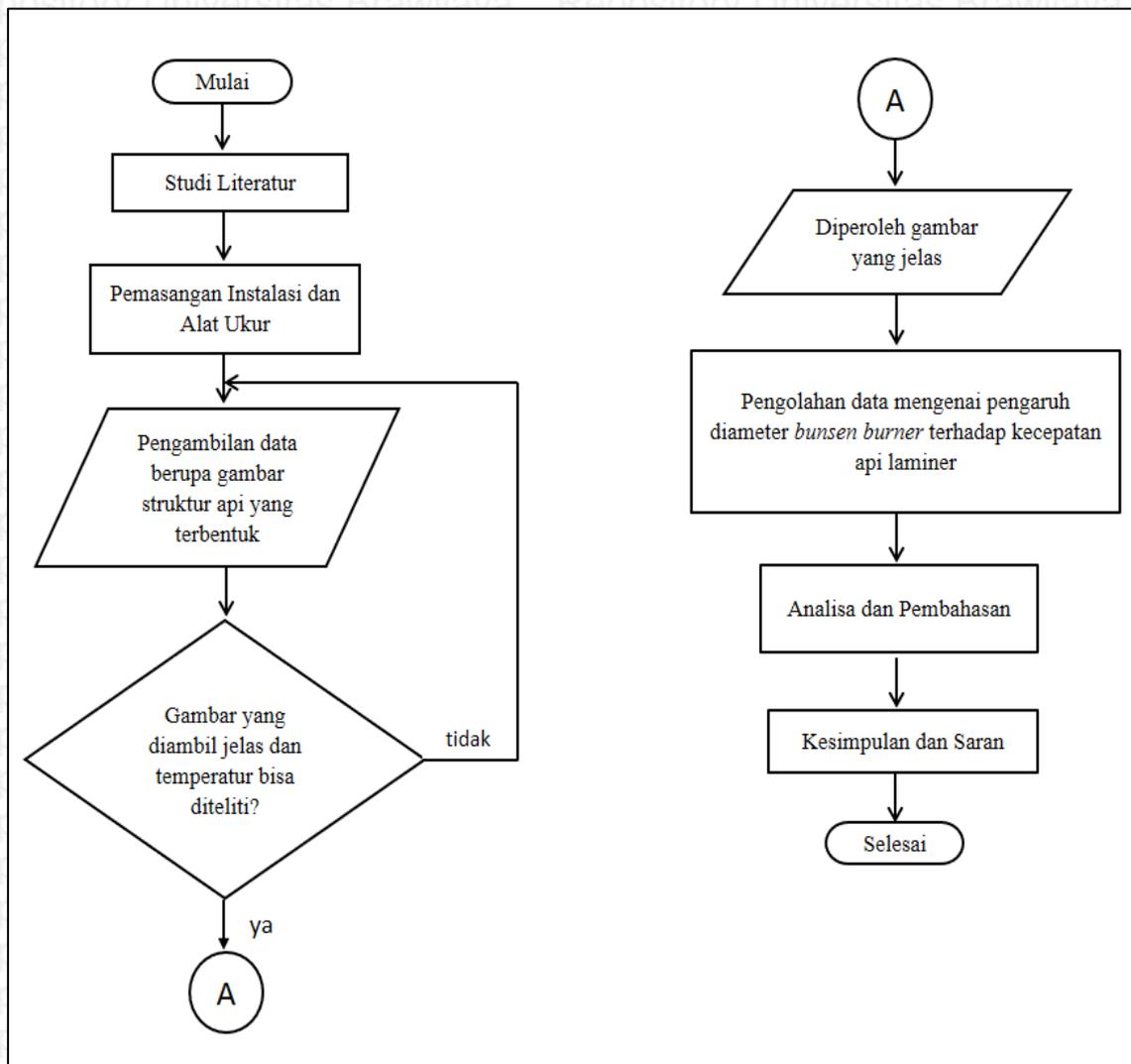
7. Setelah data satu variasi ukuran diameter *bunsen burner* diperoleh, mengganti *bunsen burner* dengan ukuran diameter yang berbeda kemudian mengulangi langkah 1-6 untuk mendapatkan data setiap variasi diameter dalam *bunsen burner*.

3.7 Metode Pengolahan Data

Pengolahan data untuk mencari nilai kecepatan api laminar (S_L) dilakukan dengan cara pengambilan data visual berupa foto dari nyala api premix pada setiap variasi diameter dan variasi ekuivalen rasio. Berikut adalah tahapan pengolahan data visual:

1. Data visual diambil paling sedikit 3 kali di setiap variasi diameter dalam *bunsen burner* dan setiap ekuivalen rasio dengan tujuan untuk meminimalisir kesalahan pada tiap data.
2. Melakukan penyimpanan data yang diperoleh pada computer (laptop) yang kemudian diurutkan berdasar variasi ukuran diameter dalam *bunsen burner* dan ekuivalen rasio.
3. Pengolahan gambar dilakukan menggunakan aplikasi CAD dengan mengambil ukuran diameter *bunsen burner* sebagai acuan. Lalu ditarik garis tegak lurus keatas untuk mengetahui tinggi api dan sudut api.
4. Pengambilan garis sudut api dengan menggunakan *software* CAD sehingga didapat nilai sudut api (α) yang digunakan untuk mendapat nilai kecepatan api laminar.
5. Hasil data diurutkan berdasar variasi ukuran diameter dalam *bunsen burner* dan berdasarkan *equivalence Ratio* sehingga dapat diperoleh perbedaan nyala api di setiap variasi diameter dari masing-masing *bunsen burner*.

3.8 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.8 Diagram alir



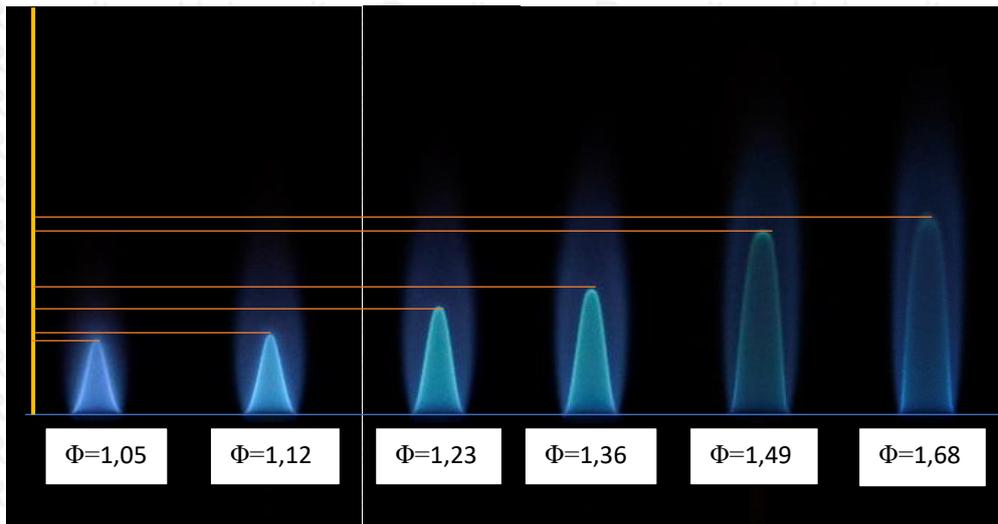
BAB IV PEMBAHASAN

Berdasarkan data yang diperoleh pada saat penelitian tentang karakteristik nyala api pada *bunsen burner* dengan variasi diameter *bunsen burner* menggunakan bahan bakar metana, maka dapat dilakukan proses pengolahan data untuk menjawab permasalahan pada bab sebelumnya dengan memberikan gambaran dan analisa secara terstruktur mengenai karakteristik nyala api pada *bunsen burner* dengan bahan bakar metana. Terdapat 2 buah data hasil penelitian, yaitu data visual berupa gambar dan data berupa nilai temperatur, sudut api dan tinggi api. Pengolahan data visual dilakukan dengan menggunakan *software* CAD untuk mendapatkan nilai tinggi api dan sudut api. Sedangkan perhitungan S_L (kecepatan api laminer) menggunakan data sudut api yang telah diperoleh. Dimana nilai S_L sendiri dipengaruhi oleh kecepatan reaktan serta sudut api yang terbentuk sesuai dengan persamaan (2-2)

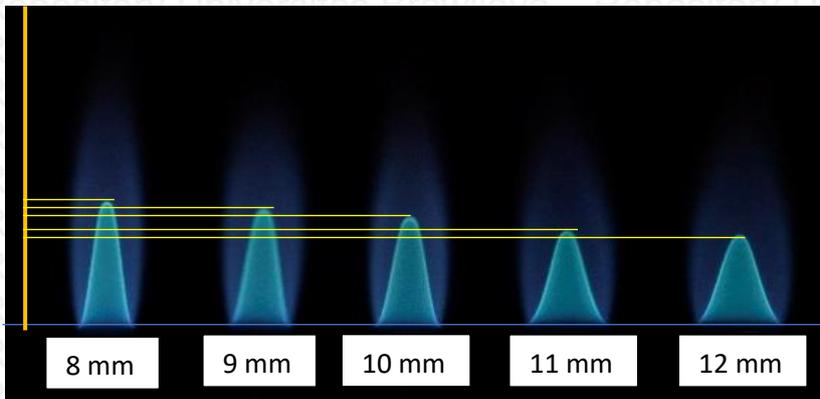
Pada analisa data, semua data dikelompokkan berdasarkan variasi diameter *bunsen burnernya* dari rasio ekuivalen rendah sampai rasio ekuivalen tinggi. Pada penelitian ini, dilakukan perbandingan mengenai nilai temperatur, tinggi api serta kecepatan api laminer dari masing-masing variasi diameter *burner*. Sehingga didapatkan perbandingan karakteristik nyala api antar variasi diameter *bunsen burner* dengan bahan bakar metana.

4.1 Hasil Visualisasi Nyala Api

Berikut merupakan hasil data visual nyala api pada *bunsen burner*. Penyusunan gambar berdasarkan urutan variasi nilai ekuivalen rasio dari ekuivalen rasio terendah hingga ekuivalen rasio tertinggi, sehingga dapat diketahui perbedaan visual dari masing-masing nilai ekuivalen rasio pada *bunsen burner*.



Gambar 4.1 Nyala api *bunsen burner* pada diameter 8 mm dengan variasi ekuivalen rasio



Gambar 4.2 Nyala api *bunsen burner* pada variasi diameter dengan ekuivalen rasio 1,36

Gambar diatas merupakan hasil data visual nyala api dari masing-masing variasi diameter *bunsen burner*. Pada gambar 4.1 menunjukkan nyala nyala api *bunsen burner* dengan diameter 8 mm dimana urutannya berdasarkan nilai ekuivalen rasio yang telah ditentukan yaitu 1,05; 1,12; 1,23; 1,36; 1,49; dan 1,68. Sedangkan gambar 4.2 menunjukkan data visual nyala api *bunsen burner* pada ekuivalen rasio 1,36 dengan diameter *burner* bervariasi yaitu 8 mm, 9 mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm. Adapun data visual api selengkapnya untuk variasi diameter dan variasi ekuivalen rasio dapat dilihat pada lampiran 1.

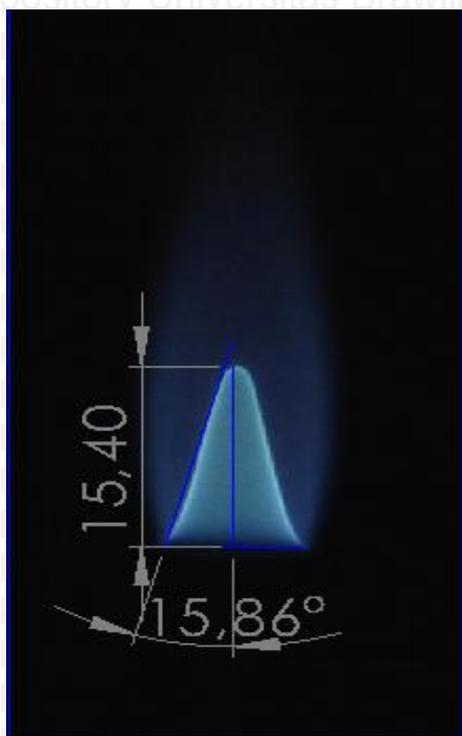
Dari gambar 4.1 dan 4.2 dapat dilihat terjadi perbedaan tinggi dari nyala api yang dihasilkan dari masing-masing *bunsen burner* dan variasi ekuivalen rasio. Adapun pada gambar diatas diberikan garis horizontal adalah sebagai sarana untuk memudahkan melihat perbedaan ketinggian yang terjadi.

4.2 Pengolahan Data Karakteristik Nyala Api

4.2.1 Pengolahan Data Visual

Data visual yang diperoleh dalam penelitian karakteristik nyala api pada variasi ukuran diameter *bunsen burner* selanjutnya akan diolah dengan menggunakan *software CAD*. Data diolah dengan menyesuaikan ukuran gambar api sesuai ukuran aktual dari masing-masing ukuran diameter *bunsen burner*. Dari pengolahan data visual maka akan diperoleh nilai tinggi dan sudut api, dimana sudut api yang diperoleh digunakan untuk mencari kecepatan api laminar (S_L).

Pada semua variasi diameter *bunsen burner* dilakukan pengolahan data visual untuk mencari sudut dan tinggi api dengan variasi nilai ekuivalen rasio pengujian 1,05 sampai 1,68. Di bawah ini diberikan contoh pengolahan data visual dari *bunsen burner* diameter 10 mm pada ekuivalen rasio 1,36 dengan menggunakan salah satu *software CAD*. Adapun gambar pengolahan keseluruhan data visual untuk variasi ukuran diameter yang lain di diberikan di dalam lampiran 2.



Gambar 4.3 Pengolahan data karakteristik nyala api *bunsen burner* pada diameter 10 mm dengan ekuivalen rasio 1,36

Dari pengolahan data tersebut, diperoleh sudut api sehingga dapat dihitung nilai dari kecepatan api laminar dengan menggunakan rumus pada persamaan (2-2) dimana kecepatan reaktan dapat dicari dengan menggunakan persamaan (2-3). Disamping itu, juga di dapatkan tinggi api yang digunakan sebagai parameter pembanding pada karakteristik pembakaran.

Untuk memudahkan pembacaan hasil maka dibuat tabel tentang hasil pengolahan data visual untuk masing-masing variasi diameter *bunsen burner* yang telah didapat.

Tabel 4.1

Tabel Data Bunsen Burner diameter 8 mm

Parameter	$\Phi=1,05$	$\Phi=1,12$	$\Phi=1,23$	$\Phi=1,36$	$\Phi=1,49$	$\Phi=1,68$
$\alpha(^{\circ})$	17,05	15,89	12,02	11,24	7,17	5,61
Vu (cm/s)	160,89	150,94	139,33	127,72	117,77	106,16
Tinggi api(mm)	11,88	12,28	16,61	18	26,06	29,79

Tabel 4.2

Tabel Data Bunsen Burner diameter 9 mm

Parameter	$\Phi=1,05$	$\Phi=1,12$	$\Phi=1,23$	$\Phi=1,36$	$\Phi=1,49$	$\Phi=1,68$
$\alpha(^{\circ})$	21,14	19,41	14,39	13,58	8,51	6,80
Vu (cm/s)	127,13	119,26	110,09	100,92	93,05	83,88
Tinggi api(mm)	10,4	11,78	14,78	16,54	24,06	27,64

Tabel 4.3

Tabel Data Bunsen Burner diameter 10 mm

Parameter	$\Phi=1,05$	$\Phi=1,12$	$\Phi=1,23$	$\Phi=1,36$	$\Phi=1,49$	$\Phi=1,68$
$\alpha(^{\circ})$	26,04	22,90	17,18	15,86	10,1	8,06
Vu (cm/s)	102,97	96,60	89,17	81,74	75,37	67,94
Tinggi api(mm)	9,23	10,55	13,09	15,4	22,07	25,16

Tabel 4.4

Tabel Data Bunsen Burner diameter 11 mm

Parameter	$\Phi=1,05$	$\Phi=1,12$	$\Phi=1,23$	$\Phi=1,36$	$\Phi=1,49$	$\Phi=1,68$
$\alpha(^{\circ})$	31,46	27,45	20,23	18,78	11,50	9,66
Vu (cm/s)	85,10	79,84	73,70	67,55	62,29	56,15
Tinggi api(mm)	8,29	9,37	12,45	14,05	20,34	23,31

Tabel 4.5

Tabel Data Bunsen Burner diameter 12 mm

Parameter	$\Phi=1,05$	$\Phi=1,12$	$\Phi=1,23$	$\Phi=1,36$	$\Phi=1,49$	$\Phi=1,68$
$\alpha(^{\circ})$	0	30,52	23,51	21,34	13,14	11,02
Vu (cm/s)	71,51	67,10	61,93	56,76	52,34	47,18
Tinggi api(mm)	0	8,14	11,34	13,26	18,81	22,19

Dari tabel 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 dan 4.5 dapat dilihat kecenderungan nilai sudut api mengalami peningkatan seiring peningkatan ukuran diameter *bunsen burner* dan nilai sudut semakin meningkat seiring penurunan nilai ekuivalen rasio. Tinggi api semakin turun ketika ukuran diameter *bunsen burner* semakin besar dan nilai ekuivalen rasio semakin kecil. Pada tabel juga bisa diketahui bahwa kecepatan reaktan akan semakin besar apabila ukuran diameter *bunsen burner* dan nilai ekuivalen rasio semakin kecil.

4.2.2 Tabel Hasil Perhitungan Karakteristik Nyala Api

Berdasarkan hasil pengolahan data visual, maka dapat diperoleh nilai kecepatan api laminer dengan menggunakan persamaan (2-2). Setelah diperoleh nilai kecepatan api laminer, maka dapat dibuat tabel hasil perhitungan karakteristik nyala api yang diamati yaitu temperatur api, tinggi api dan kecepatan api laminer dengan variasi ekuivalen rasio yang telah ditentukan untuk setiap variasi diameter *bunsen burner*.

Berikut merupakan contoh perhitungan nilai kecepatan reaktan pada *bunsen burner* dengan diameter 10 mm pada nilai ekuivalen rasio 1.49. Perhitungan nilai kecepatan reaktan menggunakan rumus pada persamaan (2-3)

$$Q_{BB} = 0.45 \text{ L/min}$$

$$Q_{udara} = 3,4 \text{ L/min}$$

$$A_b = 0.785 \text{ cm}^2$$

Sehingga dapat dihitung nilai kecepatan reaktan pada *burner* dengan nilai ekuivalen rasio 1.36 sebagai berikut

$$\begin{aligned} Q_{BB} &= 0.45 \frac{\text{L}}{\text{min}} = \frac{\text{L}}{\text{min}} \rightarrow \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \\ &= \frac{0,45 \times 1000}{60} = 7,5 \text{ cm}^3/\text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_{udara} &= 3,4 \frac{\text{L}}{\text{min}} = \frac{\text{L}}{\text{min}} \rightarrow \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \\ &= \frac{3,4 \times 1000}{60} = 56,67 \frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \end{aligned}$$

Setelah menghitung nilai debit aliran bahan bakar dan udara, maka menghitung kecepatan reaktan dengan menggunakan persamaan (2-3)

$$\begin{aligned} v &= \frac{7,5 \text{ cm}^3/\text{s} + 56,67 \text{ cm}^3/\text{s}}{0.785 \text{ cm}^2} \\ v &= 81,74 \text{ cm/s} \end{aligned}$$

Selanjutnya, setelah menghitung kecepatan reaktan, maka dapat dihitung besarnya kecepatan api laminer dengan menggunakan persamaan (2-2). Berikut adalah perhitungan nilai kecepatan api laminer *bunsen burner* dengan diameter 10 mm pada nilai ekuivalen rasio 1.49.

$$S_L = v \sin \alpha$$

$$S_L = 81,74 \text{ cm/s} \cdot \sin 15,86$$

$$S_L = 81,74 \text{ cm/s} \times 0,27$$

$$S_L = 22,34 \text{ cm/s}$$

Tabel 4.6
Hasil Perhitungan Karakteristik Nyala Api Masing-masing Variasi Diameter *Bunsen Burner*

Diameter <i>Burner</i>	Parameter	Φ=1,05	Φ=1,12	Φ=1,23	Φ=1,36	Φ=1,49	Φ=1,68
8 mm	T ujung (°C)	1285,33	1253	1239	1230,67	1205,67	1178,67
	T tengah (°C)	1237	1207,33	1153	1132	1107,67	1086
	S _L (cm/s)	47,18	41,33	29,02	24,89	14,70	10,37
	Tinggi api(mm)	11,88	12,28	16,61	18	26,06	29,79
9 mm	T ujung (°C)	1234,33	1219	1201	1191,33	1181	1165,67
	T tengah (°C)	1148,33	1126,67	1117,33	1107	1087,67	1068,67
	S _L (cm/s)	45,85	39,63	27,36	23,69	13,77	9,93
	Tinggi api(mm)	10,4	11,78	14,78	16,54	24,06	27,64
10 mm	T ujung (°C)	1221,33	1195,33	1184,67	1163,67	1154	1136,33
	T tengah (°C)	1119	1092,67	1075,67	1064	1047	1031,33
	S _L (cm/s)	45,20	37,59	26,34	22,34	13,22	9,53
	Tinggi api(mm)	9,23	10,55	13,09	15,4	22,07	25,16
11 mm	T ujung (°C)	1210	1181	1163	1143	1119,67	1109,33
	T tengah (°C)	1106	1084,67	1061,67	1041,33	1025	1006,67
	S _L (cm/s)	44,41	36,80	25,48	21,75	12,42	9,42
	Tinggi api(mm)	8,29	9,37	12,45	14,05	20,34	23,31
12 mm	T ujung (°C)	<i>Flashback</i>	1175	1152	1134,33	1125,67	1104
	T tengah (°C)	<i>Flashback</i>	1081	1053,67	1039	1007	996,33
	S _L (cm/s)	<i>Flashback</i>	34,07	24,70	20,66	11,89	9,01
	Tinggi api(mm)	<i>Flashback</i>	8,14	11,34	13,26	18,81	22,19

4.3 Perhitungan Bilangan Reynolds

Perhitungan bilangan reynolds pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui bahwa aliran reaktan pada *bunsen burner* apakah laminer atau turbulen. Adapun hasil dari perhitungan bilangan reynolds dapat dilihat pada tabel 4.7.

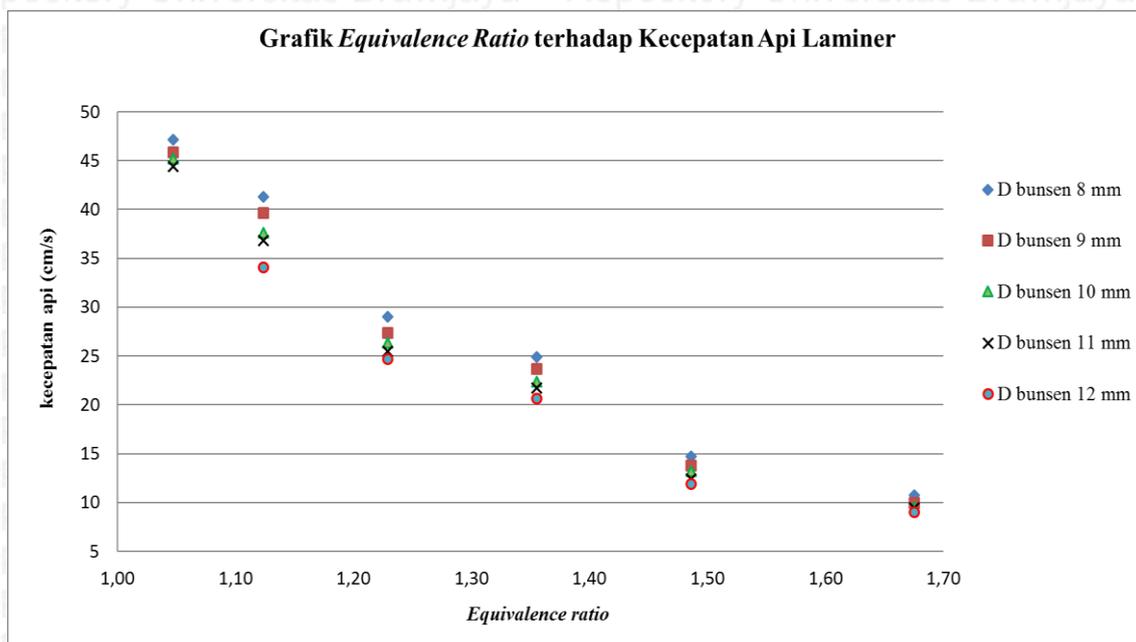
Tabel 4.7
Hasil Perhitungan Bilangan Reynolds untuk Variasi Diameter *Bunsen Burner*

Diameter <i>Burner</i>	$\Phi=1,05$	$\Phi=1,12$	$\Phi=1,23$	$\Phi=1,36$	$\Phi=1,49$	$\Phi=1,68$
8 mm	848,04	795,55	734,30	673,05	620,55	559,31
9 mm	753,82	707,15	652,71	598,27	551,60	497,16
10 mm	678,43	636,44	587,44	538,44	496,44	447,44
11 mm	616,76	578,58	534,04	489,49	451,31	406,77
12 mm	565,36	530,36	489,53	448,70	413,70	372,87

Dari tabel tersebut dapat diketahui secara keseluruhan bilangan reynolds untuk setiap variasi diameter dan ekuivalen rasio adalah kurang dari 2300, dimana untuk aliran dalam pipa, dikategorikan laminer apabila bilangan reynolds aliran kurang dari 2300. Sehingga bisa disimpulkan bahwa keseluruhan aliran pada *bunsen burner* adalah laminer.

4.4 Grafik dan Pembahasan

4.4.1 Grafik Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Kecepatan Api Laminer



Gambar 4.4 Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Kecepatan Api Laminer

Pada gambar 4.4 merupakan grafik yang menunjukkan hubungan ekuivalen rasio terhadap kecepatan api laminer pada setiap variasi ukuran diameter *bunsen burner*. Dimana titik berbentuk belah ketupat merupakan ukuran diameter 8 mm, titik segiempat merupakan ukuran 9 mm, bentuk segitiga adalah ukuran diameter 10 mm, titik berbentuk silang

merupakan *bunsen burner* dengan diameter 11 mm dan bentuk lingkaran merupakan *bunsen burner* dengan diameter 12 mm. Untuk masing-masing variasi ukuran diameter *bunsen burner* diuji dengan menggunakan variasi nilai ekuivalen rasio yaitu 1,05; 1,12; 1,23; 1,36; 1,49 dan 1,68.

Nilai kecepatan api laminar *bunsen burner* cenderung menurun seiring dengan kenaikan ukuran diameter *bunsen burner*. Adapun berdasarkan nilai ekuivalen rasio, semakin besar nilai ekuivalen rasio maka kecepatan api laminernya akan semakin menurun. Pada *bunsen burner* dengan ukuran diameter 8 mm, nilai kecepatan api laminar secara urut berdasarkan nilai ekuivalen rasio pengujian 1,05; 1,12; 1,23; 1,36; 1,49 dan 1,68 adalah 47,18 cm/s; 41,33 cm/s; 29,02 cm/s; 24,89 cm/s; 14,70 cm/s dan 10,73 cm/s. Pada ukuran diameter 9 mm, nilai kecepatan api laminernya berdasarkan nilai ekuivalen rasio pengujian adalah 45,85 cm/s; 39,63 cm/s; 27,36 cm/s; 23,69 cm/s; 13,77 cm/s dan 9,93 cm/s. Besar kecepatan api laminar pada *bunsen burner* diameter 10 mm secara urut berdasarkan nilai ekuivalen rasio pengujian 1,05; 1,12; 1,23; 1,36; 1,49 dan 1,68 adalah 45,20 cm/s; 37,59 cm/s; 26,34 cm/s; 22,34 cm/s; 13,63 cm/s dan 9,53 cm/s. Pada diameter 11 mm, nilai kecepatan api laminar secara urut berdasarkan ekuivalen rasio pengujian 1,05; 1,12; 1,23; 1,36; 1,49 dan 1,68 adalah 44,41 cm/s; 36,80 cm/s; 25,48 cm/s; 21,75 cm/s; 12,42 cm/s; 9,42 cm/s. Adapun pada diameter *bunsen burner* 12 mm, kecepatan api laminar pada nilai ekuivalen rasio 1,05 tidak dapat dihitung disebabkan telah terjadi *flashback* sehingga nilai kecepatan api yang didapat secara berdasarkan ekuivalen rasio pengujian 1,05; 1,12; 1,23; 1,36; 1,49 dan 1,68 adalah 0 cm/s; 34,07 cm/s; 24,70 cm/s; 20,66 cm/s; 11,89 cm/s dan 9,01 cm/s.

Berdasarkan persamaan (2-2), kecepatan api laminar dipengaruhi oleh 2 parameter yaitu kecepatan rekatan dan sudut api. Adapun kecepatan reaktan dipengaruhi oleh debit bahan bakar, debit udara dan luas penampang dari lubang *bunsen burner* seperti yang dirumuskan pada persamaan (2-3). Pada penelitian ini, nilai debit bahan bakar dikontrol tetap untuk setiap variasi diameter, sehingga yang mempengaruhi kecepatan api laminar adalah debit udara, diameter *bunsen burner* dan sudut api yang dihasilkan.

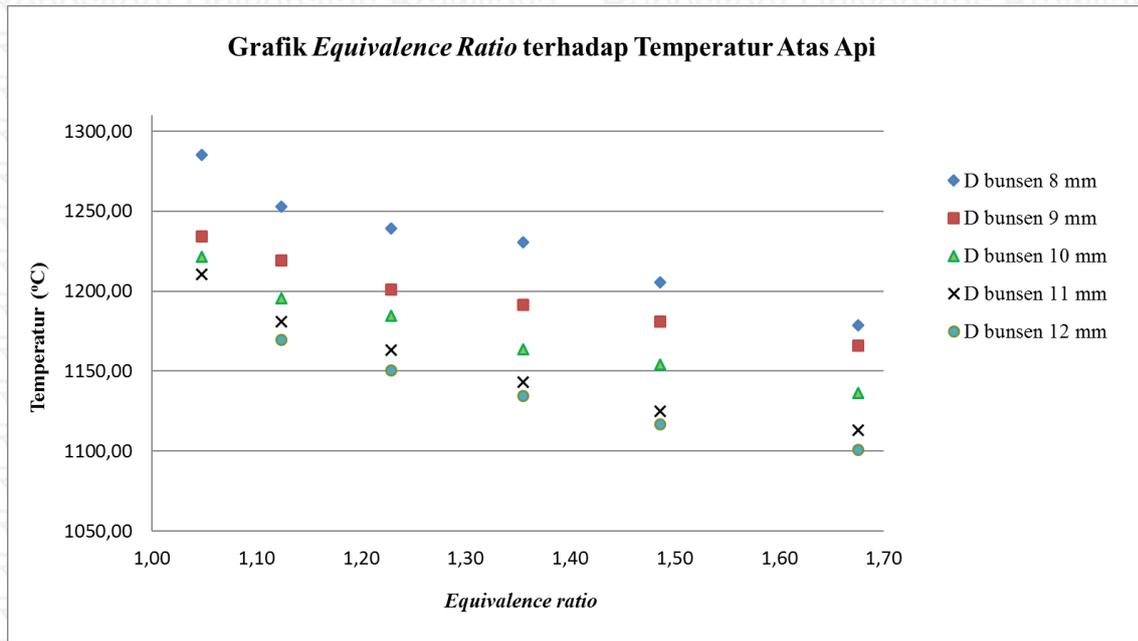
Pada gambar 4.4, dapat dilihat bahwa dengan semakin besar nilai ekuivalen rasio maka kecepatan api laminernya akan semakin turun. Hal ini disebabkan debit udara yang semakin kecil. Berdasarkan persamaan (2-7), nilai ekuivalen rasio merupakan perbandingan antara AFR stoikiometri dengan AFR aktual, dimana apabila nilai AFR stoikiometrinya tetap dan nilai AFR aktual semakin turun, maka nilai ekuivalen rasio akan semakin meningkat. Adapun berdasarkan persamaan (2-5), nilai AFR dipengaruhi oleh massa bahan bakar dan

udara. Apabila massa bahan bakar adalah tetap, maka nilai AFR aktual turun disebabkan oleh massa udara yang semakin menurun. Dengan menggunakan massa, dapat diketahui volume dan selanjutnya dapat digunakan untuk mencari nilai debit aliran, dimana massa, volume, dan debit adalah berbanding lurus. Maka dengan menurunnya debit udara, akan menyebabkan menurunnya kecepatan reaktan sehingga kecepatan api laminernya pun semakin menurun, sesuai dengan persamaan (2-3) dan (2-2).

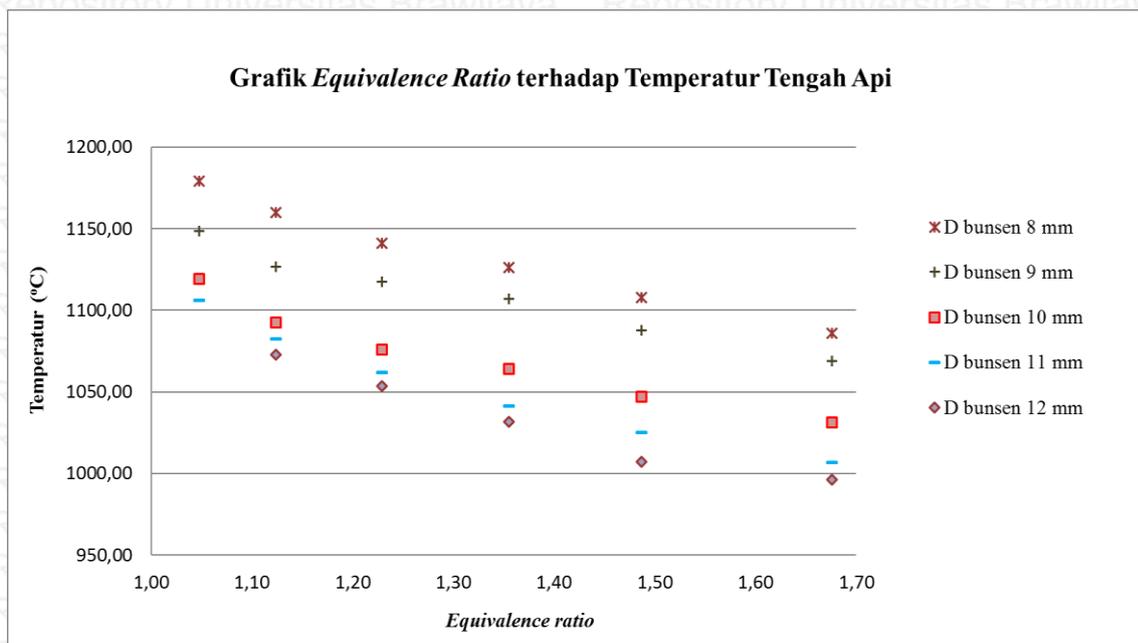
Pada grafik diatas dapat diketahui bahwa dengan semakin besar ukuran diameter *bunsen burner*, kecepatan api laminernya semakin menurun. Dari persamaan (2-2), dapat diketahui bahwa kecepatan api laminer dipengaruhi oleh kecepatan reaktan dan sudut api, dimana kecepatan reaktan sangat dominan pengaruhnya terhadap kecepatan api laminernya. Dengan semakin besar ukuran diameter akan menyebabkan luasan lubang *bunsen burner* semakin besar, maka kecepatan reaktan semakin menurun. Sehingga dengan semakin besar ukuran diameter *bunsen burner* menyebabkan kecepatan api laminernya semakin menurun.

Dalam penelitian ini, pada diameter lubang *bunsen burner* 12 mm dengan ekuivalen rasio 1,05 terjadi fenomena *flashback*. Fenomena ini disebabkan oleh kecepatan api yang lebih besar daripada kecepatan reaktan yang menyebabkan api merambat masuk kedalam silinder *bunsen burner*. Disamping itu, *flashback* juga dapat dipengaruhi oleh ukuran diameter lubang *bunsen burner*, dimana semakin besar diameter akan menyebabkan risiko terjadi *flashback* semakin tinggi. Adapun pada penelitian ini diameter 12 mm merupakan diameter yang paling besar, sehingga kecepatan api laminer pada diameter 12 mm dengan ekuivalen rasio 1.05 sulit untuk dihitung dikarenakan terjadi *flashback*.

4.4.2 Grafik Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Temperatur Api Laminer



Gambar 4.5 Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Temperatur Atas Api Laminer



Gambar 4.6 Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Temperatur Tengah Api Laminer

Gambar 4.5 dan 4.6 diatas menjelaskan grafik hubungan ekuivalen rasio terhadap temperatur api laminer pada setiap variasi ukuran diameter *bunsen burner*. Pada grafik tersebut menyajikan kecenderungan dua data temperatur untuk masing-masing diameter *bunsen burner* yaitu temperatur bagian ujung atas api dan bagian tengah api dimana setiap variasi data disimbolkan oleh bentuk dan warna seperti pada gambar grafik diatas. Pada penelitian ini, pengujian nilai temperatur api setiap variasi diameter *bunsen burner* 8 mm, 9

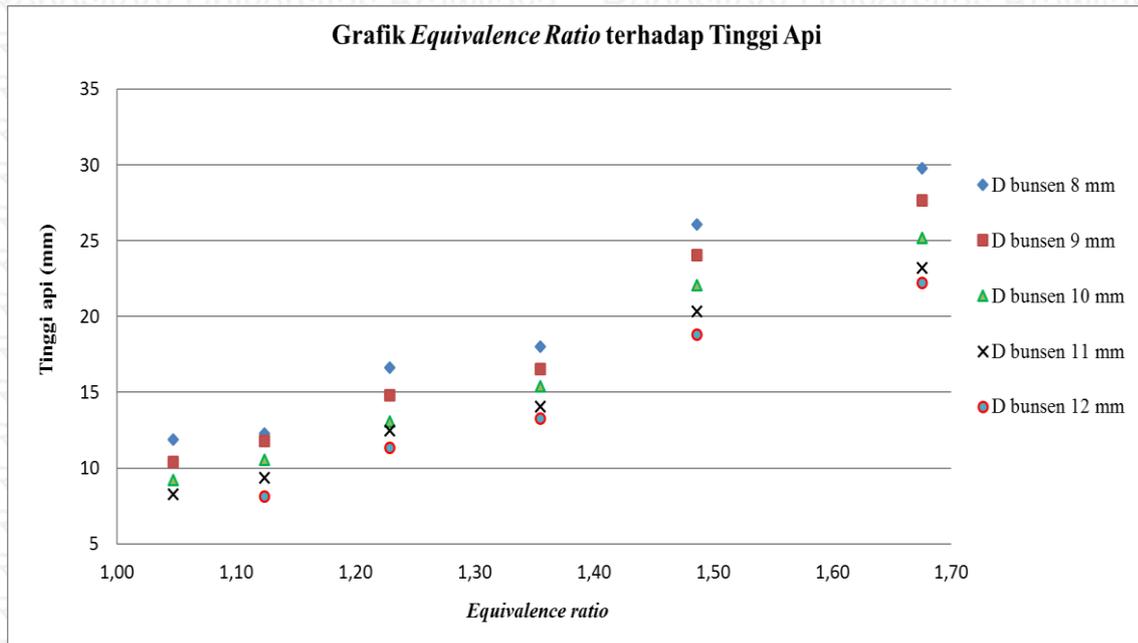
mm, 10 mm, 11 mm, 12 mm adalah dengan menggunakan variasi nilai ekuivalen rasio yaitu 1,05; 1,12; 1,23; 1,36; 1,49 dan 1,68 dimana nilai temperaturnya dapat dilihat pada tabel 4.6.

Berdasarkan gambar grafik diatas dapat diketahui bahwa semakin besar ukuran diameter *bunsen burner* akan menyebabkan temperatur api akan semakin menurun. Sesuai dengan persamaan (2-1) yang menjelaskan temperatur produk adalah energi kinetik dari produk pembakaran tersebut sehingga hubungan kecepatan api laminer dengan temperatur api adalah berbanding lurus. Semakin besar ukuran diameter lubang *bunsen burner* akan menyebabkan kecepatan reaktan akan semakin menurun, sesuai dengan persamaan (2-3). Adapun kecepatan reaktan akan mempengaruhi nilai kecepatan api laminer dimana semakin kecil kecepatan reaktan akan menyebabkan nilai kecepatan api laminer menurun dikarenakan pengaruh kecepatan reaktan lebih dominan terhadap kecepatan api dibandingkan pengaruh sudut api seperti yang dijelaskan pada persamaan (2-2). Sehingga dengan meningkatnya ukuran diameter *bunsen burner* akan menyebabkan kecepatan reaktan semakin turun, kecepatan api akan menurun dan temperatur api menurun.

Berdasarkan nilai ekuivalen rasio, dari grafik diatas dapat dilihat bahwa semakin besar nilai ekuivalen rasio maka temperatur akan semakin rendah. Hal ini dikarenakan oleh semakin besar nilai ekuivalen rasio, campuran semakin tidak sempurna yaitu semakin kaya akan bahan bakau dan miskin udara. Semakin sedikitnya udara dan kaya akan bahan bakar dalam reaktan akan membuat reaksi pembakaran tidak sempurna sehingga akan menyebabkan temperatur api akan semakin menurun.

Pada gambar grafik 4.5 dan 4.6 diatas dapat diketahui bahwa temperatur bagian ujung api lebih besar daripada temperatur bagian tengah api. Hal ini disebabkan pada bagian ujung api, reaktan telah terbakar sempurna sedangkan pada bagian tengah api belum terjadi reaksi pembakaran secara sempurna. Dalam proses pembakaran sempurna, reaktan akan terbakar sempurna dan akan menghasilkan produk pembakaran yang maksimal, dimana berdasarkan gambar 2.5 tentang detail struktur di dalam api laminer, temperatur maksimal terjadi ketika reaktan berubah menjadi 100% produk pembakaran. Sehingga temperatur ujung api akan lebih tinggi daripada temperatur bagian tengah api.

4.4.3 Grafik Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Tinggi Api



Gambar 4.7 Hubungan Ekuivalen Rasio terhadap Tinggi Api

Pada gambar 4.7 diatas menunjukkan grafik hubungan ekuivalen rasio terhadap tinggi api laminar pada berbagai variasi diameter *bunsen burner*. Adapun untuk masing-masing ukuran diameter *bunsen burner* digambarkan dalam bentuk simbol, belah ketupat untuk diameter 8 mm, segiempat untuk 9 mm, segitiga mewakili 10 mm, silang dan lingkaran masing-masing menggambarkan diameter 11 mm dan 12 mm. Pada penelitian ini, untuk masing-masing variasi ukuran diameter *bunsen burner* diuji dengan menggunakan variasi nilai ekuivalen rasio yaitu 1,05; 1,12; 1,23; 1,36; 1,49 dan 1,68.

Berdasarkan grafik diatas, dapat diketahui untuk semua variasi ukuran diameter *bunsen burner*, semakin besar ukuran diameter *burner*, tinggi api akan semakin turun dan semakin besar nilai ekuivalen rasio maka tinggi api akan semakin meningkat. Adapun berdasarkan variasi nilai ekuivalen rasio pengujian secara urut dari ekuivalen rasio kecil ke besar yaitu 1,05; 1,12; 1,23; 1,36; 1,49 dan 1,68, diperoleh nilai tinggi api untuk diameter 8 mm adalah 11,88 mm; 12,28 mm; 16,61 mm; 18 mm; 26,06 mm; 29,79 mm. Untuk diameter 9 mm tinggi api yang diperoleh adalah 10,4 mm; 11,78 mm; 14,78 mm; 16,54 mm; 24,06 mm; 27,64 mm. Pada diameter 10 mm tinggi api yang didapat adalah 9,23 mm; 10,55 mm; 13,09 mm; 15,4 mm; 22,07 mm; 25,16 mm. Pada diameter 11 mm didapatkan tinggi api adalah 8,29 mm; 9,37 mm; 12,45 mm; 14,05 mm; 20,04 mm; 23,21 mm. Dan untuk diameter 12 mm, tinggi api yang diperoleh adalah 0 mm; 8,14 mm; 11,34 mm; 13,26 mm; 18,81 mm;

22,19 mm. Pada diameter 12 mm, untuk ekuivalen rasio 1,05 diperoleh tinggi api yaitu 0 mm. Hal ini dikarenakan terjadi *flashback*.

Semakin kecil ukuran diameter *bunsen burner*, tinggi api yang terjadi adalah semakin tinggi. Hal ini disebabkan oleh semakin kecil ukuran diameter *bunsen burner* akan menyebabkan nilai kecepatan reaktan akan semakin besar, dimana kecepatan reaktan yang lebih tinggi daripada kecepatan pembakaran akan menyebabkan terjadinya pemanjangan api. Sehingga semakin kecil diameter, kecepatan reaktan akan semakin besar, akibatnya akan membuat tinggi api semakin tinggi.

Dari grafik diatas dapat dilihat bahwa semakin besar nilai ekuivalen rasio, maka tinggi api akan semakin besar. Seperti yang dijelaskan pada dasar teori, semakin besar nilai ekuivalen rasio maka kadar bahan bakar dalam reaktan akan semakin besar. Semakin besar kandungan bahan bakar dan semakin sedikit kadungan udara dalam reaktan akan mempengaruhi tinggi api. Semakin bertambahnya kandungan bahan bakar akan menyebabkan bahan bakar tidak terbakar secara sempurna sehingga sisa bahan bakar yang belum terbakar akan bereaksi secara difusi yang menyebabkan api menjadi lebih tinggi. Disamping itu, semakin kurang sempurna pembakaran akan menyebabkan penurunan temperatur yang akan menyebabkan reaksi pembakaran semakin lambat.



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian ini, dapat diambil beberapa kesimpulan sehingga dapat menjawab rumusan masalah pada bab I. Pengambilan kesimpulan berdasarkan data dan grafik pembahasan pada bab IV. Sehingga dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut:

1. Semakin besar ukuran diameter *bunsen burner*, nilai kecepatan api laminar (S_L) akan semakin turun. Hal ini dikarenakan semakin besar ukuran diameter akan menghasilkan nilai kecepatan reaktan menurun sehingga kecepatan api laminernya turun.
2. Nilai tinggi api semakin turun seiring dengan kenaikan ukuran diameter *bunsen burner*, hal ini disebabkan kecepatan reaktan yang semakin menurun seiring bertambahnya ukuran diameter *bunsen burner* sehingga tinggi api semakin menurun.
3. Semakin besar ukuran diameter, suhu api akan semakin menurun. Hal ini disebabkan oleh kecepatan api yang semakin menurun sehingga menyebabkan temperatur menurun.
4. Semakin tinggi nilai ekuivalen rasio tinggi api semakin meningkat, kecepatan api laminar (S_L) dan temperatur api semakin menurun.
5. Diameter *bunsen burner* 8 mm memiliki nilai karakteristik nyala api yang paling baik dikarenakan nilai kecepatan dan temperatur api mendekati teoritis.

5.2 Saran

1. *Flowmeter* yang digunakan sebaiknya diganti dengan *flowmeter* yang memiliki rentang skala ukuran yang lebih besar sehingga dapat diperoleh kecepatan reaktan yang lebih besar dikarenakan debit yang digunakan dapat lebih besar.
2. *Thermocouple* yang digunakan pada saat penelitian sebaiknya diganti dengan *thermocouple* yang memiliki sensitifitas lebih tinggi sehingga bisa diperoleh data temperatur yang lebih detail.
3. Perlu dilakukan pengujian karakteristik nyala api untuk variasi diameter dibawah 8 mm.
4. Pada penelitian selanjutnya, diharapkan dapat melakukan penelitian pengaruh nilai bilangan reynolds yang sama untuk variasi ukuran diameter *bunsen burner*.

DAFTAR PUSTAKA

- Bouvet, N. Et al. 2011. *Characterization of Syngas Laminar Flames Using The Bunsen Burner Configuration*. International journal of hydrogen energy 36: 992-1005.
- Buffam, J. & Cox K.. 2008. *Measurement of Laminar Burning Velocity of Methane-Air Mixtures Using a Slot and Bunsen Burner*. Unpublished Thesis. Massachusetts: Worcester Polytechnic Institute.
- Chris, Janwar. 2016. *Karakteristik Visualisasi Nyala Api pada Bunsen Burner dan Slot Burner dengan Bahan Bakar LPG (Liquefied Petroleum Gas)*. Malang: Teknik Mesin FT Universitas Brawijaya.
- Eddings, Eric G. 2006. *Mechanical Engineers Handbook: Energy and Power, Volume 4, Third Edition*. Departement of Chemical Engineering University of Utah: Utah.
- El-Mahallawy, F. 2002. *Fundamentals and Technology of Combustion*. Oxford. United Kingdom: Elsevier Inc.
- Glassman. 2008. *Combustion Fourth Edition*. Oxford. United Kingdom: Elsevier Inc.
- Januar H, Afan. 2015. *Efek Penurunan Kadar CO₂ pada Biogas dengan Absorpsi Koh terhadap Kecepatan Rambat Api*. Skripsi Program Sarjana FT Universitas Jember: tidak diterbitkan.
- La Muhaya, Syamsul Bahri, Wardana, I.N.G. Widhiyanuriyawan, Denny. 2015. *Pembakaran Premixed Minyak Nabati pada Bunsen Burner Tipe Silinder*. Jurnal Rekayasa Mesin Vol.6: 45-50.
- Nugraha, Dimas Aditya. 2016. *Karakteristik Nyala Api pada Bunsen Burner dan Slot Burner dengan Bahan Bakar Metana*. Malang: Teknik Mesin FT Universitas Brawijaya.
- Turn, S.R 2010. *An Introduction to Combustion, Concept and Application*. Pennsylvania: McGrawHill.
- Wardana, I.N.G. 2008. *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*. PT. Dinar Wijaya. Brawijaya University Press: Malang.
- Zhen, H.S, et al. 2014. *Characterization of Biogas-Hydrogen Premixed Flames Using Bunsen Burner*. International journal of hydrogen energy 39: 13292-13299.
- Zhen, H.S, et al. 2016. *A Study on The Effects of Air Preheat on The Combustion and Heat Transfer Characteristics of Bunsen Flames*. Elsefier. Fuel 184: 50-58.

LAMPIRAN

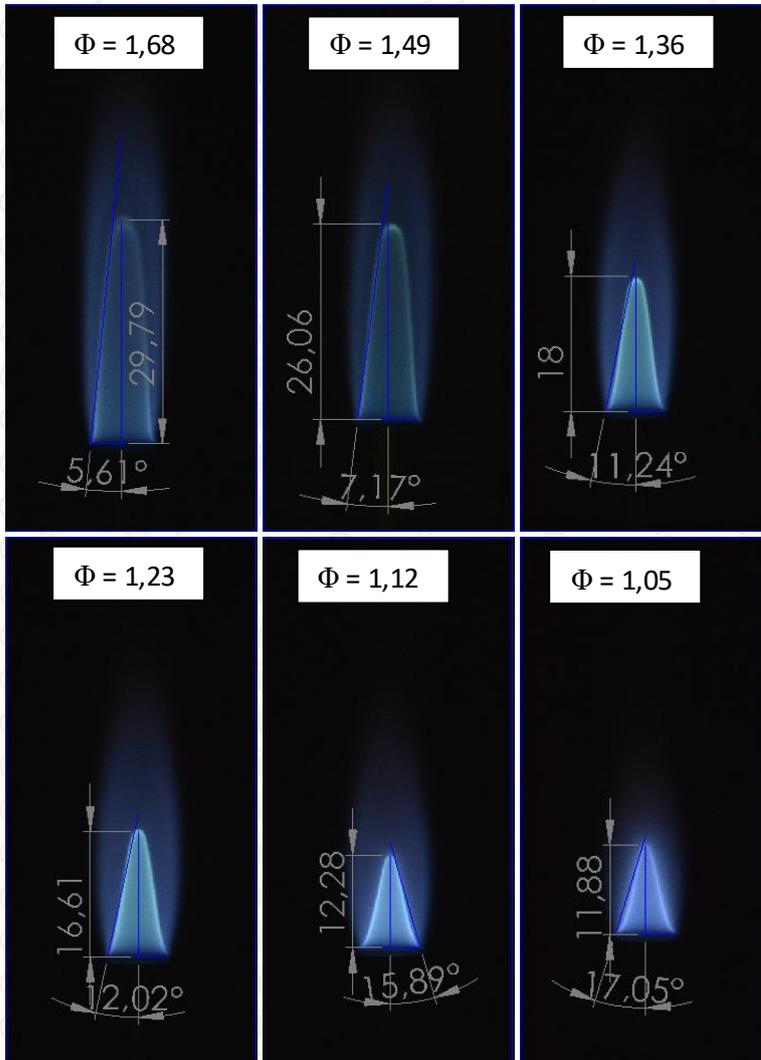
Lampiran 1. Gambar Data Visual Api

Φ	Diameter 8 mm	Diameter 9 mm	Diameter 10 mm	Diameter 11 mm	Diameter 12 mm
1,68					
1,49					
1,36					



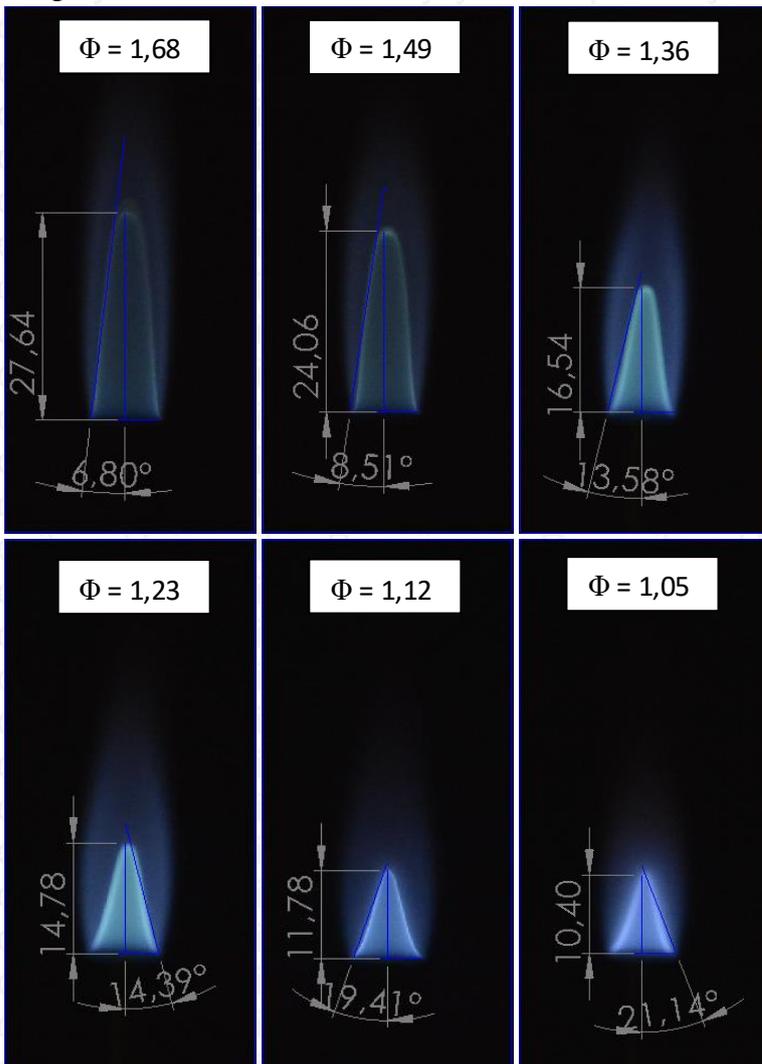
Lampiran 2. Pengolahan Data Visual Sudut dan Tinggi Api

- Pengolahan Data Visual Diameter 8 mm



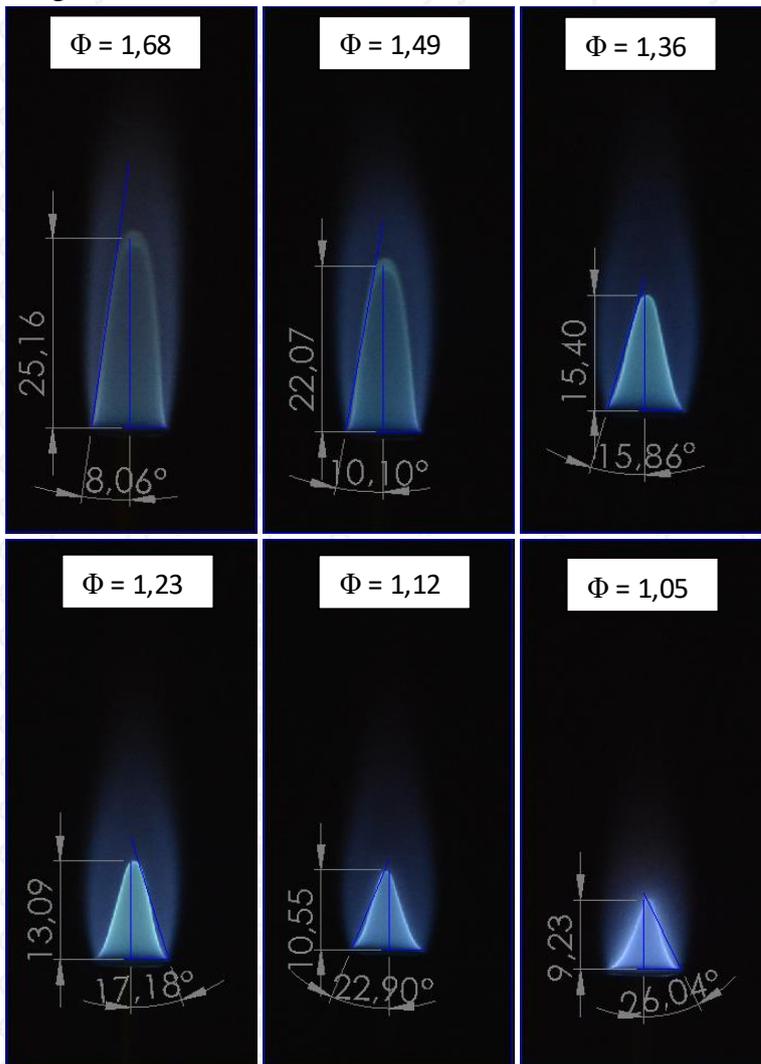


• Pengolahan Data Visual Diameter 9 mm



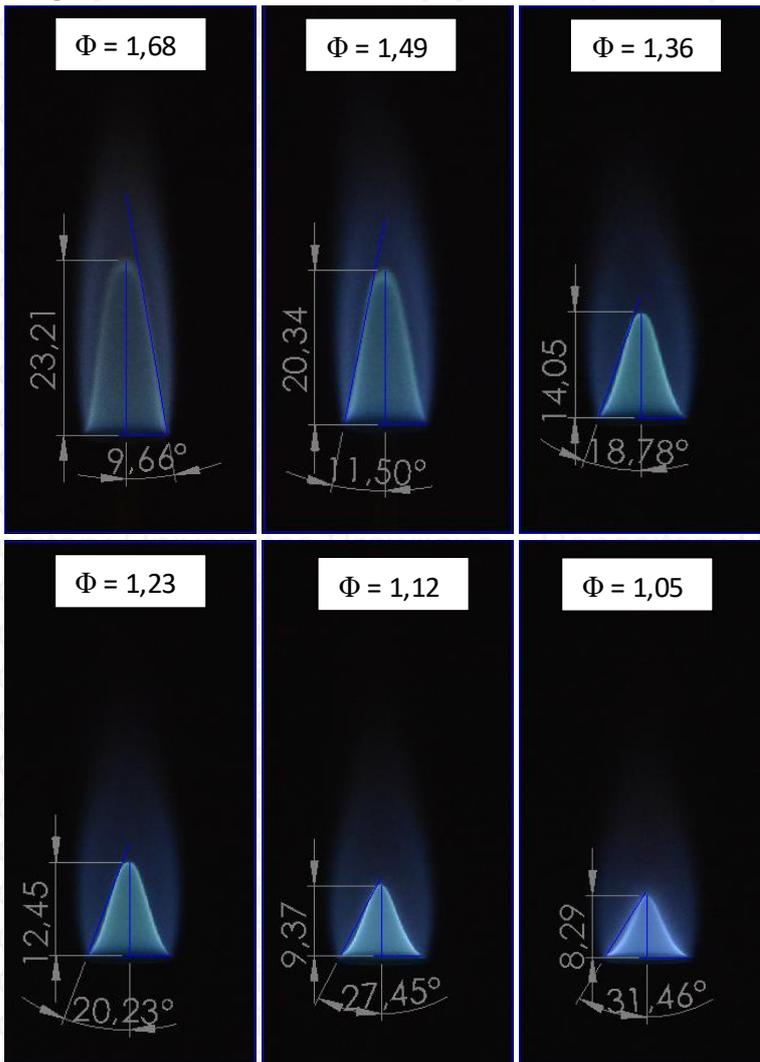


● Pengolahan Data Visual Diameter 10 mm



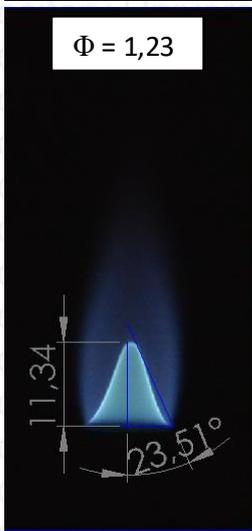
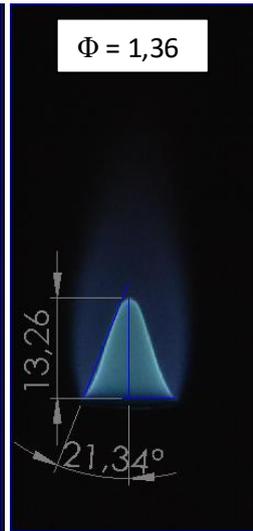
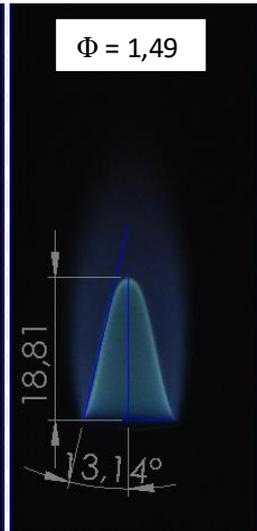
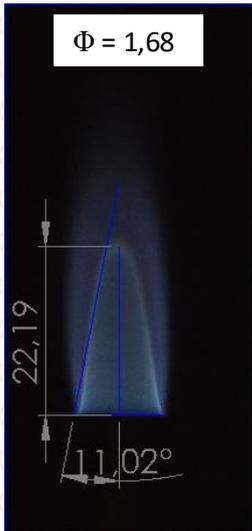


• Pengolahan Data Visual Diameter 11 mm





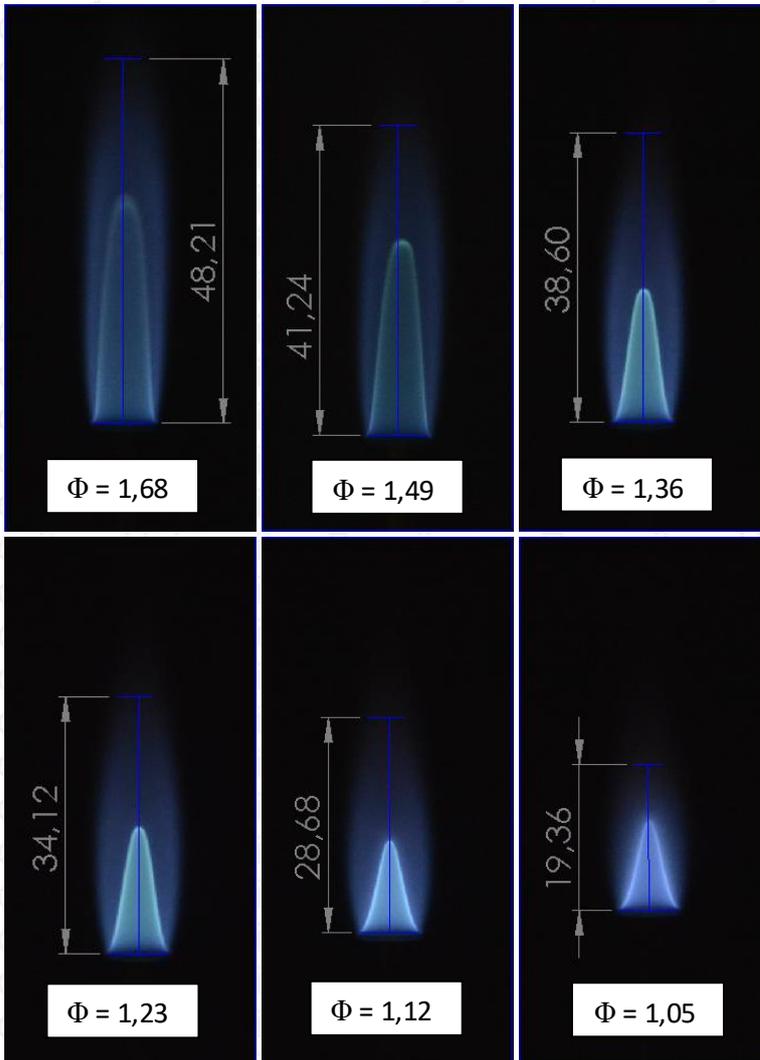
• Pengolahan Data Visual Diameter 12 mm





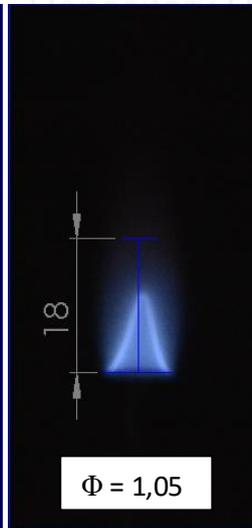
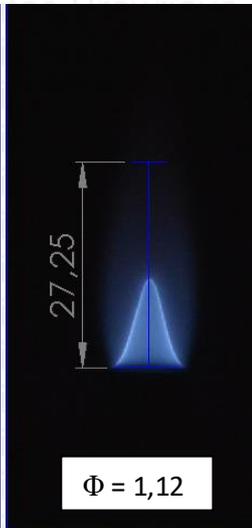
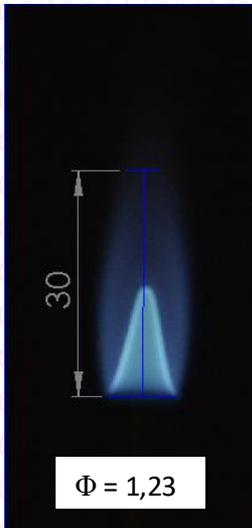
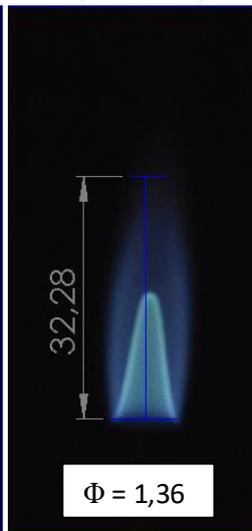
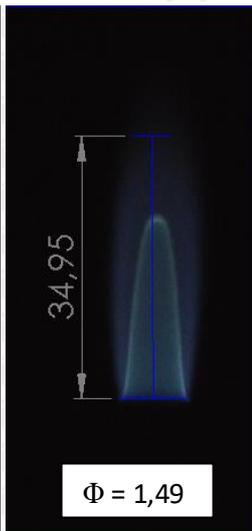
Lampiran 3. Pengolahan Data Visual Tinggi Api Luar

- Pengolahan Data Visual Diameter 8 mm



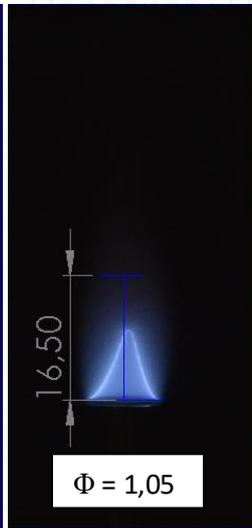
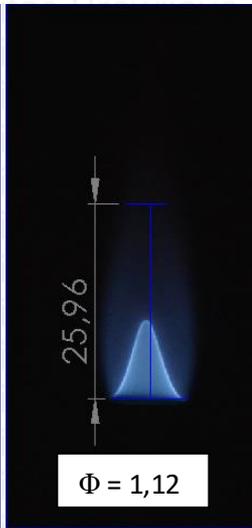
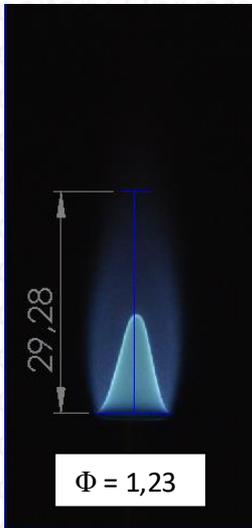
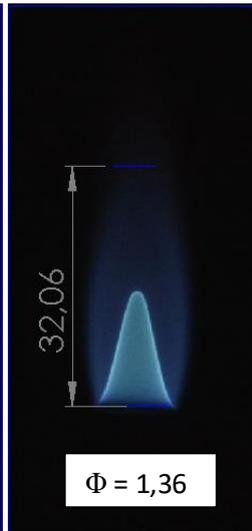
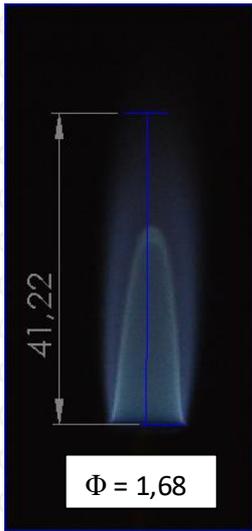


• Pengolahan Data Visual Diameter 9 mm



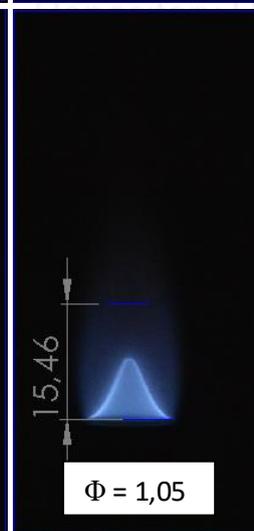
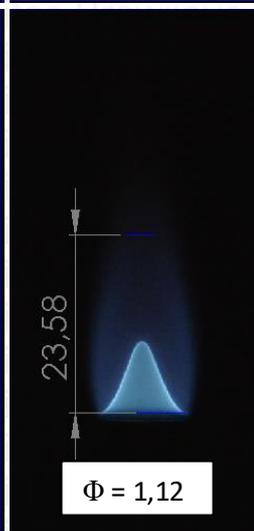
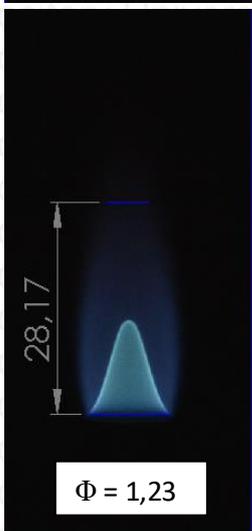
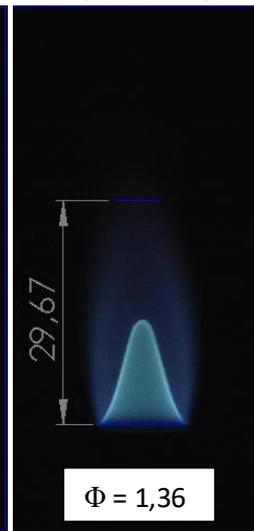
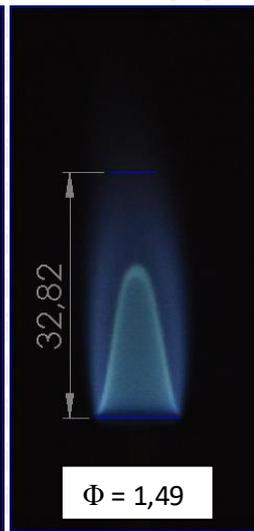
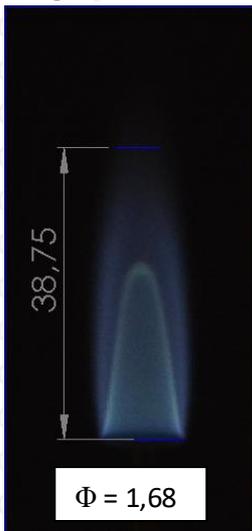


• Pengolahan Data Visual Diameter 10 mm





• Pengolahan Data Visual Diameter 11 mm



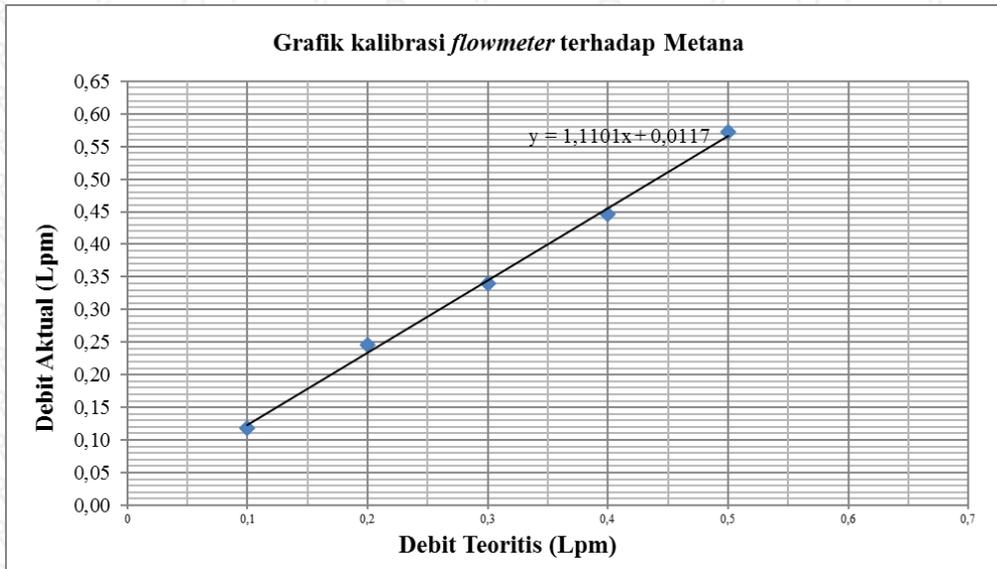
**Lampiran 4. Tabel Hasil Karakteristik Nyala Api**

D Bunsen	Parameter	$\Phi=1,05$	$\Phi=1,12$	$\Phi=1,23$	$\Phi=1,36$	$\Phi=1,49$	$\Phi=1,68$
8 mm	T ujung ($^{\circ}\text{C}$)	1285,33	1253	1239	1230,67	1205,67	1178,67
	T tengah ($^{\circ}\text{C}$)	1237	1207,33	1153	1132	1107,67	1086
	S_L (cm/s)	47,18	41,33	29,02	24,89	14,70	10,73
	Tinggi api premix (mm)	11,88	12,28	16,61	18	26,06	29,79
	Tinggi api difusi (mm)	19,36	26,68	34,12	38,6	41,24	48,21
9 mm	T ujung ($^{\circ}\text{C}$)	1234,33	1219	1201	1191,33	1181	1165,67
	T tengah ($^{\circ}\text{C}$)	1148,33	1126,67	1117,33	1107	1087,67	1068,67
	S_L (cm/s)	45,85	39,63	27,36	23,69	13,77	9,93
	Tinggi api premix (mm)	10,4	11,78	14,78	16,54	24,06	27,64
	Tinggi api difusi (mm)	18	27,25	30	32,28	34,95	43,21
10 mm	T ujung ($^{\circ}\text{C}$)	1221,33	1195,33	1184,67	1163,67	1154	1136,33
	T tengah ($^{\circ}\text{C}$)	1119	1092,67	1075,67	1064	1047	1031,33
	S_L (cm/s)	45,20	37,59	26,34	22,34	13,22	9,53
	Tinggi api premix (mm)	9,23	10,55	13,09	15,4	22,07	25,16
	Tinggi api difusi (mm)	16,5	25,96	29,28	32,06	33,02	41,22
11 mm	T ujung ($^{\circ}\text{C}$)	1210	1181	1163	1143	1119,67	1109,33
	T tengah ($^{\circ}\text{C}$)	1106	1084,67	1061,67	1041,33	1025	1006,67
	S_L (cm/s)	44,41	36,80	25,48	21,75	12,42	9,42
	Tinggi api premix (mm)	8,29	9,37	12,45	14,05	20,34	23,31
	Tinggi api difusi (mm)	15,46	23,58	28,17	29,67	32,82	38,75
12 mm	T ujung ($^{\circ}\text{C}$)	0	1175	1152	1134,33	1125,67	1104
	T tengah ($^{\circ}\text{C}$)	0	1081	1053,67	1039	1007	996,33
	S_L (cm/s)	0	34,07	24,70	20,66	11,89	9,01
	Tinggi api premix (mm)	0	8,14	11,34	13,26	18,81	22,19
	Tinggi api difusi (mm)	0	20,83	25,59	27,47	29,57	36,13



Lampiran 5. Data Kalibrasi Flowmeter Gas Metana

- Gambar Grafik Kalibrasi Flowmeter Gas metana



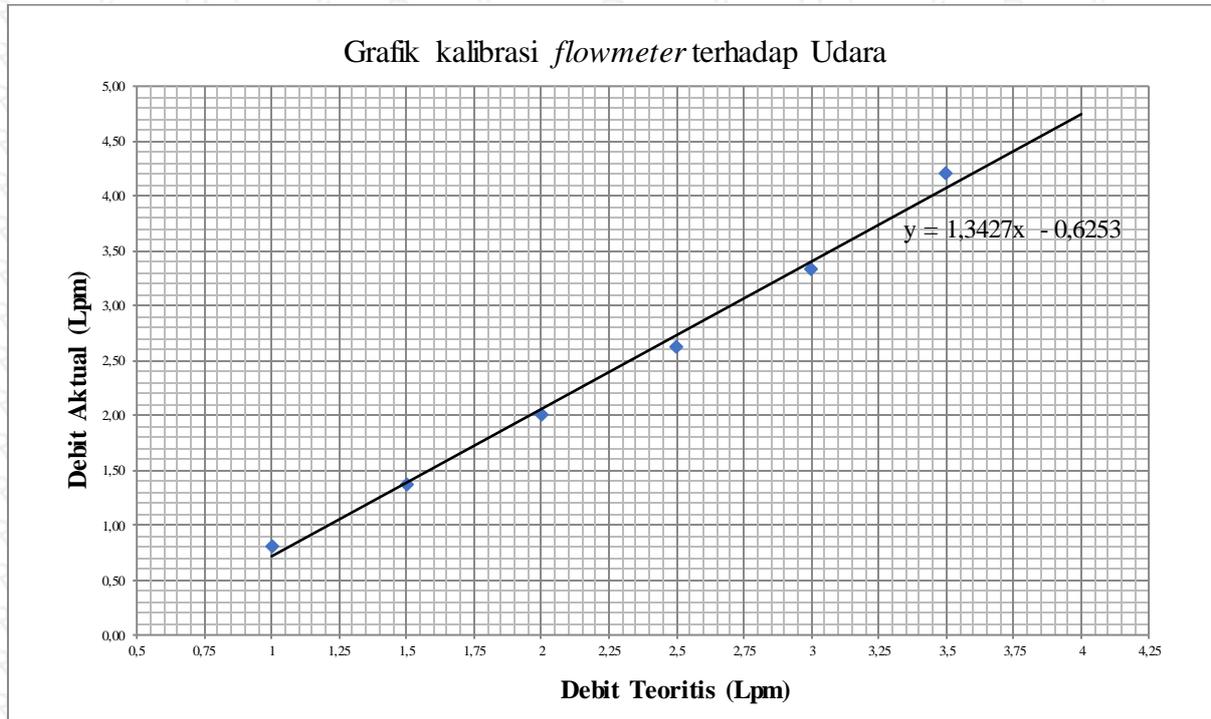
- Tabel Kalibrasi Gas Metana

Debit T (L/min)	Tinggi 1 (cm)	Tinggi 2 (cm)	Tinggi 3 (cm)	Average Tinggi Q	Debit A (L/min)
0,1	7	7,5	6,8	7,1	0,118
0,2	15	15	14,4	14,8	0,246
0,3	20	20,5	21	20,5	0,341
0,4	26,9	26,7	27,1	26,9	0,447
0,5	34	34,7	34,7	34,46666667	0,573



Lampiran 6. Data Kalibrasi Flowmeter Udara

- Gambar Grafik Kalibrasi Flowmeter Udara



- Tabel Kalibrasi Udara

Debit T (L/min)	Tinggi 1 (cm)	Tinggi 2 (cm)	Tinggi 3 (cm)	Average Tinggi Q/(10s)	Debit A (L/min)
1	8,2	8,1	8,1	8,133333333	0,811
1,5	13,8	13,7	13,7	13,733333333	1,369
2	20,4	20,3	20	20,233333333	2,017
2,5	26,5	26,2	26,7	26,466666667	2,638
3	33,3	33,2	33,9	33,466666667	3,335
3,5	42	42,6	42	42,2	4,206