

**PENGARUH MASSA ALIR REAKTAN TERHADAP KARAKTERISTIK
PEMBAKARAN DIFUSI CH₄-CO₂ PADA COUNTERFLOW BURNER**

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar sarjana teknik



Disusun Oleh:

**ANDI PUTRANTO
NIM. 0910620005 - 62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
JURUSAN TEKNIK MESIN
MALANG
2014**

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, karena hanya dengan limpahan rahmat dan hidayah-Nya penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul **”Pengaruh Massa Alir Reaktan Terhadap Karakteristik Pembakaran Difusi CH₄-CO₂ Pada Counterflow Burner”**.

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

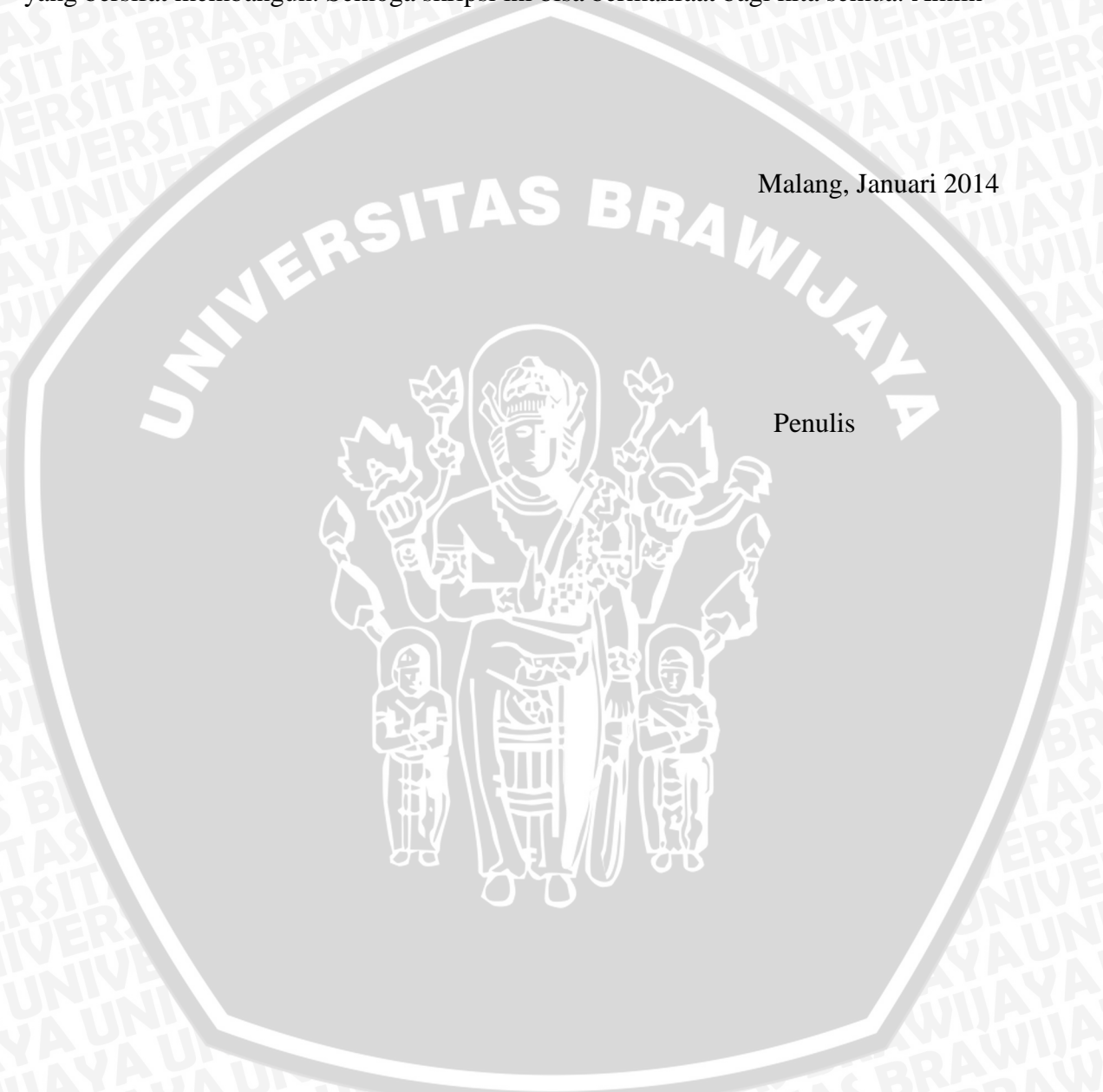
1. Dr. Eng. Nurkholis Hamidi ST., MT. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin dan Bapak Purnami ST., MT. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin.
2. Dr. Eng. Mega Nur S. ST., MT. selaku dosen pembimbing I skripsi yang juga sebagai kepala Lab. Mesin Pendingin atas semua ilmu dan saran yang telah diberikan selama penyusunan skripsi.
3. Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. selaku pembimbing II skripsi yang memberikan arahan serta bimbingan guna kesempurnaan penulisan skripsi ini.
4. Seluruh Dosen pengajar dan Staf administrasi Jurusan Teknik Mesin.
5. Kedua Orang Tua penulis yaitu Roestijono, ST. dan Ernawati, MBA. atas segala pengorbanan baik dukungan do'a maupun material yang telah diberikan kepada penulis selama ini. Juga kepada adik penulis Lutfi Dwi Setyawan yang telah membantu dalam kelancaran menyelesaikan penulisan skripsi.
6. Saudara-saudara “BLACK MAMBA” M'09, terima kasih atas semua dukungan dan bantuan yang telah diberikan mulai dari mahasiswa baru sampai saat ini.
7. Teman-teman dari Lab. Mesin Pendingin UB, mika, bedus, jedunk, acung, ucup, mas afrima, terima kasih atas semua kebersamaan dan dukungannya selama ini.
8. Teman-teman kontrakan MP 110 irwan (sunan), tam, hengki, blonde, muklis, ilham, hafid, lutfi, dan ucup terima kasih atas semua masalah, bantuan, candaan, kesusahan, semangat serta do'a yang telah diberikan kepada penulis selama ini.
9. Farhatur Roisah yang selalu memberikan motivasi dan do'a selama dalam penyelesaian skripsi.
10. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Universitas Brawijaya.

11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah banyak membantu penulis baik selama proses penyusunan skripsi ini.

Dengan keterbatasan ilmu yang dimiliki penulis, tentunya skripsi ini banyak membutuhkan masukan. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan adanya kritik dan saran yang bersifat membangun. Semoga skripsi ini bisa bermanfaat bagi kita semua. Amiin

Malang, Januari 2014

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
DAFTAR SIMBOL	viii
RINGKASAN	ix
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2 Biogas	4
2.3 Pengertian dan Reaksi Pembakaran.....	7
2.3.1 Pembakaran Stoikiometri.....	9
2.3.2 Rasio Udara-Bahan Bakar (<i>Air-fuel Ratio/AFR</i>)	10
2.3.3 Udara berlebih dan Udara Teoritis.....	10
2.4 Pembakaran Difusi.....	11
2.5 Karakteristik Nyala	12
2.5.1 Batas Mampu Nyala (<i>Flammability Limits</i>).....	12
2.5.2 Kestabilan Nyala Api (<i>Flame Stability</i>)	13
2.5.3 Nyala api difusi	14
2.6 Inhibitor	14
2.7 Bahan Bakar.....	14
2.8 Metana	15
2.9 Karbondioksida.....	15
2.10 Nitrogen	16
2.11 Oksigen	16



2.12	<i>Counterflow Difussion Burner</i>	17
2.13	Hipotesis	18
BAB III METODE PENELITIAN		20
3.1	Variabel Penelitian.....	20
3.2	Peralatan Penelitian.....	21
3.3	Skema Instalasi Penelitian	24
3.4	Tempat dan Waktu Pelaksanaan	25
3.5	Metode Pengambilan Data.....	25
3.6	Metode Pengolahan Data	26
3.7	Diagram Alir Penelitian	28
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		29
4.1	Analisa Data.....	29
4.1.1	Data Lebar Api	29
4.1.2	Data <i>Extinction</i> (api padam)	31
4.2	Hasil dan Pembahasan	33
4.2.1	Warna Api.....	33
4.2.2	Lebar Api	36
4.2.3	<i>Extinction</i> (Api Padam).....	39
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN		42
5.1	Kesimpulan.....	42
5.2	Saran	42
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi pada Biogas	5
Tabel 2.2	Nilai Kalor Pembakaran Biogas	6
Tabel 2.3	Komposisi Udara Kering	9
Tabel 2.4	Batas mampu nyala api	13
Tabel 4.1	Lebar Api Biru	30
Tabel 4.2	Lebar Api Kuning	30
Tabel 4.3	Lebar Api Biru	30
Tabel 4.4	Lebar Api Kuning	30
Tabel 4.5	Lebar Api Biru	30
Tabel 4.6	Lebar Api Kuning	30
Tabel 4.7	Data Debit O ₂ Saat <i>Extinction</i> pada Konsentrasi CO ₂ = 0 %	32
Tabel 4.8	Data Debit O ₂ Saat <i>Extinction</i> pada Konsentrasi CO ₂ = 20 %	32
Tabel 4.9	Data Debit O ₂ Saat <i>Extinction</i> pada Konsentrasi CO ₂ = 40 %	32
Tabel 4.10	Data Y _{O₂} pada Konsentrasi CO ₂ = 0%	32
Tabel 4.11	Data Y _{O₂} pada Konsentrasi CO ₂ = 20%	32
Tabel 4.12	Data Y _{O₂} pada Konsentrasi CO ₂ = 40%	32

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Proses pembentukan biogas	6
Gambar 2.2	Ilustrasi proses Pembakaran	8
Gambar 2.3	Struktur api difusi	11
Gambar 2.4	Skema <i>Counterflow Diffusion Flame</i>	17
Gambar 2.5	Nyala api pada <i>Counterflow burner</i>	18
Gambar 3.1	Ruang bakar model <i>Counterflow Burner</i>	21
Gambar 3.2	Pemantik	21
Gambar 3.3	Kamera	22
Gambar 3.4	Tabung gas metana	22
Gambar 3.5	Selang	22
Gambar 3.6	<i>Flowmeter</i>	23
Gambar 3.7	Tabung gas	23
Gambar 3.8	Skema instalasi alat penelitian (tampak samping)	24
Gambar 3.9	Skema instalasi alat penelitian (tampak atas)	24
Gambar 3.10	Diagram alir penelitian	28
Gambar 4.1 (a)	Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.363$ konsentrasi $CO_2 = 0\%$	33
Gambar 4.1 (b)	Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.363$ konsentrasi $CO_2 = 20\%$	33
Gambar 4.1 (c)	Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.363$ konsentrasi $CO_2 = 40\%$	34
Gambar 4.2	Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Lebar Api pada Konsentrasi $CO_2 = 0\%$	36
Gambar 4.3	Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Lebar Api pada Konsentrasi $CO_2 = 20\%$	37
Gambar 4.4	Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Lebar Api pada Konsentrasi $CO_2 = 40\%$	38
Gambar 4.5	Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Kondisi <i>Extinction</i> (Api Padam) pada Konsentrasi $CO_2 = 0\%$	39
Gambar 4.6	Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Kondisi <i>Extinction</i> (Api Padam) pada Konsentrasi $CO_2 = 20\%$	39
Gambar 4.7	Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Kondisi <i>Extinction</i> (Api Padam) pada Konsentrasi $CO_2 = 40\%$	40

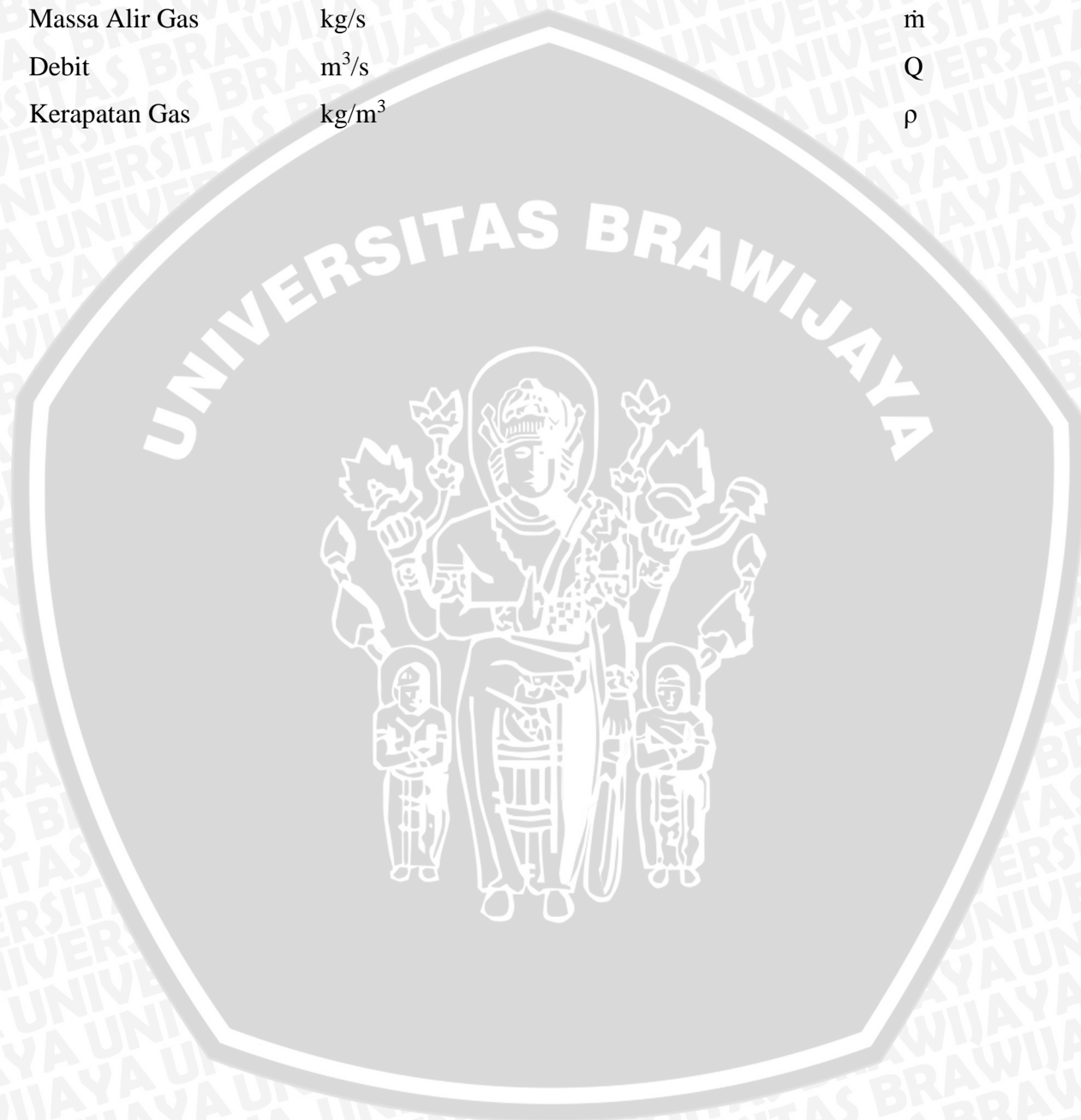
DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Gambar (a) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.304$ konsentrasi $CO_2 = 0\%$
	Gambar (b) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.304$ konsentrasi $CO_2 = 20\%$
	Gambar (c) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.304$ konsentrasi $CO_2 = 40\%$
	Gambar (d) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.246$ konsentrasi $CO_2 = 0\%$
	Gambar (e) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.246$ konsentrasi $CO_2 = 20\%$
	Gambar (f) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.246$ konsentrasi $CO_2 = 40\%$
	Data Lebar Api pada Kondisi $Y_{O_2} 0.304$ Berbagai Konsentrasi CO_2
	Data Lebar Api pada Kondisi $Y_{O_2} 0.246$ Berbagai Konsentrasi CO_2



DAFTAR SIMBOL

Besaran Dasar	Satuan dan Singkatannya	Simbol
Jumlah mol	mol	N
Massa Relatif	kg/mol	M
Massa Alir Gas	kg/s	m
Debit	m ³ /s	Q
Kerapatan Gas	kg/m ³	p



RINGKASAN

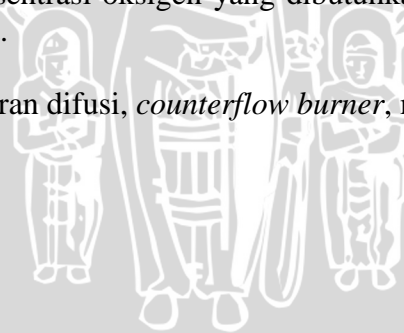
ANDI PUTRANTO, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2014, *Pengaruh Massa Alir Reaktan terhadap Karakteristik Pembakaran Difusi CH₄-CO₂ pada Counterflow burner*, Dosen Pembimbing : Mega Nur S. dan Widya W.

Biogas merupakan salah satu sumber energi alternatif yang sifatnya dapat diperbarui karena biogas berasal dari campuran gas-gas pada proses fermentasi bahan organik oleh bakteri dalam keadaan tanpa oksigen (*anaerobic process*). Biogas terdiri dari berbagai macam gas tetapi, hanya ada dua gas yang memiliki prosentasi lebih besar dibandingkan dengan gas lain yang terkandung dalam biogas yaitu CH₄ dan CO₂, dua gas ini juga yang menjadi salah satu alasan kenapa biogas dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam proses pembakaran biogas.

Tujuan dari penelitian ini adalah guna mengetahui pengaruh yang diakibatkan oleh massa alir reaktan terhadap karakteristik pembakaran difusi CH₄-CO₂. Pada penelitian ini dilakukan untuk melihat pengaruh dari massa alir bahan bakar (CH₄ dan CO₂) terhadap karakteristik api yang dihasilkan yang meliputi warna api, lebar api dan *extinction*. Pembakaran dilakukan secara difusi. Penelitian ini menggunakan metode *counterflow burner* dimana aliran bahan bakar dan oksidator dialirkan melalui dua buah pipa yang diletakkan saling berlawanan arah. Aliran bahan bakar mengalir dari atas pipa sedangkan oksidator dialirkan melalui bagian bawah pipa, dan api akan terbentuk ditengah-tengah pipa. Penelitian ini memvariasikan massa alir bahan bakar yakni sebesar 4 L/M, 6 L/M, 8 L/M, 10 L/M, 12 L/M, dan 14 L/M dengan pembakaran tanpa menggunakan CO₂, dengan 20% dan 40% CO₂.

Hasil dari penelitian yang didapat adalah seiring dengan penambahan massa alir reaktan yang diikuti dengan penambahan konsentrasi CO₂ maka mengakibatkan penurunan pada lebar api, warna api yang dihasilkan juga semakin gelap sedangkan untuk kondisi *extinction*, konsentrasi oksigen yang dibutuhkan untuk mempertahankan api adalah semakin meningkat.

Kata Kunci : biogas, pembakaran difusi, *counterflow burner*, massa alir



BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada saat ini banyak hal dalam berbagai bidang yang dilakukan oleh manusia berkembang sangat pesat, ditandai dengan banyaknya penggunaan mesin yang ditujukan untuk mempermudah pekerjaan manusia. Mesin-mesin agar dapat bekerja memerlukan bahan bakar tetapi, sebagian besar bahan bakar merupakan sumber daya alam yang tidak dapat diperbarui yang artinya sumber daya alam tersebut dalam jangka waktu yang panjang akan habis dan untuk masa pengembaliannya membutuhkan waktu sampai jutaan tahun lamanya sehingga dapat merugikan manusia.

Salah satu cara yang dapat dilakukan oleh manusia adalah melalui pengembangan energi alternatif. Energi alternatif dapat dikembangkan melalui apa saja, salah satu contohnya adalah sumber energi alternatif yang berasal dari bahan-bahan organik, hal ini dikarenakan senyawa organik tergolong energi yang dapat diperbarui serta ramah lingkungan. Biogas merupakan salah satu contoh dari sumber energi alternatif dari senyawa organik. Biogas dapat dihasilkan melalui proses fermentasi dari limbah organik seperti sampah, sisa-sisa makanan, kotoran hewan serta limbah industri makanan.

Secara umum kandungan dari biogas adalah CH_4 (50% – 70%), CO_2 (30% - 40%), N_2 (1% - 2%), H_2 (5% - 10%), H_2S (0% - 3%), dan H_2O (0.3%). Biogas dapat digunakan sebagai bahan bakar alternatif dikarenakan kandungan gas CH_4 yang cukup besar. Gas CH_4 ini yang akan memiliki peran yang sangat besar terhadap proses pembakaran biogas. Namun, tidak semua kandungan biogas menguntungkan, biogas memiliki kelemahan yakni kandungan CO_2 berperan sebagai zat pengotor dimana memiliki sifat yang merugikan bagi proses pembakaran. Gas CO_2 menjadi penghambat dalam reaksi pembakaran karena dapat menurunkan nilai kalor pembakaran biogas, nilai kalor pembakaran yang dihasilkan rendah maka energi yang dihasilkan juga akan rendah (Karim, 1991). Gas CO_2 mempunyai kalor spesifik yang tinggi sehingga, sebagian panas dari pembakaran akan diserap oleh CO_2 seiring dengan meningkatnya temperatur (Karim, 1991). Terakhir, kerugian yang akan ditimbulkan oleh gas CO_2 di dalam bahan bakar dapat menurunkan laju reaksi pembakaran (Karim, 1991).

Pada penelitian ini digunakan metode *Counterflow burner*, metode ini merupakan salah satu cara untuk mempelajari struktur api yang dipengaruhi oleh jenis

kandungan bahan bakar, massa alir (AFR) bahan bakar maupun karakteristik reaktan bahan bakar dan oksidator (Tsuji, 1982). Adapun peneliti yang telah menggunakan metode ini sebelumnya adalah Chen (2011) yang meneliti tentang karakteristik pembakaran biogas dengan menggunakan *Counterflow diffusion flame*, dari penelitian tersebut dapat diprediksi dengan penambahan gas H_2 dapat memperbaiki proses pembakaran pada biogas

Dari berbagai penjelasan diatas maka, diperlukan sebuah penelitian lebih lanjut guna mengetahui pengaruh dari massa alir gas reaktan terhadap karakteristik dari pembakaran difusi CH_4-CO_2 dengan menggunakan metode *counterflow burner*.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas maka, dapat dirumuskan sebuah permasalahan yaitu “Bagaimana pengaruh massa alir reaktan terhadap karakteristik pembakaran difusi pada CH_4-CO_2 ?”

1.3 Batasan Masalah

Agar penelitian ini lebih terarah dan tidak melebar maka penulis akan memberikan batasan-batasan masalah yang meliputi hal-hal berikut ini:

1. Meneliti tentang karakteristik api, yang meliputi lebar api, warna api serta *extinction* (api padam);
2. Aliran gas yang masuk ke dalam ruang bakar merupakan aliran laminar;
3. Gas yang digunakan dalam penelitian adalah gas Metana, gas Karbondioksida, gas Oksigen dan gas Nitrogen;
4. Kandungan gas CH_4 yang digunakan sebesar 95%;

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian yaitu untuk mengetahui pengaruh massa alir reaktan terhadap karakteristik pembakaran difusi CH_4-CO_2 .

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian adalah:

1. Dapat digunakan sebagai referensi tambahan untuk penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan *counter flow burner* sebagai salah satu alat untuk mengetahui karakteristik dari api;

2. Memberikan masukan bagi dunia industri tentang penggunaan biogas sebagai sumber energi alternatif agar dapat diproduksi secara massal produk-produk yang menggunakan bahan bakar biogas;
3. Mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil yang selama ini sudah banyak digunakan.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Berbagai macam penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang berhubungan dengan penelitian, diantaranya adalah:

Porpathan (2008), meneliti tentang penggunaan biogas sebagai bahan bakar pada pembakaran busi. Hasilnya adalah kadar kandungan gas CO₂ dalam biogas yang digunakan sebagai bahan bakar menurunkan kinerja mesin secara signifikan. Kadar kandungan gas CO₂ dari yang sebelumnya 41% dikurangi hingga mencapai 20% dapat meningkatkan kinerja yang dihasilkan oleh mesin tersebut.

Karim (1991), meneliti tentang kandungan gas CO₂ di dalam biogas. Hasilnya adalah gas CO₂ dapat menurunkan nilai kalor pembakaran yang berakibat pada rendahnya nilai energi dari pembakaran yang dihasilkan. Dengan tingginya kadar kandungan gas CO₂ akan berakibat pada lamanya waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses pembakaran dan juga membutuhkan waktu yang cukup lama untuk penyalaan bahan bakar.

Chen (2011), meneliti tentang karakteristik pembakaran biogas dengan menggunakan metode *Counterflow burner*. Hasilnya adalah dengan menggunakan metode ini dapat memperlihatkan kelayakan pemanfaatan bahan bakar biogas tanpa menggunakan proses pemurnian terlebih dahulu. Pemurnian yang dimaksud adalah kandungan biogas dengan kandungan-kandungan pengotor lain seperti gas CO₂.

Tsuji (1982), Li (2002), Sasongko (2011), meneliti tentang metode pembakaran dengan menggunakan metode *Counterflow burner*. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ini merupakan metode yang sesuai digunakan untuk mempelajari struktur api yang dipengaruhi oleh jenis kandungan bahan bakar, massa alir (AFR) bahan bakar maupun karakteristik reaktan bahan bakar dan oksidator.

2.2 Biogas

Biogas adalah campuran gas-gas yang dihasilkan dari suatu proses fermentasi bahan organik oleh bakteri dalam keadaan tanpa oksigen (*anaerobic process*). Biogas merupakan proses produksi energi berupa gas yang berjalan melalui proses biologis. Biogas terbentuk karena interaksi kompleks dari sejumlah bakteri yang berbeda, protozoa maupun jamur. Gas-gas yang terdapat di dalam biogas meliputi gas Metana

(CH₄), gas Karbondioksida (CO₂), gas Hidrogen (H₂), gas Nitrogen (N₂), dan gas Hidrogensulfida (H₂S). Cara untuk mendapatkan biogas juga bermacam-macam bisa dari proses fermentasi limbah organik seperti sampah, sisa-sisa makanan, kotoran hewan bahkan limbah industri makanan bisa dijadikan sebagai biogas.

Tabel 2.1 Komposisi pada Biogas

No.	Komponen	Satuan	Komposisi	
			1*	2*
1	Gas Metana	%Vol	50 - 75	54 - 70
2	Karbon Dioksida	%Vol	24 - 40	27 - 45
3	Nitrogen	%Vol	< 2	0 - 1
4	Hidrogen	%Vol	< 1	0- 1
5	Karbon Monoksida	%Vol		0.1
6	Oksigen	Ppm	< 2	0.1
7	Hidrogen Sulfida	Ppm	< 2	Sedikit

Sumber: *Hambali (2007)

**Widarto (1997)

Terdapat dua buah gas yang memiliki kandungan paling besar yakni gas CH₄ dengan gas CO₂, khusus dari gas CO₂ memiliki pengaruh yang negatif terhadap proses pembakaran pada biogas. Kandungan gas CO₂ pada campuran gas di biogas dapat menyebabkan kerugian. Hal ini diutarakan oleh (Karim, 1991) dari hasil penelitiannya menyebutkan bahwa gas CO₂ menjadi penghambat dalam reaksi pembakaran karena dapat menurunkan nilai kalor pembakaran, karena nilai kalor pembakaran yang dihasilkan rendah maka energi yang dihasilkan juga akan rendah. Kerugian-kerugian lain yang diakibatkan oleh gas CO₂ dalam pembakaran biogas adalah gas CO₂ mempunyai kalor spesifik yang tinggi sehingga, sebagian panas dari pembakaran akan diserap oleh CO₂ seiring dengan meningkatnya temperatur (Karim, 1991). Kerugian yang terakhir adalah CO₂ di dalam bahan bakar dapat menurunkan laju reaksi pembakaran (Karim, 1991).

Biogas dapat berfungsi sebagai bahan bakar alternatif pengganti bahan bakar fosil yang jumlahnya saat ini sudah semakin menipis, dikarenakan biogas mengandung gas CH₄. Gas CH₄ sendiri dihasilkan oleh bakteri *Methanobacterium*, dan *Methanobacillus*, dimana kedua bakteri ini hidup di dalam usus makhluk hidup khususnya hewan memamah biak dan diperkirakan sekitar 75 juta ton gas CH₄ dikeluarkan oleh hewan memamah biak tiap tahunnya. Berikut akan disajikan pada **Tabel 2.2** data tentang nilai kalor pembakaran dari biogas.

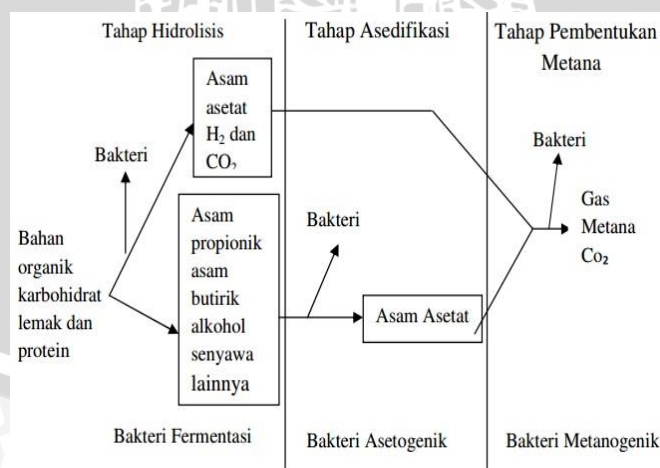
Tabel 2.2 Nilai Kalor Pembakaran Biogas

Komponen	High Heating Value		Low Heating Value	
	Kkal/m ³	Kkal/kg	Kkal/m ³	Kkal/kg
Hidrogen	2.842,21	33.903,61	2.402,62	28.661,13
Karbon Monoksida	2.811,95	2.414,31	2.811,95	2.414,31
Gas Metana	8.851,43	13.265,91	7.973,13	11.953,76
Natural Gas	9.165,55	12.943,70	8.320,18	11.749,33

Sumber: Zicari (2003)

Potensi pengembangan biogas di Indonesia sendiri masih cukup besar. Hal tersebut mengingat cukup banyaknya populasi ternak yang ada. Rata-rata jumlah populasi sapi di Indonesia terdapat 11 juta ekor, untuk kerbau 3 juta ekor dan kuda 500 ribu ekor. Dimana tiap 1 ekor ternak tersebut dapat menghasilkan kurang lebih sebanyak 2 m³ biogas per hari dan untuk 1 m³ biogas setara dengan 0,7 kg minyak tanah atau 1.25 kwh listrik (Kristoferson dan Bokalders, 1991). Di samping itu, sampah-sampah organik, maupun sisa-sisa makanan yang dihasilkan oleh manusia tiap harinya juga mempunyai nilai ekonomis yang tidak kecil, mengingat jumlah populasi dari penduduk Indonesia yang sangat besar.

Proses pembentukan biogas berasal dari penguraian bahan organik dimana tidak membutuhkan oksigen (*anaerobic process*) tetapi dengan menggunakan bakteri sebagai perantaranya. Ada tiga tahapan dalam proses pembentukan biogas yakni tahap hidrolisis, tahap pengasaman, dan tahap metanogenesis atau tahap proses terbentuknya gas CH₄.

**Gambar 2.1** Proses pembentukan biogas

Sumber: Jazilatur Munawaroh (2010)

1. Tahap Hidrolisis

Penguraian senyawa kompleks atau senyawa rantai panjang menjadi molekul-molekul sederhana atau senyawa sederhana dengan rantai pendek. Hidrolisis pada biogas merupakan proses dimana bahan-bahan yang tidak larut dari kotoran sapi seperti selulosa, polisakarida, dan lemak diubah menjadi bahan yang larut dalam air seperti karbohidrat dan asam lemak dengan bantuan enzim seperti selullase, protease, dan lipase.

2. Tahap Pengasaman

Pembentukan asam dari senyawa sederhana, pada biogas tahapan asidogenik ini ketika bakteri penghasil asam menghasilkan asam asetat dalam keadaan anaerob dan berlangsung dalam temperatur 25°C di digester. Contoh bakteri penghasil asam adalah *Pseudomonas*, *Escherichia*, *Flavobacterium*, dan *acidogenesis*.

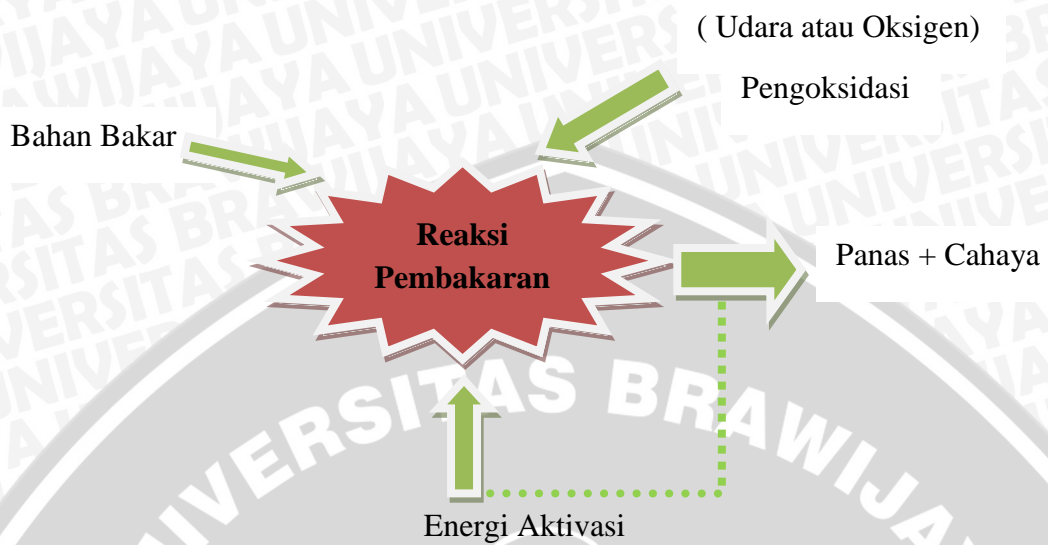
3. Tahap Metanogenesis

Proses pembentukan gas CH₄ dengan bantuan bakteri pembentuk metan seperti *Methanobacterium*, *Mathanobacillus*, *Methanosacaria*, dan *Methanococcus*. Bakteri metanogenik mensintesis senyawa dengan berat molekul rendah menjadi senyawa dengan berat molekul tinggi, misalnya bakteri ini menggunakan hidrogen, CO₂, dan asam asetat untuk membentuk gas CH₄ dan CO₂ (Amaru, 2004). Proses ini berlangsung selama 14 hari pada temperatur 25°C di digester. Pada proses ini akan dihasilkan 70% CH₄, 30% CO₂, sedikit H₂ dan H₂S (Price dan Cheremisinoff, 1981).

2.3 Pengertian dan Reaksi Pembakaran

Pembakaran adalah proses reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidator yang menghasilkan energi panas dan cahaya. Bahan bakar merupakan segala bentuk yang melepas panas ketika dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur seperti C, O₂, N₂ dan S. Sedangkan oksidator adalah segala bentuk yang mengandung O₂ (misalnya udara) dan akan bereaksi dengan bahan bakar. Dalam proses pembakaran terdapat beberapa fenomena antara lain adalah interaksi pada proses-proses kimia dan fisika, pelepasan panas dari energi ikatan-ikatan kimia, proses perpindahan panas dan massa, dan fenomena gerakan-gerakan dari fluida yang ada di dalamnya. Proses pembakaran bisa berlangsung jika terdapat :

1. Bahan bakar
2. Pengoksidasi (oksigen atau udara)
3. Panas atau energi aktivasi

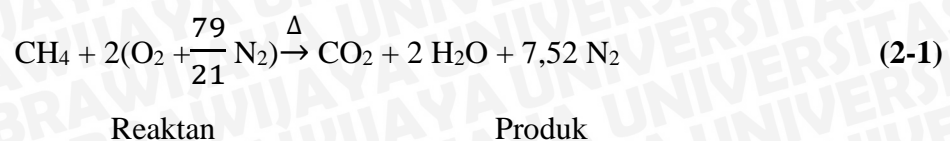


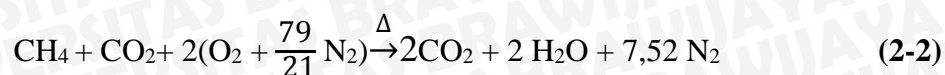
Gambar 2.2 Ilustrasi proses Pembakaran
 Sumber : Wardana (2008:1)

Energi panas dan cahaya diperlukan guna mengaktifkan molekul-molekul bahan bakar sehingga molekul tersebut menjadi bermuatan. Energi panas dan cahaya ini dapat disebut juga sebagai energi aktivasi. Dalam proses pembakaran apabila kekurangan jumlah O₂ maka akan terjadi pembakaran tidak sempurna. Pada pembakaran tidak sempurna dapat mengakibatkan tidak terbakarnya bahan bakar serta dapat juga terbentuk CO. Sedangkan, jika jumlah O₂ sesuai dengan jumlah bahan bakarnya maka akan terjadi pembakaran sempurna. Pada proses pembakaran sempurna tidak ada zat yang tersisa, semua zat habis terbakar.

Dalam proses pembakaran juga dibutuhkan tambahan udara berlebih untuk menjamin proses pembakaran yang terjadi adalah sempurna. Walaupun demikian, apabila terlalu banyak tambahan udara yang berlebih juga tidak baik karena dapat mengakibatkan kehilangan panas serta buruknya efisiensi.

Seperti telah dijelaskan sebelumnya, proses pembakaran dapat terjadi jika bahan bakar teroksidasi. Berikut contoh reaksi pembakaran sempurna dari metana dengan udara dan campuran metana dan karbondioksida dengan udara.





Reaktan

Produk

Untuk pembakaran tidak sempurna, maka akan terbentuk CO, CO₂, dan H₂O pada bagian produk. Juga sering terbentuk HC tak jenuh, kadang juga terdapat C sebagai hasilnya. Oleh karena itu, ada dua hal penting yang harus dipenuhi agar proses pembakaran bisa berlangsung yakni adanya kesetimbangan massa dan kesetimbangan energi. Untuk kesetimbangan massa, massa yang diperlukan tersebut oleh para ahli kimia disebut stoikiometri. Sedangkan kesetimbangan energi yang diterapkan ketika proses pembakaran berlangsung diturunkan dari prinsip-prinsip termokimia.

2.3.1 Pembakaran Stoikiometri

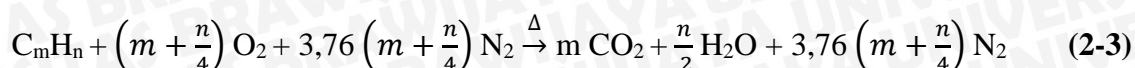
Pembakaran stoikiometri adalah pembakaran dimana semua atom dari bahan bakar dan pengoksidasi bereaksi seluruhnya menghasilkan untuk menjadi produk. Pada proses pembakaran selalu membutuhkan O₂ sebagai oksidatornya, sedangkan O₂ sendiri didapat dari udara, dimana udara terdiri dari O₂, N₂, Ar, CO₂, H₂O dan sejumlah gas dalam bagian yang cukup kecil. Komposisi dari udara kering dapat dilihat pada **Tabel 2.3**.

Tabel 2.3 Komposisi Udara kering

Udara	Proporsi Volume %		Proporsi masa %	
	Aktual	Penggunaan	Aktual	Penggunaan
Nitrogen	78,03	79	75,45	76,8
Oksigen	20,99	21	23,20	23,2
Argon	0,94	0	1,30	0
CO ₂	0,03	0	0,05	0
Gas lainnya	0,01	0	-	0

Sumber : Wardana (2008)

Untuk memudahkan perhitungan dalam reaksi pembakaran, maka untuk O₂ dapat diasumsikan sebesar 21% dan 79% untuk N₂. Oleh karena itu, pada reaksi pembakaran dengan udara, penggunaan 1 mol O₂ akan melibatkan penggunaan $\left(\frac{79,0}{21,0}\right) = 3,76$ mol N₂. Untuk dapat mencapai pembakaran yang sempurna semua atom C diharapkan dapat terbakar menjadi CO₂ dan semua atom H₂ dapat terbakar menjadi H₂O. Reaksi pembakaran sempurna antara bahan bakar (C_mH_n) secara matematis dapat dituliskan sebagai berikut:



Persamaan diatas menggunakan jumlah udara yang sesuai atau biasa disebut udara stoikiometri. Akan tetapi, dalam kondisi sebenarnya pembakaran sempurna hampir tidak dapat terjadi. Hal ini dikarenakan pembakaran berlangsung secara kompleks, tidak hanya bergantung pada model ruang bakarnya tetapi juga bergantung pada kondisi bahan bakar, udara, bahkan temperatur pembakarannya.

2.3.2 Rasio Udara-Bahan Bakar (*Air-fuel Ratio/AFR*)

Rasio udara-bahan bakar atau AFR, merupakan salah satu parameter dari pembakaran dimana juga memiliki peranan yang sangat penting pada proses pembakaran. Metode ini mendefinisikan campuran dan perbandingan massa udara dengan bahan bakar.

Rasio udara atau bahan bakar (*air-fuel ratio*) dapat dilihat pada persamaan berikut, dimana N adalah jumlah mol sedangkan M adalah massa molekul :

$$(AFR) = \left(\frac{N_{udara}}{N_{bahan\ bakar}} \right) \quad (2-4)$$

$$(AFR) = \left(\frac{M_{udara}}{M_{bahan\ bakar}} \right) \quad (2-5)$$

2.3.3 Udara berlebih dan Udara Teoritis

Persen udara berlebih dilambangkan dengan λ . Dimana secara matematis persen udara berlebih dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\lambda = \frac{AFR_{aktual} - AFR_{stoik}}{AFR_{stoik}} \times 100 \% \quad (2-6)$$

AFR_{aktual} atau AFR_{stoik} bisa dalam perbandingan mol atau berat.

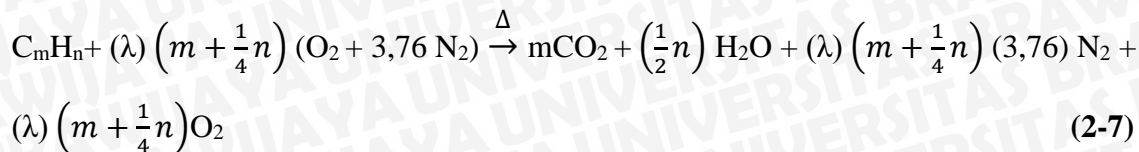
Secara aktual, proses pembakaran hampir tidak pernah terjadi secara sempurna, banyak hal yang dapat mempengaruhinya. Salah satu cara yang mungkin digunakan untuk mencapai pembakaran yang sempurna adalah dengan cara memasukkan udara tambahan ke dalam ruang bakarnya. Udara berlebih (*Excess Air*) didefinisikan sebagai udara yang diberikan untuk pembakaran dalam jumlah lebih besar dari jumlah yang dibutuhkan bahan bakar. Dari sinilah juga muncul istilah lain yaitu udara teoritis. Hubungan antara udara teoritis dengan udara lebih adalah sebagai berikut:

$$\text{Udara teoritis} = 100 \% + \text{persen udara lebih}$$

$$= (100 + \lambda) \%$$

$$\lambda = \text{udara teoritis} - 100\%$$

Untuk mengetahui lebih lanjut dimana letak dari persen udara lebih, dapat dilihat dari persamaan reaksi dibawah ini:



Keterangan :

λ = faktor kelebihan udara

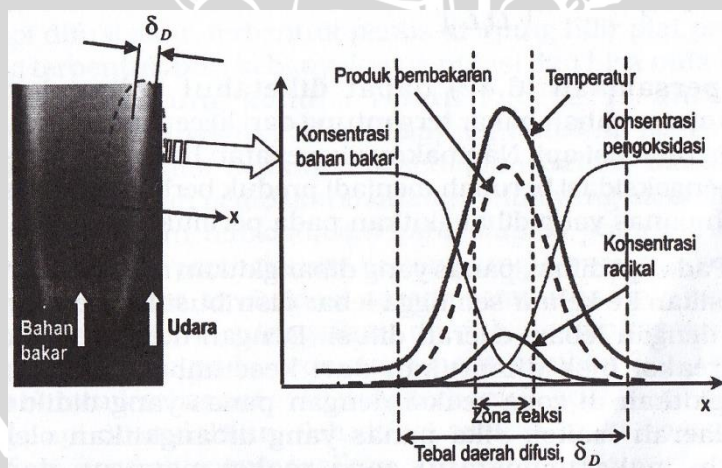
$\lambda = 1$ apabila dipergunakan udara stoikiometri

$\lambda > 1$ apabila dipergunakan udara berlebih

$\lambda < 1$ apabila kekurangan udara

2.4 Pembakaran Difusi

Pembakaran dapat dilakukan dengan cara premiks maupun difusi. Pembakaran dengan cara difusi adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan pengoksidasi (udara atau O_2) tidak dicampur secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Proses pembakaran difusi ini bisa dijumpai di berbagai proses pembakaran seperti nyala lilin, api kebakaran, pembakaran di turbin gas, serta pembakaran pada mesin diesel dan masih banyak lagi.



Gambar 2.3 Struktur api difusi

Sumber : Wardana (2008:183)

Pada api difusi, panas yang dibangkitkan di dalam zona reaksi didifusikan keluar sehingga lebar distribusi temperatur hampir sama dengan lebar daerah difusi. Jika pencampuran bahan bakar dan udara (O_2) dengan proses difusi ini mencapai kondisi mendekati stoikiometri, dan panas yang dilepas oleh api di daerah pencampuran tersebut sudah cukup maka pembakaran akan berlangsung. Namun, ketika konsentrasi udara di

daerah pengoksidasi dan konsentrasi bahan bakar di daerah bahan bakar rendah, maka karena akibat pengaruh pendinginan dari luar, suhu pada daerah reaksi menjadi rendah dan api tidak akan terbentuk.

2.5 Karakteristik Nyala

Karakteristik nyala sangat erat kaitannya dengan komposisi campuran dari bahan bakar dengan udara. Konsentrasi bahan bakar minimum dalam campuran yang sudah dapat menyala dinamakan batas nyala bawah, sedangkan bahan bakar maksimum dalam campuran yang dapat mendukung api untuk menyebarkan diri dinamakan batas nyala atas.

Karakteristik nyala sendiri juga dipengaruhi oleh beberapa faktor diantaranya adalah faktor kimia dan faktor fisika. Untuk faktor kimia meliputi rasio campuran, penambahan inert, dan struktur HC dari bahan bakar yang digunakan, sedangkan untuk faktor fisika meliputi temperatur dan tekanan.

2.5.1 Batas Mampu Nyala (*Flammability Limits*)

Pembakaran difusi akan berlangsung pada daerah dimana bahan bakar dan udara kemudian bercampur. Pemunculan dari nyala akan bergantung pada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar terhadap udara di sekitarnya. Konsentrasi bahan bakar terendah yang akan mendukung api untuk menyebar bila bercampur dengan udara dinamakan batas nyala bawah. Jika konsentrasi bahan bakar berada di bawah dari batas nyala bawah ini maka tidak akan terjadi proses pembakaran sedangkan untuk kondisi batas nyala atas adalah kondisi dimana konsentrasi bahan bakar tertinggi yang akan mendukung api untuk menyebar bila bercampur dengan oksigen.

Hal ini disebabkan karena kapasitas panas dari campuran udara-bahan bakar yang naik namun temperatur nyala api berkurang dan konsentrasi bahan bakar yang ditambahkan tidak akan mampu untuk menyalakan gas yang ada di dekatnya dan hal tersebut akan berakibat nyala api berhenti menyebar.

Tabel 2.4 Batas mampu nyala api

	Lower flammability limit (L)			L _{C*}	Upper flammability limits (U)		U _{C*}	S _L (m/s)	Minimum ignition energy (mJ)	Minimum quenching distance (mm)
	% Vol	g/m ³	kJ/m ³		% Vol	g/m ³				
Hydrogen	4	3.6	435	0.13	75	67	2.5	3.2	0.01	0.5
Carbon Monoxide	12.5	157	1591	0.42	74	932	2.5	0.43		
Methane	5	36	1906	0.53	15	126	1.6	0.37	0.26	2
Ethane	3	41	1952	0.53	12.4	190	2.2	0.44	0.24	1.8
Propane	2.1	42	1951	0.52	9.5	210	2.4	0.42	0.25	1.8
n-Butane	1.8	48	2200	0.58	8.4	240	2.7	0.42	0.26	1.8
n-Pentane	1.4	46	2090	0.55	7.8	270	3.1	0.42	0.22	1.8
n-Hexane	1.2	47	2124	0.56	7.4	310	3.4	0.42	0.23	1.8
n-Heptane	1.05	47	2116	0.56	6.7	320	3.6	0.42	0.24	1.8
n-Octane	0.95	49	2199	0.58						
n-Nonane	0.85	49	2194	0.58						
n-Decane	0.75	48	2145	0.56	5.6	380	4.2	0.4		
Ethene	2.7	35	1654	0.41	36	700	5.5	>0.69	0.12	1.2
Propene	2.4	46	2110	0.54	11	210	2.5	0.48	0.28	
Butene-1	1.7	44	1998	0.5	9.7	270	2.9	0.48		
Acetylene	2.5	29	1410					1.7	0.02	
Methanol	6.7	103	2141	0.55	36	810	2.9	0.52	0.14	1.5
Ethanol	3.3	70	1948	0.5	19	480	2.9			
n-Propanol	2.2	60	1874	0.49	14	420	3.2	0.38		
Acetone	2.6	70	2035	0.52	13	390	2.6	0.5	1.1	
Methyl ethyl ketone	1.9	62	1974	0.52	10	350	2.7			
Diethyl ketone	1.6	63	2121	0.55						
Benzene	1.3	47	1910	0.48	7.9	300	2.9	0.45	0.22	1.8

Sumber: H.F. Coward dan G.W. Jones, 503:1952

2.5.2 Kestabilan Nyala Api (*Flame Stability*)

Dalam proses pembakaran, kestabilan nyala api memegang peranan yang sangat penting. Api dikatakan stabil jika tetap stasioner pada posisi tertentu. Kestabilan nyala api bisa terjadi apabila kecepatan gas reaktan sama dengan kecepatan rambatan api. Tingkat kestabilan nyala api selalu dipengaruhi oleh kesetimbangan antara laju aliran massa dinamik gas yang melibatkan perhitungan kekekalan massa, kekekalan momentum, dan kekekalan energi. Tingkat kestabilan nyala api sangat berhubungan dengan fenomena seperti *blowoff*. Oleh karena itu, perencanaan dalam proses pembakaran gas menjadi sangat penting.

Blowoff adalah suatu keadaan dimana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran. Kondisi seperti ini pada kenyataan di lapangan harus dihindari, karena untuk bahan bakar tertentu, kecepatan *blowoff* meningkat seiring dengan bertambahnya diameter pancarannya. Hal tersebut yang mengakibatkan sangat sulitnya untuk memadamkan api pada kebakaran di pengeboran minyak.

2.5.3 Nyala api difusi

Nyala api dalam pembakaran dapat dibagi menjadi dua yakni nyala api premiks dan nyala api difusi. Untuk nyala api premiks adalah nyala api pada saat bahan bakar dan udara bercampur sebelum terjadinya proses pembakaran. Sedangkan untuk nyala api difusi adalah nyala api ketika bahan bakar dan udara bercampur. Untuk nyala api premiks dan nyala api difusi keduanya juga dapat dibedakan menjadi dua yakni nyala api premiks laminar dan nyala api premiks turbulen serta nyala api difusi laminar dan nyala api difusi turbulen. Perbedaan menjadi laminar dan turbulen ini didasarkan kepada aliran reaktan yang masuk ke dalam ruang bakarnya.

Nyala api difusi sangat bergantung sekali kepada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar dengan udara di sekitarnya. Dalam pembakaran difusi api tidak akan menyala jika laju bahan bakar dengan oksidator yang dialirkan tidak tepat. Ketepatan dalam jumlah aliran antara bahan bakar dengan udara sebagai oksidatornya menjadi sangat penting agar dapat menciptakan nyala api difusi.

2.6 Inhibitor

Inhibitor adalah zat yang untuk menghambat atau menurunkan laju reaksi kimia, dalam hal ini reaksi kimia pembakaran. Molekul – molekul inhibitor akan terurai dan bekerja dengan mengganggu rantai reaksi kimia pembakaran, sehingga reaksi kimia pembakaran akan terhambat dan secara tidak langsung hal ini akan berpengaruh pada waktu yang dibutuhkan untuk memulai penyalaan api juga akan semakin lama. Makin tinggi tingkat penguraian molekul inhibitor dan konsentrasi inhibitor akan makin memperlambat laju reaksi pembakaran (Chakraborty et. al, 1975). Salah satu contoh inhibitor adalah CO₂.

2.7 Bahan Bakar

Bahan bakar adalah suatu materi apapun yang bisa diubah menjadi energi. Dalam setiap pembakaran baik difusi maupun premiks selalu dibutuhkan bahan bakar dimana bahan bakar menjadi sumber energi pada proses pembakaran. Ada tiga wujud dari bahan bakar yakni, bahan bakar padat, cair dan gas. Untuk bahan bakar padat contohnya adalah batu bara, untuk bahan bakar cair adalah bensin. Sedangkan untuk bahan bakar gas contohnya adalah gas alam.

Bahan bakar gas dapat diklasifikasikan atas gas alam (*natural gas*) dan gas buatan (*manufactured gas*). Gas alam sebagian besar merupakan campuran dari

senyawa hidrokarbon. Pada saat dibakar umumnya menghasilkan nyala berwarna biru dan sangat mudah terbakar. Komposisi kimia gas alam sebagian besar adalah Metana (CH_4), dan sebagian kecil dari Etana (C_2H_6), Propana (C_3H_8), Butana (C_4H_{10}), serta Pentana (C_5H_{12}). Kadang-kadang terdapat Sulfur (S) namun jumlahnya dapat diabaikan. Sedangkan untuk CO_2 dan N_2 merupakan komponen tak terbakar yang sering terdapat dalam gas alam dalam jumlah sangat kecil. Untuk gas buatan diperoleh dari proses-proses gasifikasi kayu, batu bara, dan minyak. Jenis bahan bakar gas buatan meliputi LPG, water gas, wood gas, dan sebagainya.

Bahan bakar gas memiliki keuntungan dibanding jenis bahan bakar yang lain, yakni dapat terbakar tanpa adanya asap dan jelaga. Selain itu, proses pembakarannya bisa mendekati sempurna dengan persen kelebihan udara sangat kecil. Namun, bahan bakar gas juga memiliki kelemahan, yakni penyimpanannya yang sangat sulit dan memerlukan ruang yang besar bila dibandingkan dengan bahan bakar yang lain.

2.8 Metana

Metana adalah hidrokarbon paling sederhana yang berbentuk gas dengan rumus kimia CH_4 . Metana murni tidak berbau. Di dalam dunia industri untuk memudahkan dalam mendeteksi jika ada kebocoran gas ini diberi bebauan. Rumus reaksi kimia dari metana dapat ditulis sebagai berikut:



Adapun sifat CH_4 adalah sebagai berikut:

- Berat molekul : 16.04 gram/mol
- Densitas : 7.2×10^{-4} gram/ml (pada 1 atm dan 0°C)
- Titik didih : -161.4°C
- Titik leleh : -182.6°C
- Nilai kalor CH_4 : 13.279.302 Kkal/kg (Fessenden, 1989)
- Nilai kalor biogas : 6.720 – 9660 Kkal/kg

2.9 Karbondioksida

Suatu senyawa yang berbentuk gas pada suhu kamar (25°C), tak menyala dan tak berbau serta memiliki rasa yang sedikit masam. Karbondioksida memiliki rumus kimia CO_2 . Gas CO_2 sangat berbahaya apabila dihirup secara terus-menerus karena dapat mengakibatkan kematian. Namun, selain mengandung bahaya, gas CO_2 memiliki

beberapa manfaat diantaranya adalah sebagai bahan untuk memadamkan api pada pemadam kebakaran, karena gas CO_2 yang disemburkan melalui selang akan segera menyelimuti api sehingga api tidak akan kontak langsung dengan O_2 dan api akan berhenti. Gas CO_2 juga termasuk gas inert, yang artinya gas CO_2 sukar bereaksi dengan gas yang lain pada kondisi tekanan dan temperatur normal. Berikut sifat dari gas CO_2 :

- Titik didih : -8.5°C
- Titik leleh : -55.6°C
- Berat molekul : 44.01 gram/mol
- Berat jenis relatif : 1.98×10^{-3}
- Berat jenis gas (@101,3 KPa & 15°C) : 1.87 kg/m^3

2.10 Nitrogen

79% volume udara tersusun atas gas Nitrogen. Unsur Nitrogen merupakan unsur utama dalam keadaan bebas sebagai gas N_2 di udara. Gas nitrogen juga termasuk kedalam gas yang inert (tidak reaktif). Oleh karena sifatnya yang kurang reaktif, N_2 digunakan sebagai gas inert untuk suatu proses atau sistem yang terganggu oleh oksigen. Berikut merupakan sifat dari N_2 :

- Massa jenis pada keadaan standart : 1.251 g/L
- Titik leleh : -210°C
- Titik didih : -195.8°C
- Berat molekul : 28.02 gram/mol
- Kalor peleburan : 0.72 KJ/mol
- Kalor penguapan : 5.56 KJ/mol
- Kapasitas kalor : 29.124 J/mol.K

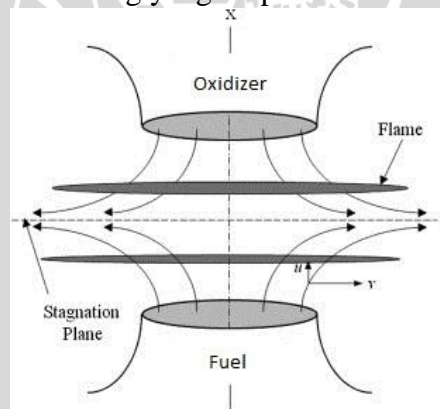
2.11 Oksigen

Oksigen adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak mempunyai rasa. Udara mengandung 21% Oksigen. Oksigen memiliki rumus kimia O_2 . O_2 membantu pembakaran dan menopang kehidupan. O_2 dengan konsentrasi tinggi akan mengaktifkan pembakaran, menyebabkan suhu naik atau bahkan meledak. O_2 digunakan untuk menopang kehidupan, memperbesar pembakaran, pembuatan baja dan pada saat dicampur dengan bahan bakar, digunakan untuk pengelasan, pemotongan, pemanasan dan penyepuhan. Berikut sifat dari O_2 :

- Titik didih : -183°C
- Titik beku : -218.4°C
- Berat jenis relatif : 1.105
- Berat molekul : 16
- Densitas : $1.43 \times 10^{-3} \text{ gr/ml}$
- Suhu Kritis : -118°C
- Berat jenis gas (@101,3 KPa & 15°C) : $1,35 \text{ kg/m}^3$

2.12 Counterflow Diffusion Burner

Menurut Tsuji (1982) *counterflow diffusion burner* dapat dibedakan menjadi 2 yakni) api difusi *counterflow* antara dua jet gas yang berlawanan dan api difusi *counterflow* yang didirikan di daerah stagnasi dari burner berpori yang direndam dalam aliran oxidizer seragam. Sedangkan menurut api yang dapat dibentuk dibedakan menjadi empat yaitu api difusi yang terbentuk antara dua jet yang berlawanan, api difusi yang terbentuk dari dua buah pembakar matriks yang berlawanan dengan menyemburkan reaktan, api difusi yang didirikan di daerah stagnasi dengan bentuk burner bulat atau semi bulat yang berpori, dan api difusi yang terbentuk di daerah stagnasi dengan bentuk burner tabung yang berpori.



Gambar 2.4: Skema *Counterflow Diffusion Flame*
Sumber : Soo Kim Jeong, dkk. 5717-5728:2011

Keuntungan dengan menggunakan *counterflow diffusion burner* menurut Tsuji (1982) adalah *counterflow diffusion burner* merupakan metode yang cocok digunakan untuk mempelajari secara rinci struktur api difusi, memperkirakan laju reaksi keseluruhan untuk kombinasi tiap-tiap bahan bakar dan oksidator, dan dapat mengetahui efektivitas dari inhibitor dalam pembakaran. Hal ini juga diperkuat dari Li, (2002), dan Sasongko (2011) bahwa dengan menggunakan *counterflow diffusion burner* adalah merupakan salah satu cara untuk mempelajari struktur api yang dipengaruhi oleh jenis

kandungan bahan bakar, massa alir (AFR) bahan bakar maupun karakteristik reaktan bahan bakar dan oksidator

Pada penelitian ini menggunakan jenis *Counterflow diffusion flame*. Bahan bakar dan oksidator dialirkan bersama-sama secara berlawanan arah. Bahan bakar yang terdiri atas CH_4 dan CO_2 dialirkan melalui nosel bagian atas sedangkan oksidator yang dalam terdiri atas O_2 dan N_2 dialirkan melalui nosel bagian bawah sehingga api akan terbentuk pada bagian tengah nosel.



Gambar 2.5: Nyala api pada *counterflow burner*
Sumber: Ukisu Yuji, Kitajima Akio, Hatanaka Takeshi, Takeuchi Masao:2004

2.13 Hipotesis

Ada tiga buah hipotesis yang digunakan dalam penelitian kali ini, diantaranya ada hipotesis untuk lebar api, kondisi *extinction* (kondisi api padam) dan warna api.

Hipotesis yang digunakan untuk mengukur lebar api adalah bahwa pada pembakaran difusi $\text{CH}_4\text{-CO}_2$, jika semakin besar massa alir reaktan yang dimasukkan ke dalam ruang bakar maka menyebabkan api yang terbentuk semakin lebar. Hal ini disebabkan karena pada proses pembakaran api membutuhkan asupan bahan bakar dan oksigen. Jika asupan bahan bakar ditambah maka api yang terbentuk juga semakin lebar seiring dengan penambahan oksigen.

Hipotesis selanjutnya adalah pada kondisi *extinction* (api padam), pada penelitian tentang pembakaran difusi $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ ini, kondisi *extinction* (api padam) terjadi jika jumlah asupan oksigen semakin berkurang. Hal ini disebabkan karena pada proses pembakaran membutuhkan oksigen sebagai oksidatornya, hal ini yang menyebabkan api dapat menyala dan jika hal tersebut dikurangi jumlahnya maka yang terjadi adalah api padam.

Hipotesis yang terakhir adalah warna api yang ditimbulkan selama proses pembakaran $\text{CH}_4\text{-CO}_2$, Api memiliki warna kuning dan biru. Warna kuning menggambarkan jika pada proses pembakaran wilayah tersebut kaya bahan bakar, sedangkan warna biru menggambarkan wilayah tersebut kaya oksigen.



BAB III

METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental (*experimental research*), yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung pada objek yang diteliti untuk mencari data dalam suatu kejadian melalui proses eksperimen agar dapat mengetahui pengaruh massa alir reaktan terhadap karakteristik api difusi pada pembakaran $\text{CH}_4\text{-CO}_2$.

3.1 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel bebas

Variabel yang besarnya bebas ditentukan oleh peneliti dan tidak dipengaruhi oleh variabel yang lain. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah jumlah massa alir reaktan. Dalam memvariasikan massa alir reaktan dipergunakan *flowmeter*. *Flowmeter* ini nantinya akan mengatur debit aliran yang masuk ke dalam ruang bakar. Variasi debit yang dipergunakan dalam penelitian adalah 4 L/M, 6 L/M, 8L/M, 10 L/M, 12 L/M, dan 14 L/M.

2. Variabel terikat

Variabel yang besarnya tergantung dari nilai variabel bebas yang telah ditentukan. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah karakteristik dari api yang meliputi warna api, lebar api, dan konsentrasi minimum O_2 yang diperlukan sebelum api difusi padam atau *extinction*.

3. Variabel terkontrol

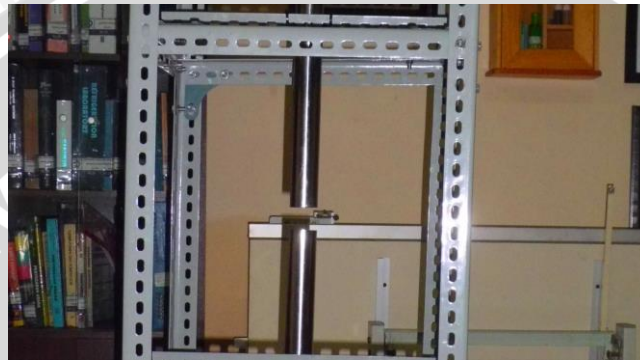
Variabel yang besarnya dijaga tetap selama pengujian, dalam penelitian variabel terkontrol meliputi ukuran pipa *counterflow burner*, untuk ukuran panjang pipa bagian dalam adalah 75 cm dengan diameter 1 inch dan 40 cm dengan diameter 1.5 inch untuk pipa bagian luar, jarak antar pipa sepanjang 20 mm dan tekanan gas masuk ruang bakar adalah 0.5 bar dan konsentrasi CO_2 yang dipergunakan adalah 0%, 20% dan 40%.

3.2 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Ruang bakar model *Counterflow Burner*

Ruang bakar model *Counterflow burner* ini digunakan untuk proses terjadinya pembakaran yang terbuat dari bahan pipa *stainless* dengan ukuran panjang pipa adalah 75 cm untuk pipa bagian dalam dengan diameter 1 inch dan 40 cm dengan diameter 1.5 inch untuk pipa bagian luar yang ditempatkan pada *frame* yang terbuat dari besi.



Gambar 3.1 Ruang bakar model *Counterflow burner*

2. Pemantik

Digunakan sebagai pemantik pada campuran CH_4 dan udara di dalam ruang bakar sehingga dapat terjadi nyala api.



Gambar 3.2 Pemantik

3. Kamera

Digunakan untuk mengambil gambar nyala api hasil pembakaran yang terjadi sehingga dapat digunakan untuk analisa visual. Dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Sensor : Sensor CMOS 12.3MP, DX
- Merk : Nikon D5000
- *Movie resolution* : HD movie, 1280x720 / 24fps



Gambar 3.3 Kamera

4. Tabung Gas Metana (CH_4)

Tabung ini digunakan sebagai tempat penyimpanan bahan bakar CH_4 (Metana).



Gambar 3.4 Tabung gas metana

5. Selang

Digunakan untuk mengalirkan fluida dari tabung gas menuju ruang bakar.



Gambar 3.5 Selang

6. *Flowmeter*

Digunakan untuk mengatur debit gas yang akan memasuki *counterflow burner*. *Flowmeter* yang digunakan merk ZYIA. Skala yang tercantum dalam *flowmeter* yang digunakan selama penelitian adalah: 1-5 L/M, 0.5-8 L/M.



Gambar 3.6 *Flowmeter*

7. *Tabung gas*

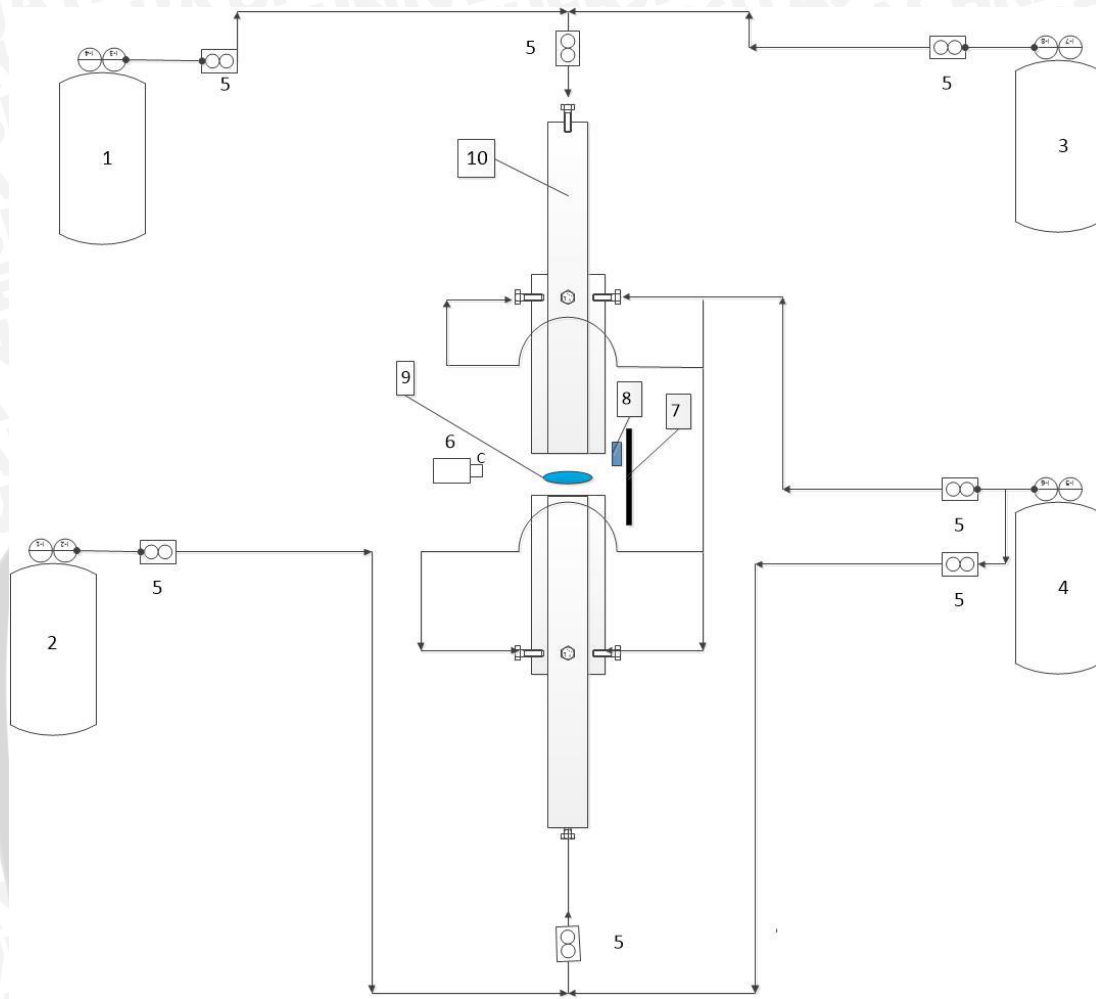
Digunakan untuk menampung gas yang akan digunakan untuk pengujian. Terdapat tiga buah tabung gas dalam pengujian, yakni tabung gas O₂, CO₂, dan N₂.



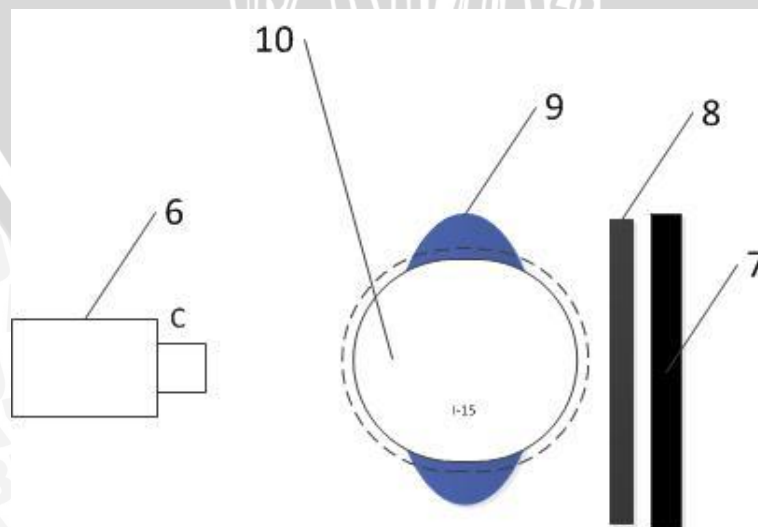
Gambar 3.7 *Tabung gas*

3.3 Skema Instalasi Penelitian

Instalasi alat yang digunakan pada penelitian ini dapat dilihat pada skema berikut:



Gambar 3.8 Skema instalasi alat penelitian (tampak samping)



Gambar 3.9 Skema instalasi alat penelitian (tampak atas)

Keterangan gambar:

- 1 Tabung gas O₂
- 2 Tabung gas CH₄
- 3 Tabung gas N₂
- 4 Tabung gas CO₂
- 5 *Flowmeter*
- 6 Kamera
- 7 Kertas karton hitam sebagai *background* foto
- 8 Penggaris
- 9 Api difusi
- 10 Pipa *counterflow burner*

Gas mengalir dari 4 buah tabung yang ada dengan tekanan gas keluar sebesar 0.5 bar. Setelah gas keluar dari tabung, gas dialirkan melalui selang menuju *flowmeter* dimana di *flowmeter* nanti akan diatur debit gas yang akan masuk ke dalam *counterflow burner*. Aliran gas dari atas adalah berupa CH₄ dan CO₂ sedangkan aliran gas dari bawah adalah berupa O₂ dan N₂. Sedangkan, aliran yang masuk dan mengelilingi pipa adalah N₂. Setelah semua gas mengalir sesuai dengan variabel bebas, api dinyalakan dengan menggunakan pemantik. Api akan terjadi pada daerah di tengah-tengah pipa. Setelah data diambil dengan menggunakan kamera, tutup secara perlahan aliran gas pada *flowmeter* dan pada tabung sebelum melakukan pengambilan data selanjutnya.

3.4 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan pada bulan September 2013 sampai dengan November 2013, bertempat di Laboratorium Motor Bakar Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang tahun 2013.

3.5 Metode Pengambilan Data

Langkah - langkah yang dilakukan untuk pengambilan data pada penelitian tentang pengaruh massa alir reaktan adalah sebagai berikut:

1. Siapkan semua peralatan yang diperlukan dan disusun sesuai dengan gambar instalasi yang telah direncanakan;
2. Pastikan semua katup pada tabung gas dalam keadaan tertutup;
3. Atur jarak antar pipa *counterflow* pada jarak 20 mm;

4. Pasang background warna hitam dengan penggaris ikut ditempelkan ke karton pada posisi di belakang pipa *counterflow burner* dengan tujuan agar api yang ditimbulkan nanti dapat langsung diukur panjangnya;
5. Atur posisi dudukan kamera pada jarak yang paling dekat dengan pusat nyala api;
6. Buka semua katup gas yang ada dan diatur sampai memiliki tekanan 0.5 bar;
7. Atur semua debit gas yang akan masuk ke dalam *Counterflow burner* dengan melihat dari *flowmeter* yang telah dipasang sebelumnya. Atur debit gas sesuai dengan variabel bebas yang sudah ditentukan sebelumnya;
8. Pemantik api dinyalakan;
9. Setelah api muncul, kamera mulai untuk mengambil gambar nyala api yang timbul dengan syarat ruangan disekitarnya dibuat gelap agar gambar api yang ditangkap oleh kamera dapat dilihat dengan jelas;
10. Untuk pengambilan data *extinction*, kurangi secara perlahan gas O₂ dengan diiringi penambahan N₂ secara perlahan dan tunggu sampai api memperoleh efek dari perubahan tersebut, jika api sudah ada perubahan dilanjutkan dengan terus mengurangi debit O₂ secara perlahan dan teratur sampai api padam;
11. Catat data yang ditunjukkan oleh *flowmeter* O₂ dan N₂ pada saat posisi api padam;
12. Tutup secara perlahan semua aliran gas pada *flowmeter*;
13. Tutup secara perlahan semua katup-katup pada tabung gas;
14. Ulangi langkah-langkah seperti diatas (1 sampai 13) untuk tiap-tiap variasi massa alir gas yang masuk ke dalam ruang bakar.

3.6 Metode Pengolahan Data

Hasil foto yang ada, dimasukkan ke dalam *software* Corel Draw untuk dibentuk pada ukuran 10 x 20 cm. Setelah dibentuk ke dalam ukuran yang sama, foto disusun berjajar mulai dari yang memiliki nyala terang sampai padam pada tiap-tiap massa alir dengan menggunakan *software* Microsoft Word dengan tujuan untuk melihat perbedaan warna api yang dihasilkan akibat perbedaan massa alir bahan bakar.

Data tentang lebar api, foto yang telah dibentuk dengan menggunakan *software* Corel Draw selanjutnya dilakukan pengukuran lebar api dengan cara menemukan ujung api sebelah kiri dengan titik "0" pada penggaris yang telah ditempel pada *background*

sebelumnya. Satuan dari data tersebut adalah cm. Setelah data didapat, data dikumpulkan menjadi satu ke dalam tabel. Selanjutnya data diolah dengan menggunakan *software* Microsoft Excel untuk dibuat grafik untuk melihat perbedaan yang dihasilkan akibat perbedaan massa alir bahan bakar.

Data tentang data *extinction* (api padam), sebelum dimasukkan ke dalam tabel untuk dibuat grafik, data yang didapat selama penelitian terlebih dahulu dikonversikan menjadi massa alir. Dengan menggunakan rumus:

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (3-1)$$

Dimana:

\dot{m} = Massa alir gas [kg/s]

Q = Debit gas [m³/s]

ρ = Kerapatan gas [kg/m³]

Untuk kerapatan gas dari tiap-tiap gas dipergunakan data pada kondisi 25°C, tekanan 1 atm. Temperatur selama penelitian mulai dari 24°C - 26°C, karena perbedaan yang dihasilkan sangat kecil maka diabaikan.

$\rho_{\text{Nitrogen}} = 1.1531 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{\text{Metana}} = 0.6604 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{\text{Oksigen}} = 1.31725 \text{ kg/m}^3$

$\rho_{\text{Karbondioksida}} = 1.6658 \text{ kg/m}^3$

(Sumber : Yunus A. Cengel and John M. Cimbula “*Fluid Mechanics fundamental and Application*“ Table A-10 Page 895 – 896)

Setelah didapat data mengenai massa alir, maka dilanjutkan menghitung Y_{O_2} dengan menggunakan rumus:

$$Y_{O_2} = \frac{\dot{O}_2}{\dot{O}_2 + \dot{N}_2} \quad (3-2)$$

Dimana:

Y_{O_2} = Perbandingan massa alir O₂ dengan campuran gas pada oksidator

\dot{O}_2 = Massa alir dari O₂ [kg/s]

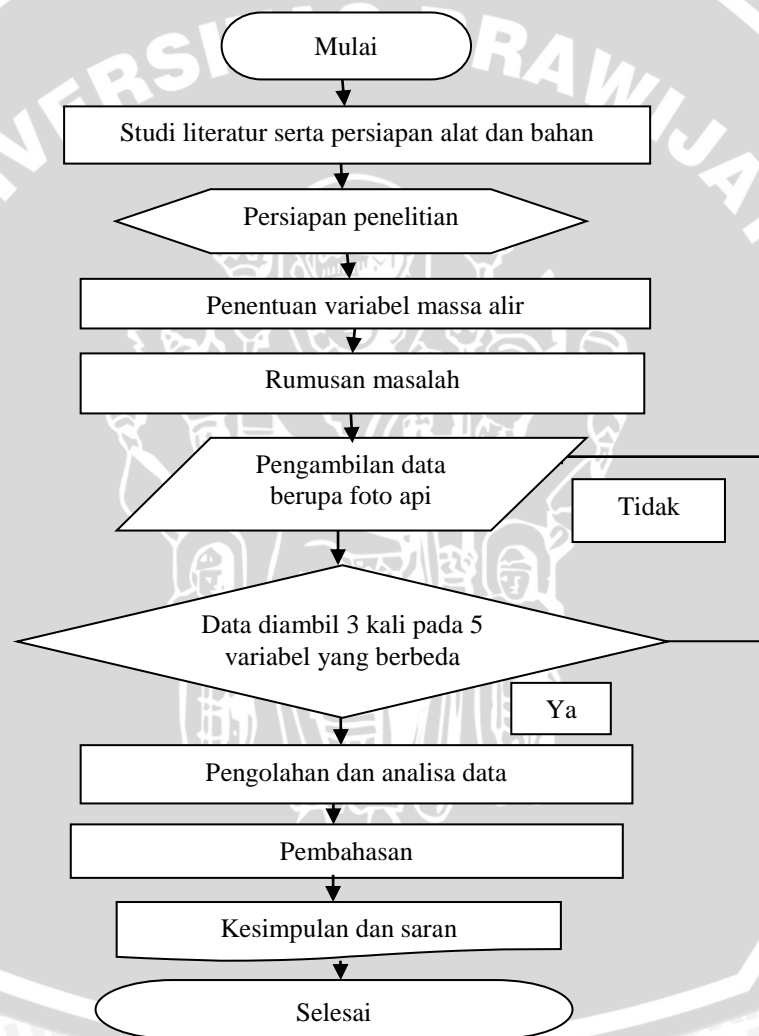
\dot{N}_2 = Massa alir dari N₂ [kg/s]

(Sumber : Hiroshi Tsuji “*Journal of counterflow diffusion flames*” 1982:17)

Y_{O_2} merupakan hasil dari perhitungan massa alir O_2 dengan campuran gas pada oksidator, dalam hal ini campuran gas oksidator adalah O_2 dan N_2 . Setelah didapat data Y_{O_2} , data dikumpulkan menjadi satu ke dalam tabel. Selanjutnya data diolah dengan menggunakan *software* Microsoft Excel untuk dibuat grafik untuk melihat perbedaan yang dihasilkan akibat perbedaan massa alir bahan bakar.

3.7 Diagram Alir Penelitian

Alur pemikiran yang dilakukan dalam penelitian kali ini dapat dilihat pada **Gambar 3.10** di bawah ini.



Gambar 3.10 Diagram alir penelitian

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisa Data

4.1.1 Data Lebar Api

Semua data debit yang didapat selama penelitian dikonversikan menjadi massa alir dengan menggunakan persamaan 4-1, sehingga satuan yang semula L/M telah diubah ke dalam kg/s. Oleh karena itu, nilai dari massa alir reaktan yang ada pada tiap-tiap tabel nantinya berbeda pada tiap konsentrasi CO₂. Sedangkan untuk mencari nilai dari Y_{O₂} diselesaikan dengan menggunakan persamaan 4-1 dan 4-2.

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (4-1)$$

Dimana:

\dot{m} = Massa alir gas [kg/s]

Q = Debit gas [m³/s]

ρ = Kerapatan gas [kg/m³]

Setelah didapat data mengenai massa alir, maka dilanjutkan menghitung Y_{O₂} dengan menggunakan rumus:

$$Y_{O_2} = \frac{\dot{O}_2}{\dot{O}_2 + \dot{N}_2} \quad (4-2)$$

Dimana:

Y_{O₂} = Perbandingan massa alir O₂ dengan campuran gas pada oksidator

\dot{O}_2 = Massa alir dari O₂ [kg/s]

\dot{N}_2 = Massa alir dari N₂ [kg/s]

(Sumber : Hiroshi Tsuji “*Journal of counterflow diffusion flames*” 1982:17)

Data lebar api ini didapat Y_{O₂} sebesar 0.363 dengan konsentrasi CO₂ sebesar 0%, yang berarti bahwa data lebar api diamati pada debit O₂ sebesar 1.5 L/M dan debit N₂ sebesar 3 L/M. Y_{O₂} menggambarkan perbandingan massa alir O₂ dengan campuran gas pada oksidator, dimana campuran gas oksidator yang digunakan adalah O₂ dan N₂

Tabel 4.1 merupakan data lebar api biru, sedangkan **Tabel 4.2** merupakan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan yang digunakan adalah dalam cm.

Tabel 4.1 Lebar Api Biru

Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
4.4	6.6	8.8	11	13.2	15.4
4.18	4.25	4.21	4.4	4.4	4.39

Tabel 4.2 Lebar Api Kuning

Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
4.4	6.6	8.8	11	13.2	15.4
4.29	4.44	4.36	4.56	4.43	4.42

Tabel 4.3 menunjukkan data lebar api biru pada kondisi Y_{O_2} sebesar 0.363 dengan konsentrasi CO_2 sebesar 20 %, sedangkan **Tabel 4.4** menunjukkan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan yang digunakan adalah dalam cm.

Tabel 4.3 Lebar Api Biru

Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
5.74	8.61	11.5	14.4	17.2	20.1
4.3	4.35	4.49	4.38	4.39	4.18

Tabel 4.4 Lebar Api Kuning

Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
5.74	8.61	11.5	14.4	17.2	20.1
4.41	4.37	4.53	4.4	4.5	4.1

Tabel 4.5 di bawah menunjukkan data lebar api biru pada kondisi Y_{O_2} sebesar 0.363 dengan konsentrasi CO_2 sebesar 40 %, sedangkan **Tabel 4.6** menunjukkan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan yang digunakan adalah dalam cm.

Tabel 4.5 Lebar Api Biru

Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
7.1	10.6	14.2	17.7	21.3	24.8
4.42	4.84	4.4	4.32	4.26	4.23

Tabel 4.6 Lebar Api Kuning

Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
7.1	10.6	14.2	17.7	21.3	24.8
4.25	4.66	4.27	4.13	3.92	3.95

4.1.2 Data Extinction (api padam)

Pengolahan data untuk data *extinction*, tetap menggunakan persamaan 4-1 dan 4-2. Data sebelum diolah masih memiliki satuan L/M setelah dikonversikan dengan menggunakan persamaan 4-1 dan 4-2 data menjadi tidak bersatuan.

- Contoh Perhitungan

$$\text{Debit } O_2 = 0.7 \text{ L/M}$$

$$0.7 \text{ L/M} = 1.167 \times 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$\dot{m} = Q \cdot \rho_{\text{oksigen}}$$

$$= 1.167 \times 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s}] \times 1.31725 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$= 1.54 \times 10^{-5} \text{ [kg/s]}$$

$$\text{Debit } N_2 = 3.8 \text{ L/M}$$

$$3.8 \text{ L/M} = 6.33 \times 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s]}$$

$$\dot{m} = Q \cdot \rho_{\text{nitrogen}}$$

$$= 6.33 \times 10^{-5} \text{ [m}^3/\text{s}] \times 1.1531 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$= 7.3 \times 10^{-5} \text{ [kg/s]}$$

$$Y_{O_2} = \frac{\dot{O}_2}{\dot{O}_2 + \dot{N}_2}$$

$$= \frac{1.54 \times 10^{-5}}{1.54 \times 10^{-5} + 7.3 \times 10^{-5}} = 0.174$$

Nilai dari O_2 diambil pada saat penelitian, sedangkan untuk nilai dari N_2 saat penelitian berkisar dari debit 3.65 – 3.85 L/M. Data *extinction* didapat setelah mengurangi debit dari O_2 secara perlahan diikuti dengan penambahan debit dari N_2 .

- Untuk debit O_2 0.85 L/M ; debit N_2 3.65 L/M
- Untuk debit O_2 0.8 L/M ; debit N_2 3.7 L/M
- Untuk debit O_2 0.75 L/M ; debit N_2 3.75 L/M
- Untuk debit O_2 0.7 L/M ; debit N_2 3.8 L/M

Tabel 4.7 sampai **Tabel 4.9** menunjukkan data debit O_2 sesaat sebelum api padam dengan satuan L/M, sedangkan **Tabel 4.10** sampai **Tabel 4.12** menunjukkan data Y_{O_2} , data Y_{O_2} didapat dari debit O_2 dengan kondisi N_2 sesuai tercantum di atas yang kemudian diolah dengan menggunakan persamaan 4-1 dan 4-2.

Tabel 4.7 Data Debit O₂ Saat *Extinction* pada Konsentrasi CO₂ = 0 %

Konsentrasi CO ₂	Massa Alir Bahan Bakar (10 ⁻⁵) [kg/s]					
	4.4	6.6	8.8	11	13.2	15.4
0 %	0.7	0.7	0.7	0.75	0.75	0.8

Tabel 4.8 Data Debit O₂ Saat *Extinction* pada Konsentrasi CO₂ = 20 %

Konsentrasi CO ₂	Massa Alir Bahan Bakar (10 ⁻⁵) [kg/s]					
	5.74	8.61	11.5	14.4	17.2	20.1
20 %	0.7	0.75	0.75	0.8	0.8	0.85

Tabel 4.9 Data Debit O₂ Saat *Extinction* pada Konsentrasi CO₂ = 40 %

Konsentrasi CO ₂	Massa Alir Bahan Bakar (10 ⁻⁵) [kg/s]					
	7.1	10.6	14.2	17.7	21.3	24.8
40 %	0.8	0.8	0.85	0.85	0.85	0.85

Tabel 4.10 Data Y_{O₂} pada Konsentrasi CO₂ = 0%

Konsentrasi CO ₂	Massa Alir Bahan Bakar (10 ⁻⁵) [kg/s]					
	4.4	6.6	8.8	11	13.2	15.4
0 %	0.174	0.174	0.174	0.186	0.186	0.197

Tabel 4.11 Data Y_{O₂} pada Konsentrasi CO₂ = 20%

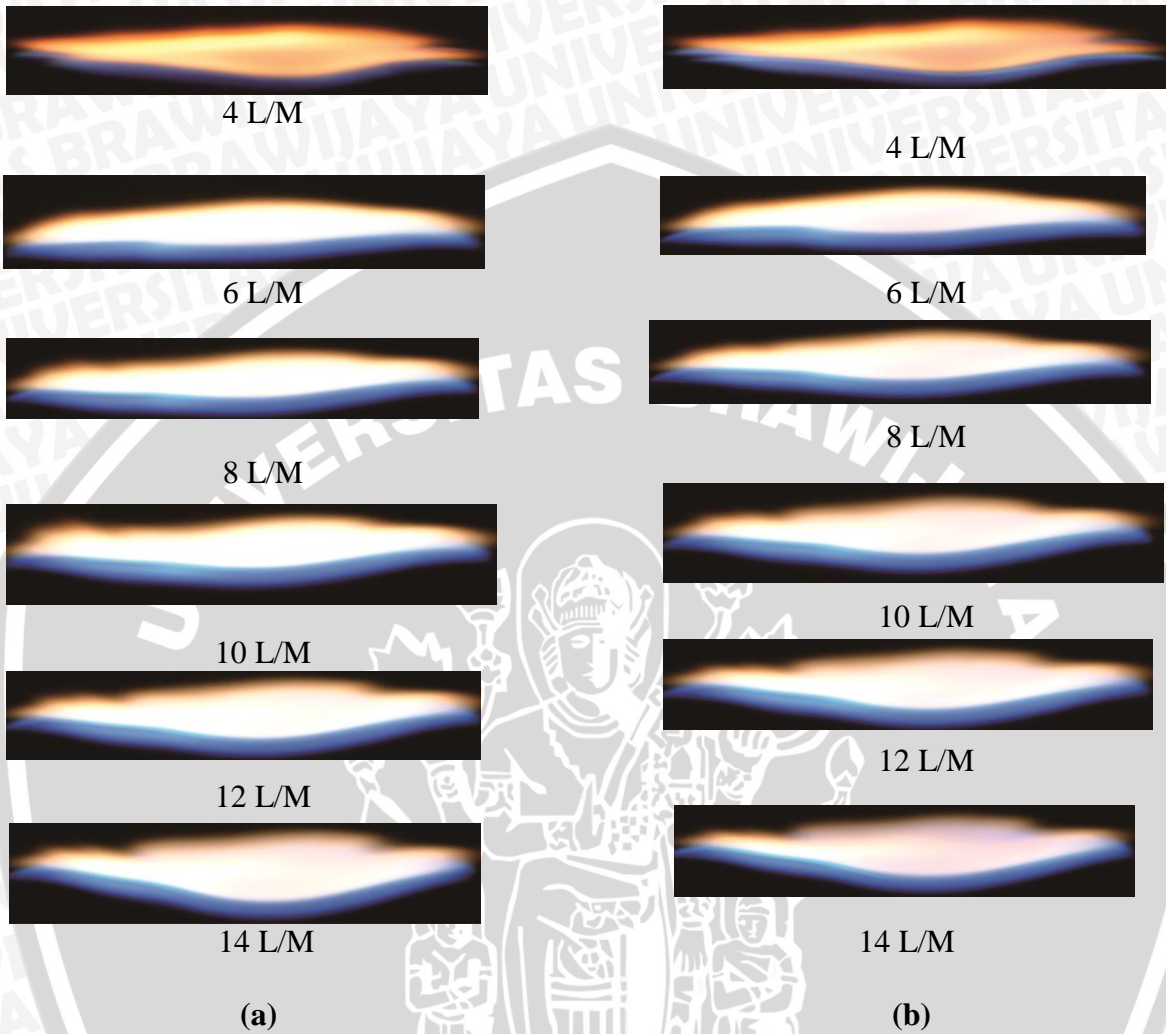
Konsentrasi CO ₂	Massa Alir Bahan Bakar (10 ⁻⁵) [kg/s]					
	5.74	8.61	11.5	14.4	17.2	20.1
20 %	0.174	0.186	0.186	0.197	0.197	0.210

Tabel 4.12 Data Y_{O₂} pada Konsentrasi CO₂ = 40%

Konsentrasi CO ₂	Massa Alir Bahan Bakar (10 ⁻⁵) [kg/s]					
	7.1	10.6	14.2	17.7	21.3	24.8
40 %	0.197	0.197	0.210	0.210	0.210	0.210

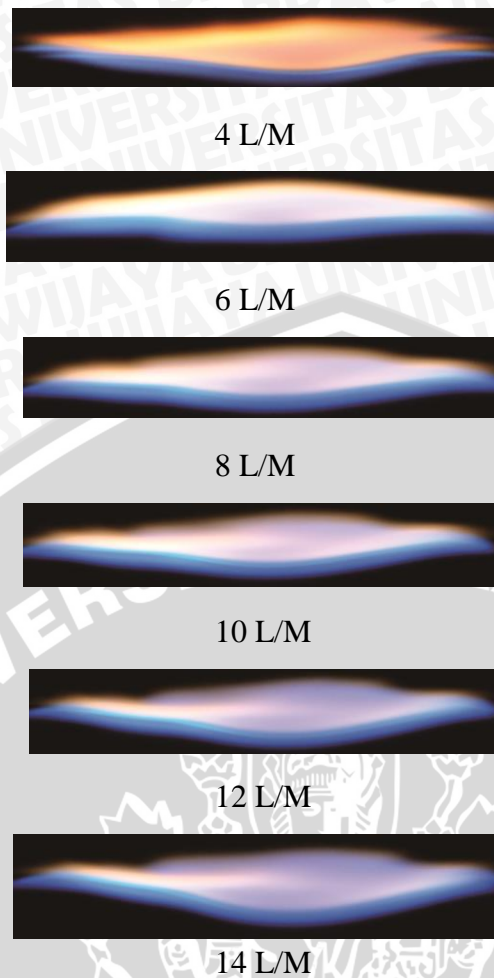
4.2 Hasil dan Pembahasan

4.2.1 Warna Api



Gambar 4.1 (a) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.363$ konsentrasi $CO_2 = 0\%$

Gambar 4.1 (b) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.363$ konsentrasi $CO_2 = 20\%$



Gambar 4.1 (c) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.363$ konsentrasi $CO_2 = 40\%$

Gambar 4.1 (a), (b), dan (c) menunjukkan warna api *counterflow* pada tiga konsentrasi CO_2 dalam bahan bakar yang berbeda-beda yaitu 0%, 20%, 40%. Ketiga gambar diatas diambil pada kondisi Y_{O_2} sebesar 0.363. Dari gambar tersebut terlihat bahwa dengan semakin meningkatnya massa alir bahan bakar yang diikuti dengan penambahan konsentrasi CO_2 menyebabkan api semakin gelap. Pada **Gambar 4.1 (a)**, **Gambar 4.1 (b)**, dan **Gambar 4.1 (c)** terlihat juga bahwa api semakin turun, hal ini disebabkan karena pada saat penelitian massa alir oksigen dijaga tetap kondisinya untuk semua beda konsentrasi CO_2 yakni pada $Y_{O_2} = 0.363$.

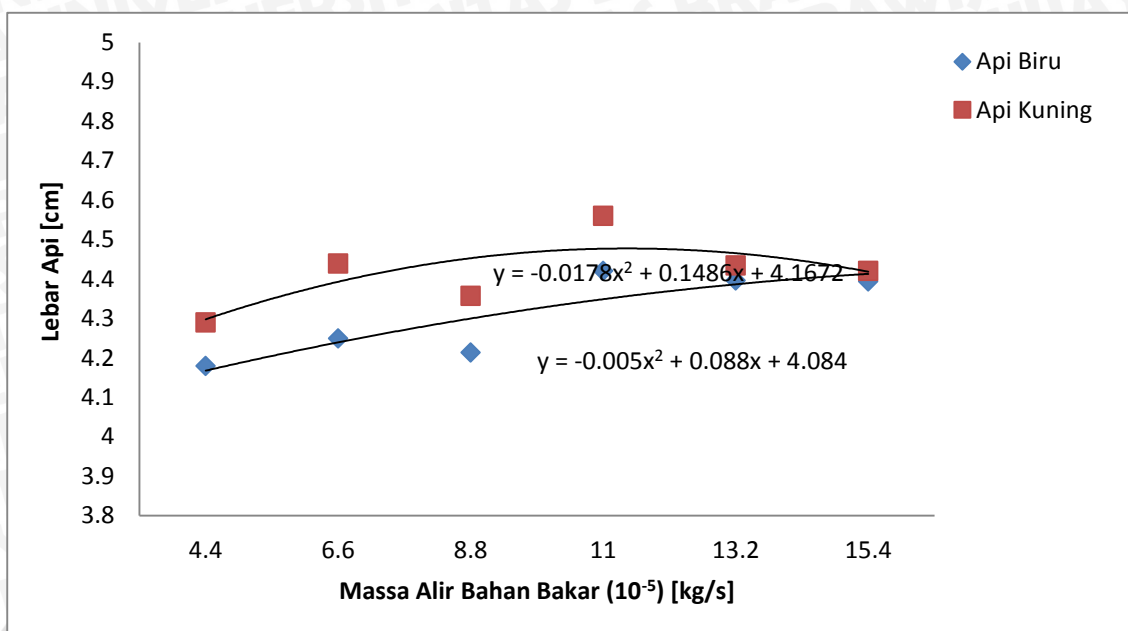
Pada **Gambar 4.1 (a)** dengan penambahan massa alir terlihat api memiliki tingkat kecerahan (*Luminosity*) yang baik sehingga terlihat nampak terang. Menurut (June Sung Park, dkk :2006, 2) bahwa panjang api akan bertambah dan akan berakibat pada semakin tingginya tingkat kecerahan api secara keseluruhan. Dapat dilihat pada **Gambar 4.1 (a)** bahwa api yang terbentuk memiliki dua lapisan. Lapisan yang paling atas merupakan lapisan dengan warna kuning sedangkan lapisan paling bawah adalah lapisan dengan warna biru. Warna yang menyala paling terang dihasilkan oleh warna

kuning dari api. Hal ini terjadi karena semakin bertambahnya massa alir dari bahan bakar, maka bahan bakar yang keluar dari pipa *counterflow burner* ada yang tidak ikut terbakar bersama oksigen sehingga menyebabkan api terlihat berwarna kuning. Letak api biru berada di bagian bawah api kuning, yang artinya bahwa bahan bakar ikut terbakar bersamaan dengan oksigen.

Gambar 4.1 (b) menunjukkan keadaan api pada saat konsentrasi CO_2 sebesar 20%. Terlihat bahwa api sedikit lebih gelap daripada tanpa menggunakan CO_2 . Hal ini disebabkan karena konsentrasi O_2 dalam proses pembakaran berkurang karena adanya penambahan massa alir bahan bakar sehingga api terlihat lebih gelap jika dibandingkan dengan **Gambar 4.1 (a)**. Lebar api yang dihasilkan dari pembakaran dengan CO_2 sebesar 20% adalah semakin pendek dapat dilihat dari warna kuning yang dihasilkan pada api adalah semakin pendek jika dibandingkan dengan **Gambar 4.1 (a)** hal ini juga disebabkan karena adanya CO_2 yang ikut selama proses pembakaran.

Gambar 4.1 (c) pada konsentrasi CO_2 sebesar 40% terlihat bahwa api memiliki tingkat kecerahan (*Luminosity*) yang buruk sehingga api terlihat nampak gelap. Pada konsentrasi 40% ini perbedaan warna yang dihasilkan terlihat sangat signifikan jika dibandingkan dengan tanpa menggunakan CO_2 . Menurut (M. Bundy, dkk :2003, 4) bahwa tingkat kecerahan dari api semakin berkurang sampai mendekati kondisi *extinction* dan api memiliki warna biru. Seiring dengan penambahan massa alir bahan bakar bisa terlihat juga bahwa api yang berwarna kuning juga semakin tipis dan semakin lebih pendek sehingga api berwarna biru terlihat lebih dominan.

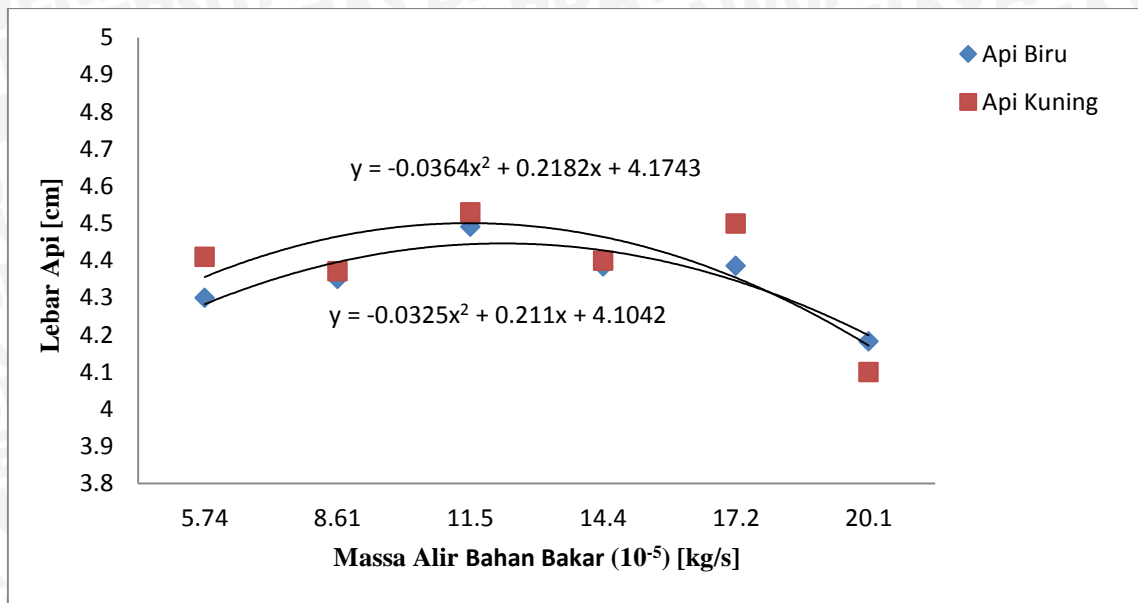
2.2 Lebar Api



Gambar 4.2 Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Lebar Api pada Konsentrasi $CO_2 = 0\%$

Kondisi $Y_{O_2} = 0.363$ pada **Gambar 4.2** di atas menunjukkan grafik pengaruh massa alir terhadap lebar api pada konsentrasi CO_2 sebesar 0 %. Dalam grafik juga terdapat 2 buah parameter yang diuji yakni lebar api biru dan api kuning karena pada penelitian kali ini terdapat 2 buah warna api yang dihasilkan dari proses pembakaran CH_4 yakni warna api biru dan api kuning. Api biru terjadi karena pada wilayah tersebut masih kaya akan O_2 , sedangkan api kuning terjadi karena pada wilayah tersebut kaya akan bahan bakar, sehingga banyak bahan bakar yang belum terbakar sempurna. Pada grafik di **Gambar 4.2** terlihat kecenderungan dari ke dua warna api tersebut semakin meningkat seiring dengan penambahan massa alir bahan bakar.

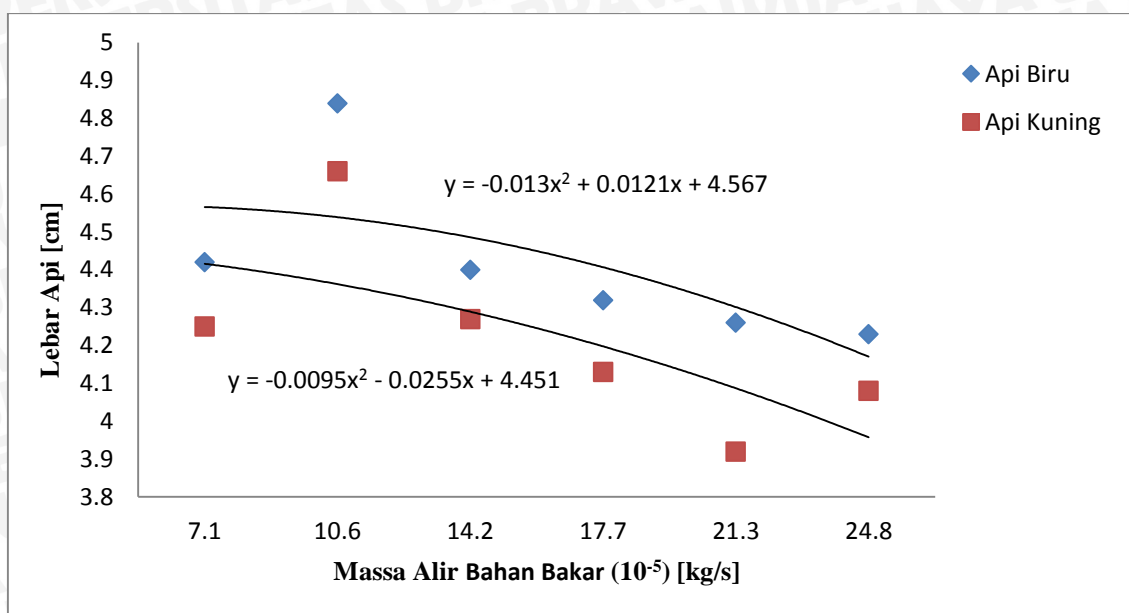
Menurut (Narayanan, dkk : 2010, 2) bahwa seiring dengan penambahan massa alir maka mengakibatkan api semakin panjang. Lebar api semakin meningkat dikarenakan adanya penambahan massa alir bahan bakar yang menyebabkan daerah reaksi dari api juga akan semakin luas. Daerah reaksi yang semakin luas diakibatkan oleh waktu untuk bercampurnya bahan bakar dan oksidator secara difusi juga akan semakin cepat sehingga menyebabkan daerah untuk bereaksi antara bahan bakar, oksidator dengan api juga semakin luas.



Gambar 4.3 Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Lebar Api pada Konsentrasi $\text{CO}_2 = 20\%$

Kondisi $Y_{\text{O}_2} = 0.363$ pada **Gambar 4.3** di atas menunjukkan grafik pengaruh massa alir terhadap lebar api pada konsentrasi CO_2 sebesar 20 %. Dalam grafik juga terdapat 2 buah parameter yang diuji yakni lebar api biru dan api kuning. Pada penelitian kali ini terdapat 2 buah warna api yang dihasilkan dari proses pembakaran CH_4 yakni warna api biru dan api kuning. Api biru terjadi karena pada wilayah tersebut masih kaya akan O_2 , sedangkan api kuning terjadi karena pada wilayah tersebut kaya akan bahan bakar, sehingga banyak bahan bakar yang belum terbakar sempurna. Pada grafik di **Gambar 4.3** terlihat kecenderungan dari ke dua warna api tersebut semakin menurun seiring dengan penambahan massa alir dari bahan bakar dengan menggunakan CO_2 .

Menurut (Narayanan, dkk : 2010, 6) bahwa hasil yang diakibatkan oleh penambahan jelaga maka mengakibatkan pengurangan yang signifikan dari daerah reaksi api. Hal ini berarti seiring dengan bertambahnya massa alir dari bahan bakar maka juga menambah jumlah CO_2 . CO_2 dianggap sebagai inhibitor yang artinya dapat menghambat jalannya reaksi pembakaran. Jika reaksi pembakaran membutuhkan waktu yang cukup lama maka akan berakibat kepada daerah reaksi yang dihasilkan juga semakin sempit, dan ketika daerah reaksi yang dihasilkan semakin sempit maka akan mengakibatkan api yang terbentuk juga akan lebih pendek jika dibandingkan dengan **Gambar 4.2**.

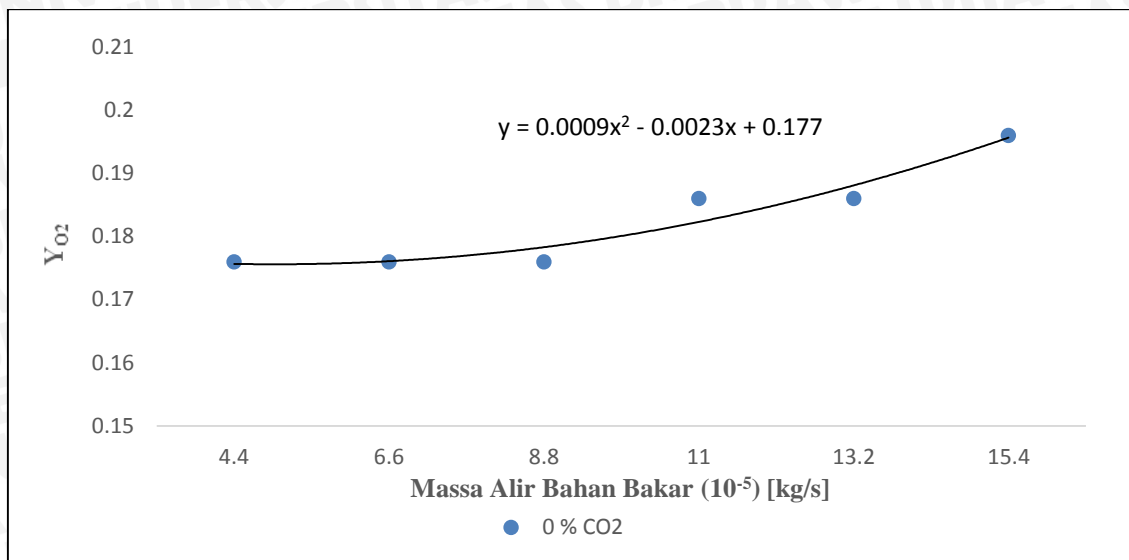


Gambar 4.4 Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Lebar Api pada Konsentrasi $CO_2 = 40\%$

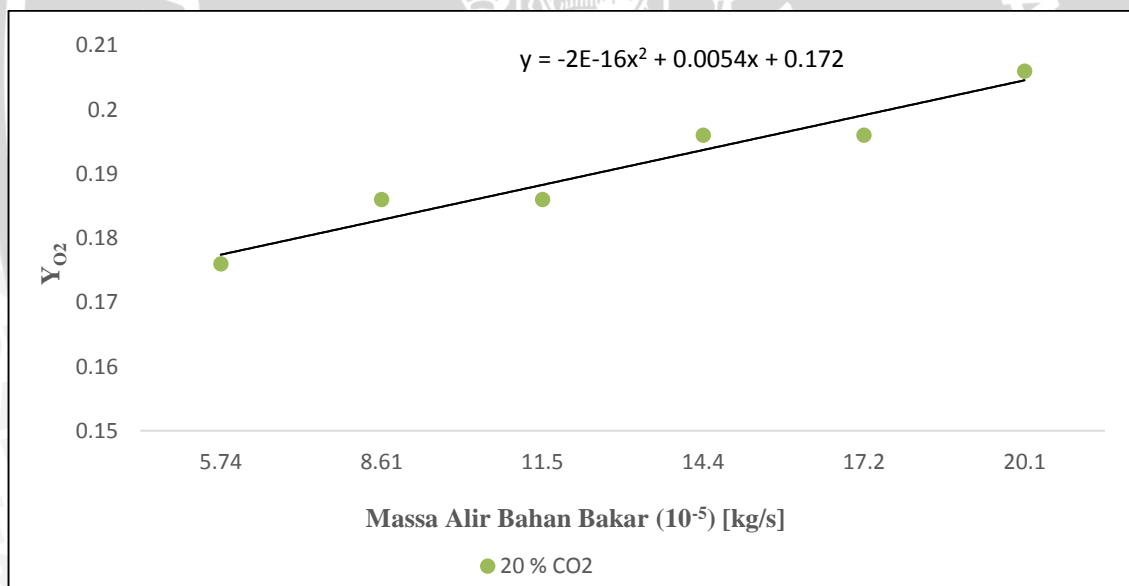
Kondisi $Y_{O_2} = 0.363$ pada **Gambar 4.4** di atas menunjukkan grafik pengaruh massa alir terhadap lebar api pada konsentrasi CO_2 sebesar 40 %. Dalam grafik juga terdapat 2 buah parameter yang diuji yakni lebar api biru dan api kuning. Pada penelitian kali ini terdapat 2 buah warna api yang dihasilkan dari proses pembakaran CH_4 yakni warna api biru dan api kuning. Api biru terjadi karena pada wilayah tersebut masih kaya akan O_2 , sedangkan api kuning terjadi karena pada wilayah tersebut kaya akan bahan bakar, sehingga banyak bahan bakar yang belum terbakar sempurna. **Gambar 4.3** dan **Gambar 4.4** memiliki sebuah kesamaan yakni pada data tersebut sama-sama ditambahkan CO_2 sebagai bahan bakar. Namun, konsentrasi CO_2 yang ditambahkan berbeda yakni 20 % dan 40 %. Penambahan CO_2 sebanyak 40 % terjadi penurunan yang signifikan jika dibandingkan dengan penambahan CO_2 sebesar 20 %.

Penambahan massa alir bahan bakar juga akan mengakibatkan pada penambahan jumlah CO_2 , ini yang menyebabkan bahwa penambahan massa alir tidak memiliki peran untuk menambah lebar api, dikarenakan jumlah CO_2 yang ikut dalam proses pembakaran juga semakin besar ditambah dengan hasil dari proses pembakaran itu sendiri yang juga menghasilkan CO_2 . Hal ini menjadi penghambat terjadinya reaksi pembakaran pada proses pembakaran sehingga menyebabkan api lebih pendek daripada **Gambar 4.2** dan **Gambar 4.3**.

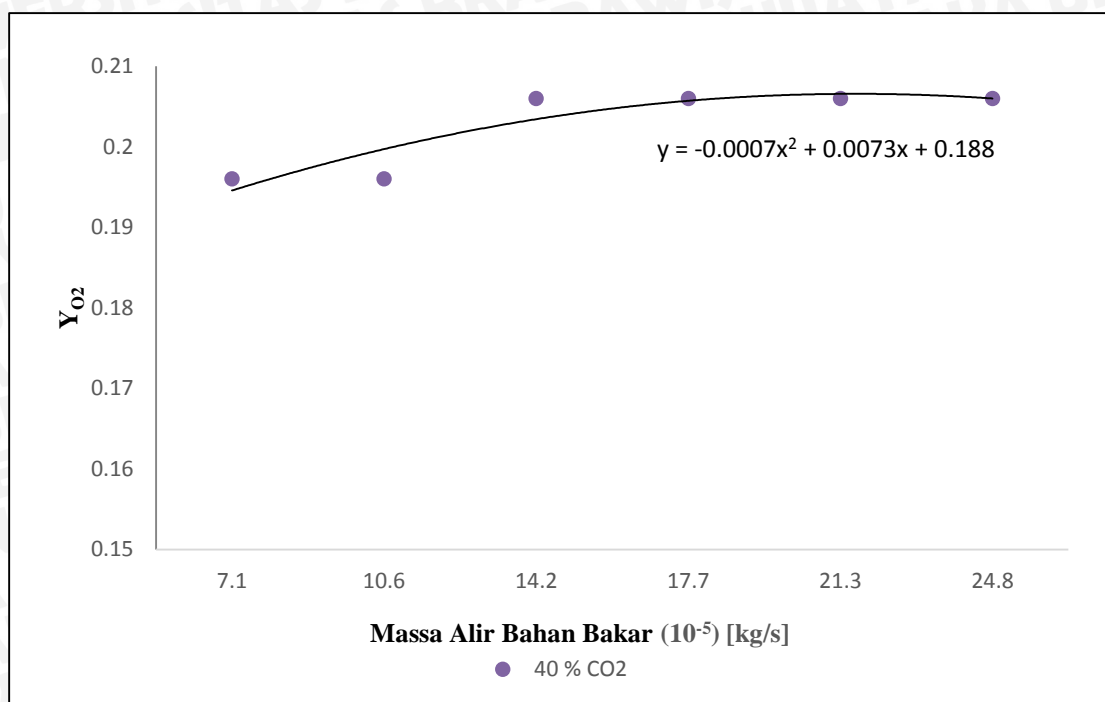
4.2.3 Extinction (Api Padam)



Gambar 4.5 Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Kondisi Extinction (Api Padam) pada Konsentrasi $CO_2 = 0\%$



Gambar 4.6 Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Kondisi Extinction (Api Padam) pada Konsentrasi $CO_2 = 20\%$



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Massa Alir terhadap Kondisi *Extinction* (Api Padam) pada Konsentrasi $CO_2 = 40\%$

Gambar 4.5, Gambar 4.6, dan Gambar 4.7 merupakan gambar dari grafik yang menunjukkan hubungan massa alir bahan bakar terhadap kondisi *extinction* (api padam) pada pembakaran CH_4-CO_2 pada tiap-tiap variasi konsentrasi CO_2 . Secara berurutan konsentrasi CO_2 yakni 0%, 20% dan 40%. Dapat dilihat bahwa kecenderungan dari ketiga grafik diatas menunjukkan bahwa nilai Y_{O_2} yang di dapat adalah semakin meningkat seiring dengan penambahan massa alir reaktan.

Hal ini disebabkan karena pada penambahan massa alir reaktan terjadi penambahan jumlah CH_4 dan CO_2 yang mengakibatkan jumlah O_2 yang diperlukan untuk mempertahankan api sampai pada kondisi padam juga ikut bertambah. Selain itu juga dikarenakan dengan penambahan massa alir maka akan berakibat pada daerah reaksi yang dihasilkan juga akan semakin luas yang artinya bahwa kemampuan O_2 untuk mempertahankan api agar tetap hidup juga semakin besar. Kondisi *extinction* pada penelitian ini dilihat dari warna api (*luminosity*) yang dihasilkan semakin berkurang sebelum padam, artinya api akan memiliki warna yang lebih gelap dahulu sebelum akhirnya terjadi *extinction*.

Pada proses pembakaran secara umum dibutuhkan oksidator, panas, dan bahan bakar. Jika salah satu dari ke tiga komponen tersebut tidak ada maka pembakaran tidak dapat terjadi. *Extinction* ini terjadi ketika jumlah O_2 selama proses pembakaran sudah tidak mampu lagi untuk mempertahankan api agar tetap menyala dikarenakan lebih

banyak bahan bakar yang berada di ruang bakar. Karena O_2 sudah tidak mampu lagi untuk menjaga api agar tetap menyala maka yang terjadi adalah api padam.



BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian yang dilakukan didapatkan kesimpulan bahwa penambahan massa alir reaktan akan mempengaruhi dari karakteristik api yang meliputi lebar api, warna api, dan kondisi *extinction* (api padam).

1. Penambahan massa alir reaktan mengakibatkan tingkat kecerahan warna api (*Luminosity*) yang dihasilkan semakin meningkat (terang) dan juga mengalami peningkatan pada lebar api pada bahan bakar tanpa menggunakan CO₂.
2. Tingkat kecerahan warna api (*Luminosity*) yang dihasilkan menunjukkan semakin berkurang (gelap) seiring dengan penambahan konsentrasi CO₂. Api akan memiliki warna yang lebih gelap sebelum padam.
3. Pada kondisi *extinction* (api padam), konsentrasi oksigen yang dibutuhkan untuk mempertahankan api adalah semakin meningkat seiring dengan penambahan massa alir reaktan.
4. Penambahan massa alir bahan bakar akan mengakibatkan lebar api yang dihasilkan semakin berkurang seiring dengan penambahan konsentrasi CO₂.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, saran yang bisa dilakukan untuk penelitian selanjutnya adalah:

1. Memvariasikan tekanan gas masuk menuju *counterflow burner*.
2. Memvariasikan jarak antar pipa *counterflow burner*.
3. Mengukur temperatur api yang dihasilkan.

DAFTAR PUSTAKA

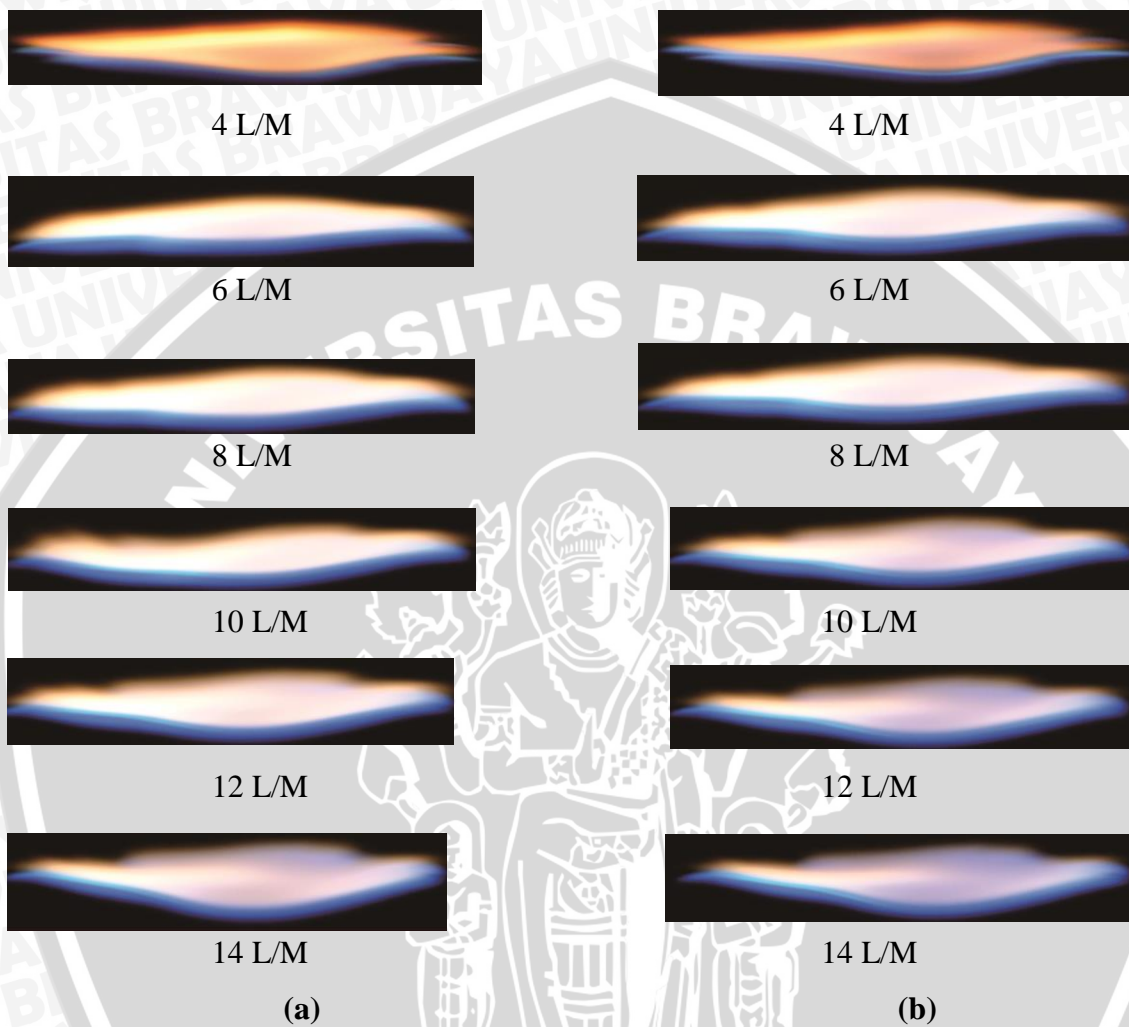
- Amaru, W., "Synergy in aquatic protection: A pragmatic approach to protection and enhancement of marine ecosystems". American Fisheries Society Symposium, 2004, page 5-7.
- Bundy, M., Hamins, A., Lee, Ki Yong, "Suppression limits of low strain rate non premixed methane flames", Journal national institute of standards and technology, Vol. 133, 2003, page 299-310.
- Chakraborty, S. K., Mukhopadhyay, B. N., & Chanda, B. C., "Effect of inhibitors on flammability range of flames produced from LPG/air mixtures", Vol. 54, issue 1, 1975, page 10-16.
- Cengel Yunus A. and Cimbula John M., "Fluid Mechanics fundamental and Application", Table A-10, Page 895 – 896.
- Chen, S., Zheng, C., *Counterflow Diffusion Flame of Hydrogen Enriched Biogas Under Mild Oxy-fuel Condition*, International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, Issue 23, 2011, page 15403-15413.
- Coward, H.F., Jones, G. W., "Limits of Flammability of Gases and Vapour", bulletin 503, Bureau of Minessota, 1952, U.S. Government Printing Office: Washington D.C.
- Fessenden, Ralp J., and J. S. Fessenden, 1989. *Kimia Organik Jilid 1*, Edisi Ke-3, Erlangga, Jakarta, page 102-103.
- Firmansyah, R.H., 2008. *Penelitian Kestabilan dan Panjang Nyala Api Premix Akibat Variasi Diameter Dalam Ring Menggunakan Gas Propane pada Bunsen Burner*. Teknik Mesin. Universitas Indonesia: Jakarta.
- Jeong Soo Kim, Jeong Park, Oh Boong Kwon, Dae Seok Bae, et. al, "A study on flame structure and extinction in downstream interaction between lean premixed CH₄-air and (50% H₂+ 50% CO) syngas-air flames", Journal of pukyong national university, Vol.36, 2011 page 5717-5728.
- Karim, G.A., Hanafi. A.S., Zhou, G., "A Kinetic Investigation Of The Oxidation Of Low Heating Value Fuel Mixtures Of Methane And Diluents", Journal of Emerging Energy Technology, Vol. 41, 1992, page 103.
- Karim, G.A., Hanafi. A.S., "An analytical Examination of the Partial Oxidation of Rich Mixture of Methane and a Oxygen", Journal of Fossil Fuel Combustion, Vol. 33, 1991, page 127.

- Kristoferson dan Bokalders, 1991. *Penanganan dan Pemanfaatan Limbah Padat*, Jakarta, Penerbit Mediyatama Sarana Perkasa.
- Li, S. C., *Spray Stagnation Flames*, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 23, 1997, page 303-347.
- Munawaroh, Jazilah, 2010. *Perancangan dan Pembuatan Miniatur Penghasil Biogas (Sebagai Media Pembelajaran)*. Fisika. UIN Maulana Malik Ibrahim: Malang.
- Narayanan Praveen, Baum Howard R., Trouve Arnaud. "Effect of soot addition on extinction limits of luminous laminar counterflow diffusion flames", Journal Proceedings of the Combustion Institute, Vol. 33, 2011, page 2539–2546.
- Park, June sung., Hwang, Jin Don., Park, Jeong., et al. "Edge flame instability in low-strain-rate counterflow diffusion flames", Journal of combustion and science, Vol. 146, 2006, Page 612-619.
- Porpatham, E., Ramesh, A., Nagalingam, B., "Investigation on the Effect of Concentration of Methane in Biogas when used as a Fuel for a Spark Ignition Engine", Journal of Fuel, Vol. 87, Issue 8-9, 2008, page 1651-1659.
- Price, E. C., and Cheremisinoff, P. N., 1981. "Biogas Production and Utilization". Ann Arbor Science Publisher inc: United States of America.
- Rukmana, B. R., 2012. *Visualisasi Kecepatan Tinggi Nyala Api Tipe Swirl pada Medan Aliran Berlawanan dengan Rasio Gap Diameter Besar*. Teknik Mesin. Universitas Indonesia: Jakarta.
- Sasongko, M. N., Mikami, M., Dvorjetski, "Extinction Condition of Counterflow Diffusion Flame with Polydisperse Water Spray", Journal of Proceedings of Combustion Institute, Vol. 33, Issue 2, 2011, page 2555-2562.
- Tsuji, H., "Counterflow Diffusion Flames", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 8, 1982, page 93-119.
- Ukisu Yuji, Kitajima Akio, Hatanaka Takeshi, Takeuchi Masao, "Experimental Study of Extinction and its Quantification in Laminar and Turbulent Counterflow CH₄-N₂/O₂-N₂ Nonpremixed Flames", Journal of AIST Combustion and Flame, Vol. 93, 2004.
- Wardana, ING. 2008. *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*. PT. Danar Wijaya Brawijaya University Press: Malang.
- Zicari, S. McKinzey, 2003, "Removal of Hydrogen Sulfide From Biogas Using Cow-Manure Compost", A Master thesis, Cornell university, 2003.

UNIVERSITAS BRAWIJAYA

LAMPIRAN I





Gambar (a) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.304$ konsentrasi $CO_2 = 0\%$

Gambar (b) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.304$ konsentrasi $CO_2 = 20\%$



4 L/M



6 L/M



8 L/M



10 L/M



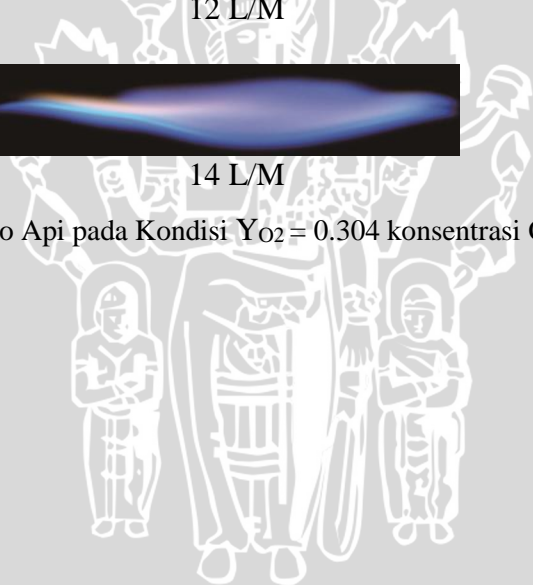
12 L/M

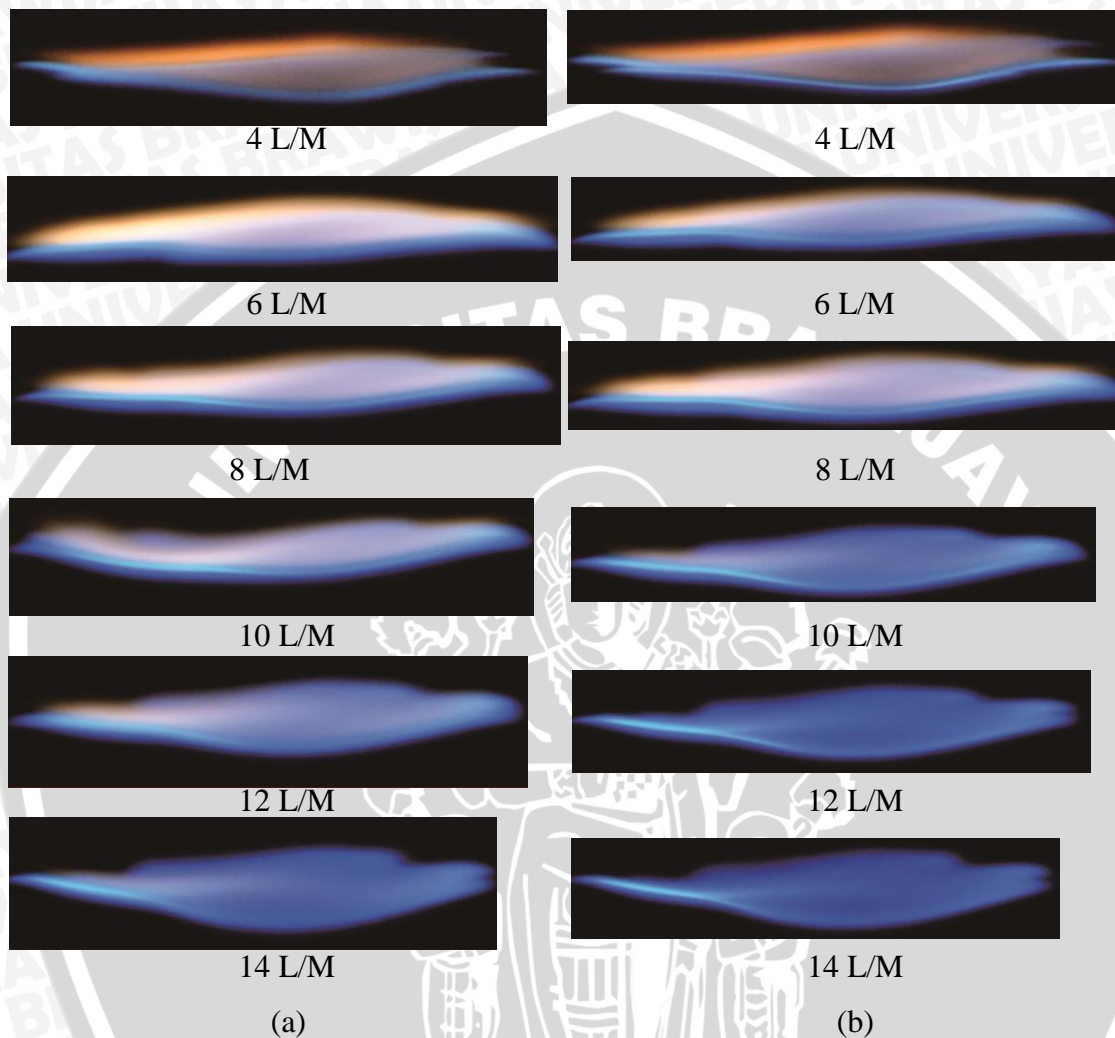


14 L/M

Gambar (c) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2} = 0.304$ konsentrasi $CO_2 = 40\%$

UNIVERSITAS BRAWIJAYA





Gambar (d) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2}=0.246$ konsentrasi $CO_2=0\%$

Gambar (e) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2}=0.246$ konsentrasi $CO_2=20\%$



4 L/M



6 L/M



8 L/M



10 L/M



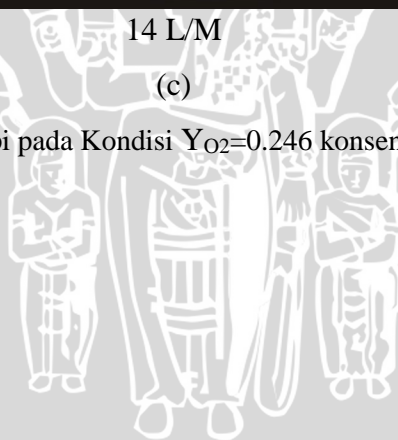
12 L/M



14 L/M

(c)

Gambar (f) Foto Api pada Kondisi $Y_{O_2}=0.246$ konsentrasi $CO_2=40\%$



• **Data Lebar Api pada Kondisi Y_{O_2} 0.304 Berbagai Konsentrasi CO_2**

Data lebar api pada kondisi Y_{O_2} sebesar 0.304 dengan konsentrasi CO_2 sebesar 0% untuk lebar api biru dan lebar api kuning. Satuan yang digunakan adalah dalam cm.

Lebar Api Biru					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
4.4	6.6	8.8	11	13.2	15.4
4.17	4.19	4.22	4.2	4.05	3.9

Lebar Api Kuning					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
4.4	6.6	8.8	11	13.2	15.4
4.19	4.03	4.11	4.05	4.1	3.69

Data lebar api pada kondisi Y_{O_2} sebesar 0.304 dengan konsentrasi CO_2 sebesar 20% untuk lebar api biru dan lebar api kuning, Satuan yang digunakan adalah dalam cm.

Lebar Api Biru					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
5.74	8.61	11.5	14.4	17.2	20.1
4.18	4.22	4.39	4.07	4.02	3.98

Lebar Api Kuning					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
5.74	8.61	11.5	14.4	17.2	20.1
4.03	4.18	4.4	4.1	3.78	3.81

Data lebar api pada kondisi Y_{O_2} sebesar 0.304 dengan konsentrasi CO_2 sebesar 40% untuk lebar api biru dan lebar api kuning, Satuan yang digunakan adalah dalam cm.

Lebar Api Biru					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
7.1	10.6	14.2	17.7	21.3	24.8
4.12	4.33	4.3	4.2	4.08	4.12

Lebar Api Kuning					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
7.1	10.6	14.2	17.7	21.3	24.8
3.77	4	4.12	3.81	3.68	3.98

• **Data Lebar Api pada Kondisi Y_{O_2} 0.246 Berbagai Konsentrasi CO_2**

Data lebar api pada kondisi Y_{O_2} sebesar 0.246 dengan konsentrasi CO_2 sebesar 0% untuk lebar api biru dan lebar api kuning. Satuan yang digunakan adalah dalam cm.

Lebar Api Biru					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
4.4	6.6	8.8	11	13.2	15.4
3.17	4.01	3.87	3.76	3.71	3.51

Lebar Api Kuning					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
4.4	6.6	8.8	11	13.2	15.4
3.24	3.87	3.56	3.31	3.24	-

Data lebar api pada kondisi Y_{O_2} sebesar 0.246 dengan konsentrasi CO_2 sebesar 20% untuk lebar api biru dan lebar api kuning. Satuan yang digunakan adalah dalam cm.

Lebar Api Biru					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
5.74	8.61	11.5	14.4	17.2	20.1
3.97	3.9	4.04	3.72	3.65	3.4

Lebar Api Kuning					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
5.74	8.61	11.5	14.4	17.2	20.1
3.49	3.52	3.75	-	-	-

Data lebar api pada kondisi Y_{O_2} sebesar 0.246 dengan konsentrasi CO_2 sebesar 40% untuk lebar api biru dan lebar api kuning. Satuan yang digunakan adalah dalam cm.

Lebar Api Biru					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
7.1	10.6	14.2	17.7	21.3	24.8
4.23	4.12	4.01	3.96	3.8	4.23

Lebar Api Kuning					
Massa Alir Bahan Bakar (10^{-5}) [kg/s]					
7.1	10.6	14.2	17.7	21.3	24.8
3.75	3.53	3.47	-	-	-