

**PENGARUH KONSENTRASI CO₂ TERHADAP KARAKTERISTIK API
PEMBAKARAN DIFUSI CH₄-CO₂ PADA *COUNTERFLOW BURNER***

**SKRIPSI
KONSENTRASI KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh:

**MIKA FARIZKARAJA
NIM. 0910620075-62**

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

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah, Puji Syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala limpahan rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul ” **Pengaruh Konsentrasi CO₂ Terhadap Karakteristik Api Pembakaran Difusi CH₄-CO₂ pada Counterflow Burner** ”.

Penyusunan dan penyelesaian skripsi ini tidak lepas dari keterlibatan dan bantuan berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan banyak terima kasih kepada :

1. Bapak Dr. Eng. Nurkholis Hamidi ST., M.Eng selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin dan Bapak Purnami ST., MT. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Mesin.
2. Bapak Dr. Eng. Mega Nur S. ST., MT. selaku Posen Pembimbing I skripsi yang juga sebagai kepala Lab. Mesin Pendingin atas semua ilmu dan saran yang telah diberikan selama penyusunan skripsi.
3. Bapak Dr. Eng. Widya Wijayanti, ST., MT. selaku Dosen Pembimbing II skripsi yang memberikan arahan serta bimbingan guna kesempurnaan penulisan skripsi ini.
4. Bapak Dr. Eng., Anindito Purnowidodo, ST., M.Eng., selaku Dosen Pembimbing Akademik.
5. Seluruh Dosen pengajar dan Staf administrasi Jurusan Teknik Mesin.
6. Kedua Orang Tua penulis yaitu Drs. Irianto dan Elida Kamal serta adik tercinta Rinda Masia Puteri atas yang tak henti-hentinya memberikan segala pengorbanan baik dukungan do'a, semangat maupun material yang telah diberikan kepada penulis selama ini. Juga berserta keluarga besar penulis yang telah mendo'akan dan memberikan semangat kepada penulis hingga saat ini.
7. Saudara-saudara Mesin 2009, terima kasih atas semua dukungan dan bantuan serta keakraban luar biasa yang telah diberikan mulai dari mahasiswa baru sampai saat ini.
8. Rekan-rekan Asisten Lab. Mesin Pendingin UB, Andi Putranto, Bernardus Romario, Andi Pramana, Arif Mukhlisin, mas Ucup dan Afrima, terima kasih banyak atas semua kebersamaan dan dukungannya selama ini.
9. Kepada Keluarga Besar Watugong 29 serta para sahabat penulis, terima kasih atas semua masalah, bantuan, candaan dan segala hiburan yang telah membuat penulis nyaman selama ini.

10. Seseorang yang selalu memberikan motivasi dan do'a selama dalam penyelesaian skripsi.
11. Kepada Lab. Motor Bakar yang telah memberikan banyak bantuan dalam penelitian ini. Serta rekan-rekan yang banyak membantu dalam penelitian ini : Pandu Suryo Pranowo, Angga, Amril, Rifky Febrianoor dan para asisten Lab. Motor Bakar.
12. Seluruh Keluarga Besar Mahasiswa Mesin Universitas Brawijaya.
13. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu-persatu yang telah banyak membantu penulis baik selama proses penyusunan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini dan ilmu yang dimiliki masih jauh dari kata sempurna. Oleh sebab itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kebaikan di kemudian hari. Semoga skripsi ini bisa bermanfaat bagi semua pihak. Amiin



Malang, Januari 2014

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR TABEL	v
DAFTAR GAMBAR	vi
DAFTAR LAMPIRAN	viii
DAFTAR SIMBOL	ix
RINGKASAN	x
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2 Biogas	5
2.2.1 Prinsip Pembentukan Biogas	5
2.2.2 Karakteristik Gas yang Terkandung dalam Biogas	7
2.3 Pengertian dan Reaksi Pembakaran.....	8
2.3.1 Pembakaran Stoikiometri.....	10
2.3.2 Rasio Udara-Bahan Bakar (<i>Air-fuel Ratio/AFR</i>)	11
2.3.3 Udara Berlebih dan Udara Teoritis	11
2.3.4 Rasio Ekuivalen (Equivalent Ratio, Φ)	12
2.4 Pembakaran Difusi.....	12
2.4.1 Struktur Aliran Reaktan Api Difusi	13
2.5 Karakteristik Nyala Api.....	13
2.5.1 Batas Mampu Nyala (<i>Flammability Limits</i>).....	13
2.5.2 Warna Api	14
2.5.3 Lebar Api.....	14
2.6 Inhibitor	14
2.7 <i>Counterflow Diffusion Flame</i>	14

2.8	Hipotesis	16
BAB III METODOLOGI PENELITIAN		17
3.1	Metode Penelitian	17
3.2	Variabel Penelitian.....	17
3.3	Peralatan Penelitian.....	18
3.4	Tempat dan Waktu Pelaksanaan	19
3.5	Skema Instalasi Penelitian	19
3.6	Metode Pengambilan Data.....	21
3.7	Metode Pengolahan Data	23
3.8	Diagram Alir Penelitian	24
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN		26
4.1	Data Hasil Penelitian	26
4.1.1	Data Lebar Api	26
4.1.2	Data <i>Extinction</i> (api padam)	30
4.1.3	Data Warna Api	31
4.2	Pembahasan	32
4.2.1	Analisa Grafik Hubungan Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api	32
4.2.2	Analisa Grafik Hubungan Pengaruh Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap YO ₂ Kondisi <i>Extinct</i>	39
4.2.3	Analisa Pengaruh Konsentrasi CO ₂ Terhadap Warna Api.....	40
BAB V PENUTUP		45
5.1	Kesimpulan.....	45
5.2	Saran	45
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

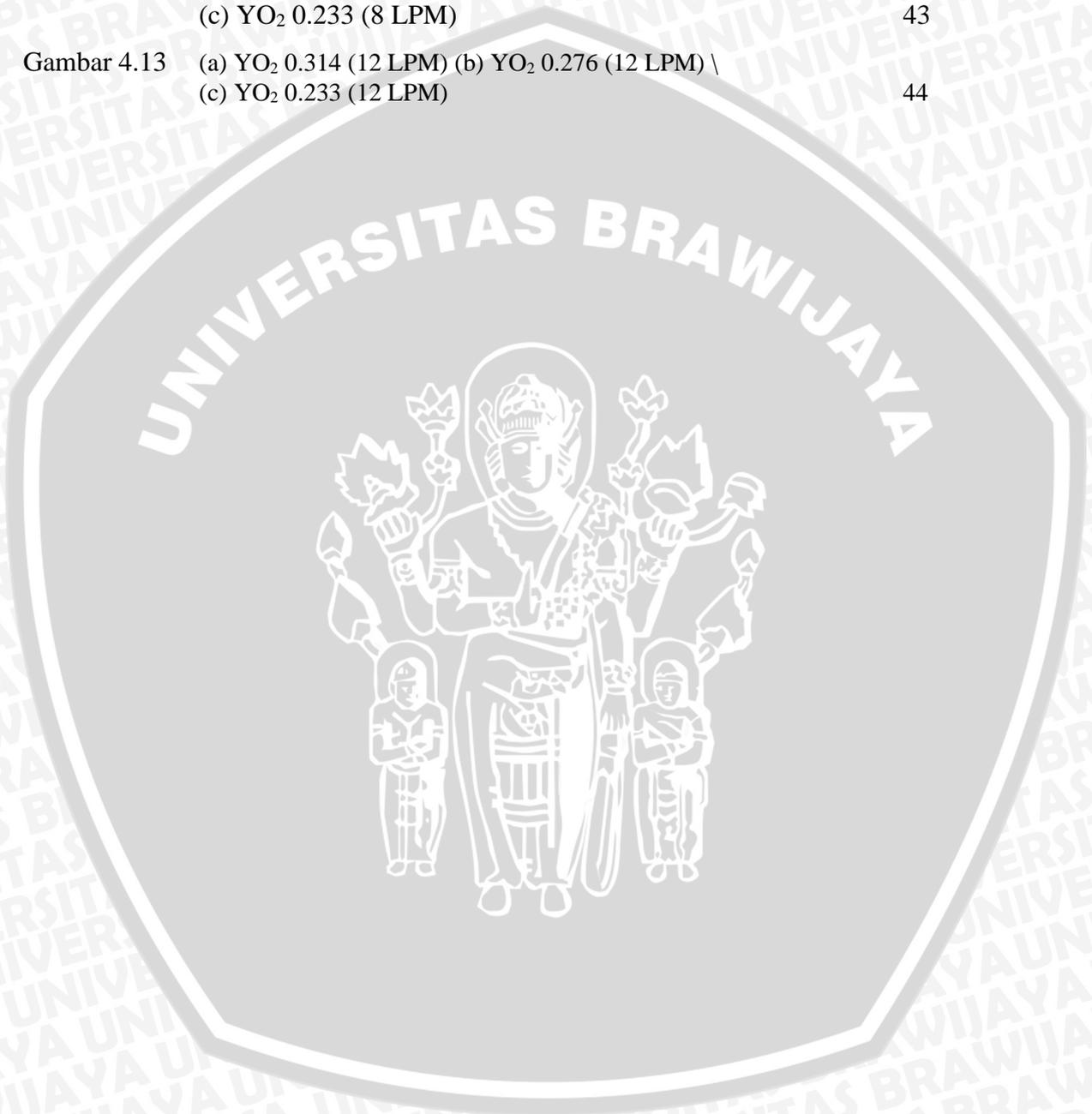
DAFTAR TABEL

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi pada Biogas	6
Tabel 2.2	Komposisi Udara kering	10
Tabel 4.1	Lebar Api Biru 4 LPM	26
Tabel 4.2	Lebar Api Kuning 4 LPM	26
Tabel 4.3	Lebar Api Biru 4 LPM	26
Tabel 4.4	Lebar Api Kuning 4 LPM	26
Tabel 4.5	Lebar Api Biru 4 LPM	27
Tabel 4.6	Lebar Api Kuning 4 LPM	27
Tabel 4.7	Lebar Api Biru 8 LPM	27
Tabel 4.8	Lebar Api Kuning 8 LPM	27
Tabel 4.9	Lebar Api Biru 8 LPM	28
Tabel 4.10	Lebar Api Kuning 8 LPM	28
Tabel 4.11	Lebar Api Biru 8 LPM	28
Tabel 4.12	Lebar Api Kuning 8 LPM	28
Tabel 4.13	Lebar Api Biru 12 LPM	28
Tabel 4.14	Lebar Api Kuning 12 LPM	29
Tabel 4.15	Lebar Api Biru 12 LPM	29
Tabel 4.16	Lebar Api Kuning 12 LPM	29
Tabel 4.17	Lebar Api Biru 12 LPM	29
Tabel 4.18	Lebar Api Kuning 12 LPM	29
Tabel 4.19	Data Debit O ₂ pada Keadaan <i>Extinct</i> pada Setiap Variasi Konsentrasi CO ₂ dalam satuan LPM	30
Tabel 4.20	Data Nilai YO ₂ pada Keadaan <i>Extinct</i> pada Setiap Variasi Konsentrasi CO ₂	31

DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Ilustrasi proses Pembakaran	11
Gambar 2.2	Struktur api difusi	17
Gambar 2.3	Nyala api pada <i>counterflow burner</i>	15
Gambar 2.4	Skematik Counterflow flame burner	16
Gambar 3.1	Ruang bakar model <i>Counterflow Flame</i>	18
Gambar 3.2	Pemantik	18
Gambar 3.3	Kamera	18
Gambar 3.4	Regulator gas	19
Gambar 3.5	<i>Flowmeter</i>	19
Gambar 3.7	Skema instalasi alat penelitian (tampak samping)	20
Gambar 3.8	Skema instalasi alat penelitian (tampak atas)	20
Gambar 3.9	Diagram alir penelitian	25
Gambar 4.1	Grafik Hubungan Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO ₂ 0.314, Debit 4 LPM	32
Gambar 4.2	Grafik Hubungan Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO ₂ 0.276, Debit 4 LPM	32
Gambar 4.3	Grafik Hubungan Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO ₂ 0.233, Debit 4 LPM	33
Gambar 4.4	Grafik Hubungan Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO ₂ 0.314, Debit 8 LPM	35
Gambar 4.5	Grafik Hubungan Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO ₂ 0.276, Debit 8 LPM	35
Gambar 4.6	Grafik Hubungan Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO ₂ 0.233, Debit 8 LPM	36
Gambar 4.7	Grafik Hubungan Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO ₂ 0.314, Debit 8 LPM	37
Gambar 4.8	Grafik Hubungan Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO ₂ 0.276, Debit 8 LPM	37
Gambar 4.9	Grafik Hubungan Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO ₂ 0.233, Debit 8 LPM	38

Gambar 4.10	Grafik Hubungan Pengaruh Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar Terhadap YO ₂ pada Kondisi <i>Extinct</i>	39
Gambar 4.11	(a) YO ₂ 0.29 (4 LPM) (b) YO ₂ 0.254 (4 LPM) (c) YO ₂ 0.214 (4 LPM)	42
Gambar 4.12	(a) YO ₂ 0.314 (8 LPM) (b) YO ₂ 0.276 (8 LPM) (c) YO ₂ 0.233 (8 LPM)	43
Gambar 4.13	(a) YO ₂ 0.314 (12 LPM) (b) YO ₂ 0.276 (12 LPM) \ (c) YO ₂ 0.233 (12 LPM)	44



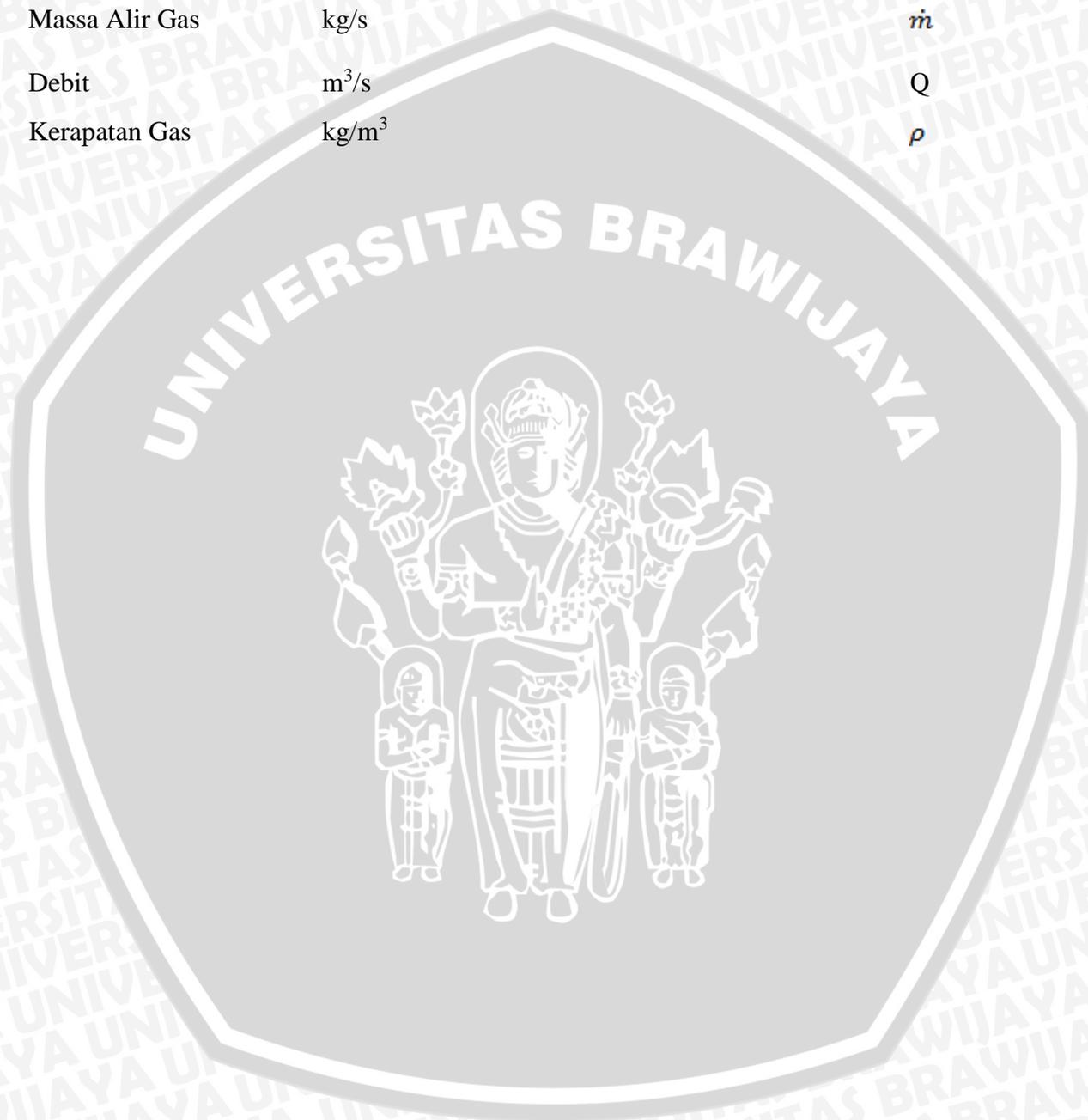
DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Foto Api pada Debit Aliran 4 LPM Tiap Kondisi YO ₂
Lampiran 2	Foto Api pada Debit Aliran 8 LPM Tiap Kondisi YO ₂
Lampiran 3	Foto Api pada Debit Aliran 12 LPM Tiap Kondisi YO ₂



DAFTAR SIMBOL

Besaran Dasar	Satuan dan Singkatannya	Simbol
Jumlah mol	mol	N
Massa Relatif	kg/mol	M
Massa Alir Gas	kg/s	\dot{m}
Debit	m^3/s	Q
Kerapatan Gas	kg/m^3	ρ



RINGKASAN

Mika Farizkaraja, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Januari 2014, *Pengaruh Kosentrasi CO₂ terhadap Karakteristik Api Pembakaran Difusi CH₄-CO₂ pada Counterflow Burner*, Dosen Pembimbing : Mega Nur S. dan Widya Wijayanti.

Biogas memiliki kandungan gas yang beragam dan konsentrasi gas-gas yang terkandung dalam biogas sangat mempengaruhi karakteristik api dari pembakaran yang terjadi.. Pada umumnya gas yang terkandung dalam biogas sendiri adalah CH₄ (50%-70%), CO₂ (30%-40%), H₂S (0%-10%), H₂O (0,3%), N₂ (1%-2%), H₂ (5%-10%). Dalam hal ini yang dimanfaatkan sebagai bahan bakar adalah gas CH₄ karena memiliki nilai kalor (panas) yang bisa digunakan sebagai bahan bakar, sedangkan gas-gas lain seperti CO₂ dan N₂ merupakan zat pengotor yang bersifat merugikan pada pembakaran. Pengaruhnya pada pembakaran yang disebabkan oleh zat pengotor tersebut pun bisa dilihat dari karakteristik api yang terbentuk .

Pada penelitian ini gas yang digunakan hanya CH₄, CO₂, O₂ dan N₂. Dalam penelitian ini digunakan metode pembakaran difusi dengan Counterflow Burner karena menurut berbagai penelitian sebelumnya mengenai pembakaran difusi metode ini paling baik untuk meneliti karakteristik api difusi. Pada penelitian ini variasi CO₂ pada bahan bakar adalah 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, dan 50%. Dan dilihat pula pengaruhnya pada berbagai variasi jumlah oksidator dan debit aliran. Pada penelitian ini yang diamati dari karakteristik api difusi diantaranya adalah warna api, lebar api dan batas oksigen minimal pada nyala api.

Pada pengamatan warna api didapatkan kecenderungan api akan semakin terang ketika O₂ terus ditambahkan dan akan terlihat api dengan warna paling terang pada konsentrasi CO₂ 0% pada rasio O₂ pada oksidator 0,314 dan debit aliran 4 LPM (Liter per Menit). Pada pengamatan panjang api didapatkan api terlebar pada konsentrasi 20% CO₂, rasio O₂ 0,314 dan debit aliran 4 LPM. Dan didapatkan pula data batas oksigen minimum pada nyala api dimana api dengan konsentrasi 10% dan 20% dengan debit aliran bahan bakar 4 LPM mampu menyala hingga 0.160 pada rasio O₂. Dan pada api dengan konsentrasi 50% dan debit aliran 4, 8, 12 LPM api hanya mampu menyala pada 0.188 pada rasio bahan bakar dimana ini menjadi nilai tertinggi rasio O₂ pada pengamatan batas O₂ minimum nyala api. Sehingga diambil kesimpulan warna api akan semakin terang seiring kenaikan Y_{O₂} dan debit aliran bahan bakar,, lalu api akan semakin lebar seiring dengan bertambahnya konsentrasi CO₂ pada bahan bakar. Sedangkan, api kuning yang terbentuk semakin kecil seiring pengurangan bahan bakar dikarenakan terbentuknya api campuran miskin bahan bakar.

Kata kunci: *counterflow burner*, CO₂ pada CH₄ , api difusi, karakteristik api

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dewasa ini konsumsi akan energi semakin meningkat, sedangkan dilain sisi persediaan sumber energi yang ada di bumi semakin menipis. Maka saat ini sangatlah dibutuhkan suatu tindakan untuk menanggulangi hal tersebut, diantaranya adalah dengan memanfaatkan sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui. Salah satu caranya adalah dengan memproduksi energi *thermal* dengan sumber energi kimia. Penggunaan sumber energi kimia sebagai sumber energi *thermal* bisa didapatkan dengan cara mereaksikan energi kimia dan dalam produksi ini adalah reaksi pembakaran.

Salah satu energi alternatif yang sekarang sedang dikembangkan adalah energi yang berasal dari bahan-bahan organik, dikarenakan tergolong energi yang dapat diperbaharui. Keberadaan bahan-bahan organik tersebut mudah didapat, selain itu hal yang terpenting adalah bahan-bahan organik tersebut ramah lingkungan.

Biogas merupakan salah satu produk yang sedang dikembangkan. Hal ini dikarenakan gas yang dihasilkan dari proses *anaerobic digester* mampu menghasilkan gas-gas seperti CH_4 (50%-70%), CO_2 (30%-40%), H_2S (0%-10%), H_2O (0,3%), N_2 (1%-2%), H_2 (5%-10%) dan gas-gas lainnya. Dalam hal ini yang dimanfaatkan adalah gas metana (CH_4), karena CH_4 memiliki nilai kalor (panas) yang dapat digunakan sebagai bahan bakar. Sedangkan, komponen-komponen lain seperti CO_2 dan N_2 merupakan zat pengotor yang memiliki sifat yang merugikan.

Dari beberapa hasil penelitian diatas menunjukkan bahwa masih diperlukan pengetahuan tentang karakteristik dari proses pembakaran biogas yang lebih detail dalam sistem mesin konversi energi. Karena karakteristik pembakaran dari suatu bahan bakar dipengaruhi banyak faktor. Salah satunya adalah terdapatnya beberapa komponen yang menghambat reaksi pembakaran, terutama gas CO_2 yang prosentasenya cukup besar dalam bahan bakar ini. Kandungan CO_2 dalam bahan bakar dapat menurunkan nilai kalor pembakaran. Rendahnya nilai kalor berakibat rendahnya energi pembakaran yang dihasilkan dari proses pembakaran (Karim, 1991). Lalu CO_2 memiliki kalor spesifik yang tinggi sehingga sebagian panas pembakaran akan terserap oleh zat ini seiring dengan meningkatnya temperatur. CO_2 yang terlarut dalam bahan bakar akan

menurunkan laju reaksi pembakaran yang mengakibatkan proses pembakaran biogas atau pada $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ di penelitian ini semakin lama.

Penelitian ini bertujuan khusus untuk mengetahui pengaruh dari konsentrasi CO_2 terhadap karakteristik api dari pembakaran difusi $\text{CH}_4\text{-CO}_2$. Perilaku dari nyala api dan batas mampu nyala api pada berbagai variasi konsentrasi CO_2 dalam $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ akan diteliti lebih mendalam. Konfigurasi pembakaran yang digunakan dalam penelitian ini adalah menggunakan konfigurasi *Counterflow burner*. Fenomena dari *counterflow flame* ini merupakan konfigurasi yang sangat cocok untuk mempelajari struktur api akibat pengaruh dari jenis kandungan bahan bakar, massa alir bahan bakar maupun karakteristik reaktan bahan bakar oksidator (Tsuji, 1982; Li, 2002; Sasongko, 2011). Salah satu buktinya adalah penelitian dari Chen (2011) tentang karakteristik pembakaran biogas pada *counterflow diffusion flame*. Dengan teori *flamelet* yang dihasilkan dari konfigurasi ruang bakar *counterflow* ini, dapat diprediksikan bahwa gas Hidrogen dapat memperbaiki proses pembakaran biogas.

Dari berbagai penelitian diatas maka dibutuhkan penelitian lebih lanjut tentang karakteristik pembakaran $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ yang pada umumnya memiliki konsentrasi terbesar dalam biogas serta pengaruh konsentrasi gas pengotor pada karakteristik api difusi. Pada penelitian ini akan membahas lebih lanjut tentang pengaruh konsentrasi CO_2 terhadap karakteristik api pembakaran difusi $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ pada *Counterflow Burner*.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka permasalahan yang akan dibahas dalam tugas akhir ini adalah sebagai berikut: “Bagaimana pengaruh konsentrasi CO_2 pada campuran $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ sebagai bahan bakar terhadap karakteristik nyala api difusi pada pembakaran dengan *Counterflow Burner*?”

1.3 Batasan Masalah

Dengan tujuan agar penelitian ini lebih terarah dan mencapai tujuan yang diharapkan, maka penulis memberikan batasan-batasan masalah yang meliputi hal-hal berikut:

1. Meneliti tentang karakteristik api, yang meliputi lebar api, warna api dan batas O_2 minimum pada kondisi api padam (*extinct*);
2. Aliran udara yang masuk bahan bakar adalah aliran laminar;
3. Tidak memperhitungkan kerugian akibat gesekan gas dengan peralatan;

4. Kandungan CH_4 yang digunakan dalam penelitian sebesar 95%.
5. Hanya memperhitungkan komposisi kandungan gas terbesar dalam dalam biogas yaitu: CH_4 , CO_2 , N_2 dan O_2 .

1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mendapatkan data eksperimental pengaruh kandungan CO_2 pada karakteristik difusi pada pembakaran CH_4 - CO_2 pada medan aliran berlawanan (*counter-flow*) dengan menggunakan bahan bakar gas CH_4 yang dominan pada biogas dan O_2 dan N_2 sebagai oksidan. Karakteristik pembakaran CH_4 - CO_2 yang diteliti meliputi warna api, lebar api dan konsentrasi minimum O_2 pada kondisi *extinct* api pada berbagai variasi konsentrasi CO_2 . Diharapkan pada penelitian ini didapatkan kondisi pencampuran bahan bakar dan udara yang efektif sehingga dapat meningkatkan stabilitas nyala api dan efisiensi pembakaran.

1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat penelitian ini adalah:

1. Dapat digunakan sebagai referensi tambahan untuk penelitian lebih lanjut mengenai penggunaan biogas sebagai bahan bakar alternatif dengan harapan dapat memunculkan skema baru tentang pengembangan model pembakaran biogas;
2. Memberikan masukan pada bidang industri yang lazimnya masih menggunakan bahan bakar minyak tentang penggunaan biogas sebagai bahan bakar alternatif;
3. Memberikan tambahan informasi tentang pengaruh gas inert yang terkandung dalam biogas terhadap perilaku pembakaran biogas yang dalam penelitian ini di asumsikan dengan CH_4 - CO_2 sebagai bahan bakar.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian yang sangat mendasar tentang pengaruh zat terlarut CO₂ dalam karakteristik pembakaran CH₄ dilakukan antara lain oleh:

Karim (1998), meneliti mengenai pengaruh kandungan gas CO₂ di dalam campuran gas CH₄-CO₂, dan hasilnya adalah gas CO₂ dapat menurunkan nilai kalor pembakaran yang berakibat pada rendahnya nilai energi dari pembakaran yang dihasilkan. Tingginya kadar kandungan gas CO₂ akan dapat mempengaruhi lamanya proses pembakaran dan juga berakibat pada sulitnya penyalaan awal pembakaran. Disini dituliskan jumlah sebagian energi pembakaran yang terserap oleh zat terlarut dalam hal ini adalah CO₂ akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur pembakaran.

Hal ini juga dikemukakan pada Karim (1991), laju reaksi pembakaran campuran CH₄-CO₂ akan menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi CO₂ dalam campuran bahan bakar. Hal ini akan otomatis berakibat waktu pembakaran menjadi lebih lama demikian juga dengan waktu penyalaan bahan bakar. Tetapi, hasil penelitian lainnya (Karim, 1992) menunjukkan bahwa laju reaksi oksidasi pembakaran bahan bakar Metana-CO₂ ini dapat ditingkatkan dengan meningkatkan homogenitas pencampuran reaktannya.

Porpathan (2008), meneliti tentang efek dari konsentrasi metana dalam biogas saat digunakan sebagai bahan bakar pada penyalaan mesin dengan busi. Hasilnya adalah konsentrasi gas CO₂ dalam biogas yang digunakan sebagai bahan bakar menurunkan kinerja mesin secara signifikan. Konsentrasi gas CO₂ dari yang sebelumnya 41% dikurangi hingga mencapai 20% dapat meningkatkan kinerja yang dihasilkan oleh mesin tersebut seiring dengan bertambahnya konsentrasi CH₄.

Penelitian sebelumnya yang menggunakan metode *Counterflow burner* diantara lain:

Chen (2011), meneliti mengenai karakteristik pembakaran biogas menggunakan metode *Counterflow burner* dengan menambahkan Hidrogen pada campuran bahan bakar. Hasilnya adalah metode *Counterflow burner* dapat memperlihatkan pengaruh penambahan Hidrogen pada proses karakteristik pembakaran biogas. Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat ditemukan cara lain untuk mengoptimalkan bahan bakar biogas tanpa harus melakukan proses pemurnian yang rumit. Pemurnian yang dimaksud adalah kandungan biogas dengan kandungan-kandungan pengotor lain seperti gas CO₂.

Tsuji (1982), 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 bahan bakar, AFR maupun karakteristik reaktan bahan bakar dan oksidator.

Li (2002), Sasongko (2011) meneliti tentang penggunaan *Counterflow burner* dengan menambahkan penggunaan *spray*. Pada Penelitian ini hasilnya dapat mengetahui kestabilan api dan kondisi api padam pada api difusi dengan *Counterflow burner*.

2.2 Biogas

Biogas adalah campuran beberapa gas hasil proses fermentasi dari bahan organik oleh bakteri dalam kondisi tanpa oksigen (*anaerobic process*). Biogas adalah bahan bakar yang dapat diperbaharui (*renewable fuel*) yang dapat dihasilkan secara fermentasi anaerob (*anaerobic digestion*) dengan bantuan bakteri *Methanobacterium sp* (Price dan Cheremisinoff, 1981). Proses pembentukan biogas sangat dipengaruhi oleh mikroba ini. Pertumbuhan bakteri ini akan terhambat dalam konsentrasi oksigen terlarut 0,01 mg/L, maka tidak boleh ada oksigen dalam proses ini. Bakteri ini banyak ditemukan di dalam feses sapi, dasar danau dan perairan payau. Gas yang dihasilkan oleh proses ini antara lain; CH₄ (50%-70%), CO₂ (30%-40%), H₂S (0%-10%), H₂O (0,3%), N₂ (1%-2%), H₂ (5%-10%). Biogas termasuk bahan bakar gas yang memiliki keuntungan pada pembakaran seperti:

- Kondisi pembakaran mudah diatur
- Lebih mudah disalurkan dalam pipa
- Mampu menghasilkan efisiensi tinggi, karena kelebihan udara yang digunakan biasanya sedikit karena udara dan bahan bakar langsung bercampur dan terbakar.

2.2.1 Prinsip Pembentukan Biogas

Proses pembentukan biogas dilakukan secara fermentasi yaitu proses pembentukan gas Metana dalam kondisi anaerob dengan bantuan bakteri anaerob di dalam suatu digester sehingga dihasilkan gas Metana (CH₄) dan gas Karbondioksida (CO₂) yang volumenya lebih besar dari gas Hidrogen (H₂), gas Nitrogen (N₂) dan Asam sulfida (H₂S). Proses fermentasi memerlukan waktu 7 sampai 10 hari untuk menghasilkan biogas dengan suhu optimum 35 °C dan pH optimum pada range 6,4 – 7,9. Bakteri

pembentuk biogas yang digunakan yaitu bakteri anaerob seperti *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* dan *Methanosarcina* (Price dan Cheremisinoff, 1981).

Reaksi pembentukan Metana (Price dan Cheremisinoff, 1981) dari bahan-bahan organik yang dapat terdegradasi dengan bantuan enzim maupun bakteri dapat dilihat sebagai berikut:

- Polisakarida $\xrightarrow{\text{hidrolisis}}$ glukosa $\xrightarrow{\text{glikolisis}}$ asam asetat $\xrightarrow{\text{bakteri metana}}$ $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2$
- Gliserol $\xrightarrow{\text{fosforilasi}}$ asam asetat $\xrightarrow{\text{bakteri metana}}$ $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2$
- Lemak $\xrightarrow{\text{hidrolisis}}$ asam lemak $\xrightarrow{\beta\text{-oksidasi}}$ asam asetat $\xrightarrow{\text{bakteri metana}}$ $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2$
- Protein $\xrightarrow{\text{hidrolisis}}$ asam amin $\xrightarrow{\text{deaminasi}}$ asam asetat $\xrightarrow{\text{bakteri metana}}$ $\text{CH}_4 + \text{CO}_2 + \text{H}_2$

Secara umum, reaksi pembentukan CH_4 adalah :



Sebagai contoh, pada pembuatan biogas dari bahan baku kotoran sapi yang banyak mengandung selulosa. Bahan baku dalam bentuk selulosa akan lebih mudah dicerna oleh bakteri anaerob. Reaksi biokimia pembentukan CH_4 dari kotoran sapi:



Potensi biogas yang bisa dihasilkan tergantung dari bahan yang dipakai untuk menghasilkan biogas. Biogas adalah gas yang dapat dihasilkan dari fermentasi feces (kotoran ternak ke dalam suatu tangki kedap udara yang disebut *digester* (pencerna). Didalam *digester* tersebut kotoran dicerna dan difermentasi oleh bakteri yang menghasilkan gas metana serta gas-gas lain seperti pada **Tabel 2.1** dibawah.

Tabel 2.1 Komposisi pada Biogas

No	Nama Gas	Rumus Kimia	Jumlah
1	Metana	CH_4	54% - 70%
2	Karbon dioksida	CO_2	27% - 45%
3	Nitrogen	N_2	3% - 5%
4	Hidrogen	H_2	1% - 0%
5	Karbon monooksida	CO	0,1%
6	Oksigen	O_2	0,1%
7	Hidrogen Sulfida	H_2S	<1%

Sumber : L. Widiarto dan Sudarto, 1997

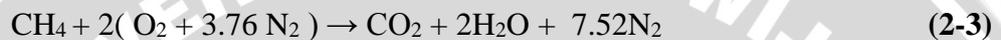
Gas yang timbul dari proses ini kemudian ditampung di dalam digester. Penumpukan produksi gas akan menimbulkan tekanan sehingga dapat disalurkan ke

rumah melalui pipa. Gas yang dihasilkan tersebut dapat dipakai untuk memasak dengan kompor gas. Gas yang dihasilkan ini sangat baik untuk pembakaran karena mampu menghasilkan panas yang cukup tinggi, apinya berwarna biru, tidak berbau dan tidak berasap sehingga kebersihan rumah tetap terjaga.

2.2.2 Karakteristik gas yang terkandung dalam biogas

a. Metana (CH₄)

Metana adalah hidrokarbon paling sederhana yang berbentuk gas dengan rumus kimia CH₄. Metana murni tidak berbau. Di dalam dunia industri untuk memudahkan dalam mendeteksi jika ada kebocoran biasanya diberi bau-bauan. Rumus reaksi kimia reaksi dari Metana dapat ditulis sebagai berikut :



Adapun sifat dari metana adalah sebagai berikut:

Densitas pada 25°C	:	0.6604 kg/m ³
Molar mass	:	16.043 kg/kmol
C _v	:	2.2537 kJ/kg.K
C _p	:	1.7354 kJ/kg.K

b. Karbondioksida (CO₂)

Suatu senyawa yang berbentuk gas pada suhu kamar (25⁰C), tak menyala dan tak berbau. Gas Karbondioksida memiliki beberapa manfaat diantaranya adalah sebagai bahan untuk memadamkan api pada pemadam kebakaran, karena gas Karbondioksida yang disemburkan melalui selang akan segera menyelimuti api sehingga api tidak akan kontak langsung dengan Oksigen dan api akan berhenti. Berikut sifat dari gas Karbondioksida:

Densitas pada 25°C	:	1.6658 kg/m ³
Molar mass	:	44.01 kg/kmol
C _v	:	0.846 kJ/kg.K
C _p	:	0.657 kJ/kg.K

c. Nitrogen (N₂)

Sekitar 78% volume udara tersusun atas gas Nitrogen. Unsur Nitrogen merupakan unsur utama dalam keadaan bebas sebagai gas N₂ di udara. Sifat Nitrogen yang sukar bereaksi menyebabkan Nitrogen sering dimanfaatkan pada proses pemanasan logam agar selama proses tidak ada Oksigen yang ikut masuk,

dimana sifat dari Oksigen adalah korosif terhadap logam. Berikut merupakan sifat dari Nitrogen:

Densitas pada 25°C	:	1.1513 kg/m ³
Molar mass	:	28.013 kg/kmol
Cv	:	0.74 kJ/kg.K
Cp	:	1.040 kJ/kg.K

d. Oksigen (O₂)

Oksigen adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau dan tidak mempunyai rasa. Udara mengandung 21% Oksigen. Oksigen membantu pembakaran dan menopang kehidupan. Oksigen berkonsentrasi tinggi akan mengaktifkan pembakaran, menyebabkan suhu naik atau bahkan meledak. Oksigen 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 Oksigen.

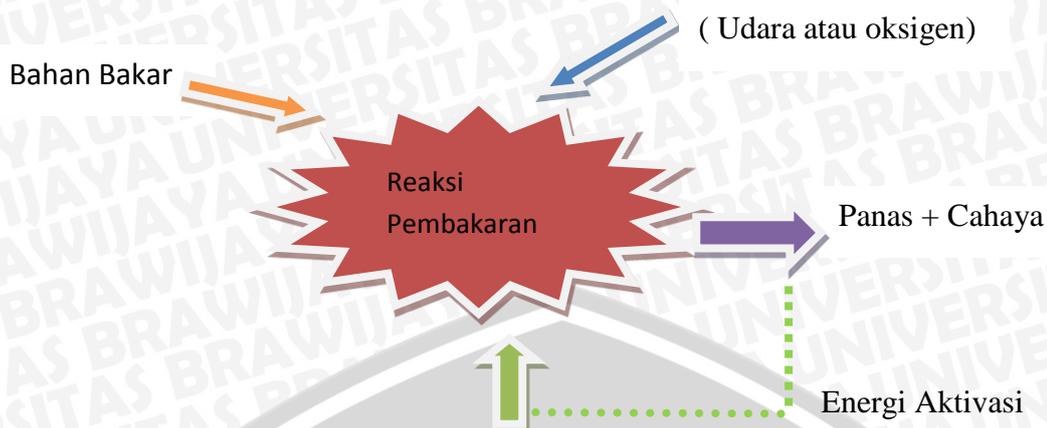
Densitas pada 25°C	:	1.31725 kg/m ³
Molar mass	:	32.06 kg/kmol
Cv	:	0.661 kJ/kg.K
Cp	:	0.918 kJ/kg.K

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 Karbon, Oksigen, Nitrogen dan Sulfur. Sedangkan oksidator adalah segala bentuk yang mengandung oksigen (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 :

- Bahan bakar
- Pengoksidasi (oksigen atau udara)
- Panas atau energi aktivasi

Pengoksidasi



Gambar 2.1 Ilustrasi proses Pembakaran

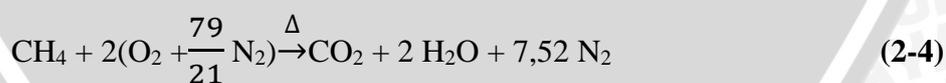
Sumber : Wardana (2008:1)

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.

Namun, jika di dalam proses pembakaran tersebut kekurangan jumlah oksigen maka akan terjadi pembakaran tidak sempurna. Pada pembakaran tidak sempurna dapat mengakibatkan tidak terbakarnya bahan bakar serta dapat juga terbentuk CO. Sedangkan jika jumlah oksigen sesuai dengan jumlah bahan bakarnya maka akan terjadi pembakaran sempurna. Pada 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.



Reaktan

Produk

Untuk pembakaran tidak sempurna, maka akan terbentuk CO, CO₂, dan H₂O pada bagian produk. Juga sering terbentuk hidrokarbon tak jenuh, kadang juga terdapat karbon 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 pengoksidasian bereaksi secara kimia untuk menjadi berbagai produk. Pada proses pembakaran selalu membutuhkan oksigen sebagai oksidatornya, sedangkan Oksigen sendiri didapat dari udara, dimana udara terdiri dari Oksigen, Nitrogen, Argon, Karbon dioksida, Uap air dan sejumlah gas dalam bagian yang cukup kecil. Komposisi dari udara kering dapat dilihat pada **Tabel 2.4**.

Tabel 2.4 Komposisi Udara kering

Udara	Proporsi	Proporsi
	Volume %	Massa %
Nitrogen	78,08	75,52
Oksigen	20,95	23,14
Argon	0,93	1,28
CO ₂	0,03	0,05

Sumber : Bayong (2004)

Untuk memudahkan perhitungan dalam reaksi pembakaran, maka untuk Oksigen dapat diasumsikan sebesar 21% dan 79% untuk Nitrogen. 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 :

$$(AFR)_{\text{stoik}} = \left(\frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{bahan bakar}}} \right)_{\text{stoik}} \quad (2-6)$$

$$(AFR)_{\text{stoik}} = \left(\frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{bahan bakar}}} \right)_{\text{stoik}} \quad (2-7)$$

2.3.3 Udara berlebih dan Udara Teoritis

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

$$\lambda = \frac{AFR_{\text{aktual}} - AFR_{\text{stoik}}}{AFR_{\text{stoik}}} \times 100 \% \quad (2-8)$$

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 :

a = Jumlah udara teoritis

a = 1 apabila dipergunakan udara stoikiometri

$a > 1$ apabila dipergunakan udara berlebih

$a < 1$ apabila kekurangan udara

2.3.4 Rasio Ekuivalen (*Equivalent Ratio, Φ*)

Metode ini termasuk juga metode yang umum digunakan. Rasio ekuivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio bahan bakar-udara (AFR) aktual, untuk persamaan dapat dilihat pada persamaan (2-12) sebagai berikut :

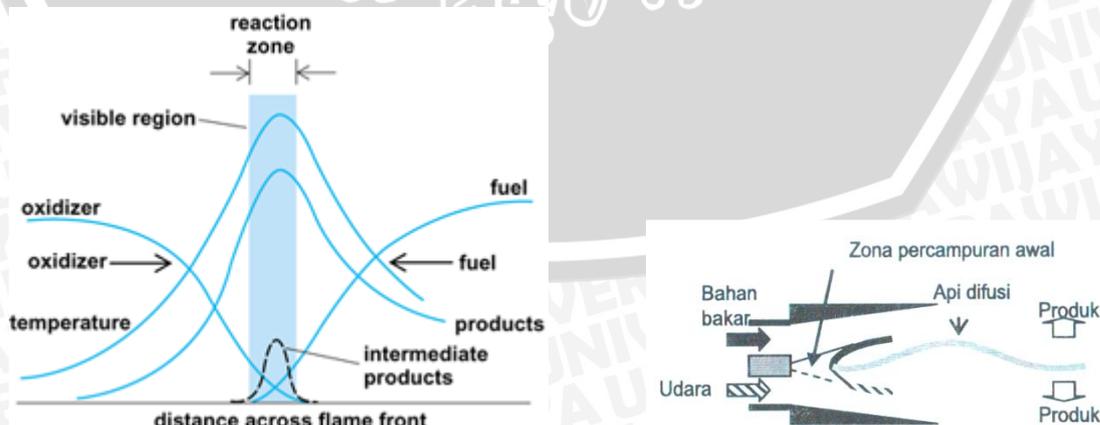
$$\Phi = \frac{AFR \text{ stoik}}{AFR \text{ aktual}} \quad (2-10)$$

Rasio ekuivalen umumnya digunakan untuk menentukan apakah campuran udara dengan bahan bakar merupakan campuran kaya, miskin, atau stoikiometri.

- $\Phi > 1$ terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*)
- $\Phi < 1$ campurannya disebut sebagai campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*)
- $\Phi = 1$ merupakan campuran stoikiometrik (pembakaran sempurna)

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 2.2 Struktur api difusi

Sumber: Wardana:2008

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 (oksigen) 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.

2.4.1 Struktur Aliran Reaktan Api Difusi

Beberapa penelitian menerangkan bahwa dinamika vorteks hasil pada struktur api non-premiks yang bertujuan untuk menstabilkan proses pembakaran (Takeshi, 2004). Dinyatakan bahwa struktur aliran api sangatlah berpengaruh terhadap kestabilan aliran. Penstabilan aliran adalah vorteks-vorteks yang akan mendominasi proses pembakaran. Ada 2 macam mixing aliran reaktan yang diteliti yaitu *unburned gas* (aliran reaktan pada kondisi tidak menyala) dan *burned gas* (aliran reaktan pada kondisi nyala). John W. Daily, 1988, meneliti mengenai struktur aliran pada 2 kondisi tersebut, dan disimpulkan bahwa pola *mixing* aliran pada kedua kondisi tersebut adalah sama. Artinya pembakaran tidak mempunyai pengaruh besar terhadap pola *mixing* aliran reaktan.

2.5 Karakteristik Nyala Api

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. Pemunculan nyala api ini juga memiliki kisaran batas bawah atau biasa disebut campuran termiskin maupun kisaran batas atas atau biasa disebut campuran terkaya. Kisaran batas bawah terjadi jika pada kondisi campuran awal minimal akan terjadi nyala api kecil. Sedangkan untuk kisaran batas atas, jika dari kisaran batas bawah ditambahkan kembali aliran bahan bakar maka yang terjadi adalah nyala api akan berhenti menyebar. 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.

2.5.2 Warna Api

Perbedaan warna api bisa dipengaruhi karena adanya perbedaan perbandingan campuran udara dan bahan bakar. Perbandingan campuran yang sempurna adalah yang sesuai dengan stokiometri, dan bila tidak sesuai maka api yang terbentuk adalah diantara api campuran kaya atau api campuran miskin. Hal ini dapat diketahui dengan membandingkan *equivalent ratio* udara-bahan bakar (Φ), dimana jika $\Phi < 1$ maka akan terbentuk api campuran miskin, ketika $\Phi = 1$ terbentuk api stokiometri dan saat $\Phi > 1$ akan terbentuk api campuran kaya. Jika dilihat pada pengaruh campuran bahan bakar udara pada pengujian di bunsen *burner* maka akan terlihat api campuran miskin berwarna merah dan berjelaga dan pada api campuran kaya terbentuk api berwarna biru atau lebih terang. Hal ini juga mempengaruhi temperatur api dimana api yang berwarna lebih terang memiliki temperatur lebih tinggi.

2.5.3 Lebar Api

Lebar api berbanding lurus dengan aliran massa bahan bakar dan berbanding terbalik dengan difusivitas molekuler, dimana ini dibahas secara lebih rinci tentang lebar api difusi oleh Dederichs (2004). Selain dipengaruhi oleh laju aliran massa bahan bakar panjang api juga dipengaruhi oleh fraksi bahan bakar pada permukaan api dan fraksi bahan bakar pada sumbu nosel. Semakin besar konsentrasi bahan bakar di sumbu nosel juga membuat api semakin lebar dan sebaliknya. Semakin kecil fraksi stokiometri pada permukaan api maka semakin lebar api, sebab semakin banyak udara yang disuplai untuk setiap kilogram bahan bakar.

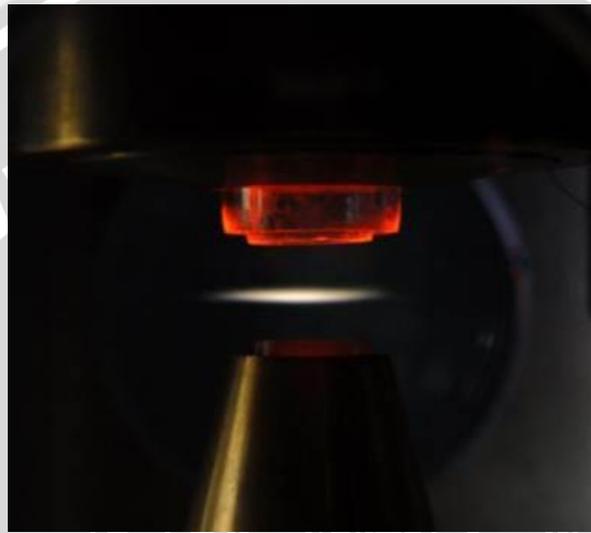
2.6 Inhibitor

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. Makin tinggi tingkat penguraian molekul inhibitor dan konsentrasi inhibitor akan makin memperlambat laju reaksi pembakaran (Karim, G.A. 1998)

2.7 Counter Flow Diffusion Flame

Keuntungan dengan menggunakan *counterflow diffusion burner* menurut Tsuji (1982) adalah *counterflow diffusion burner* merupakan metode yang cocok digunakan

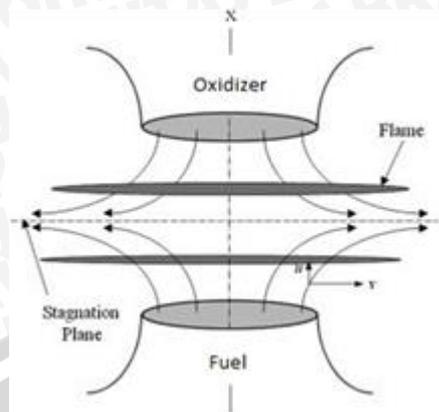
untuk mempelajari secara rinci struktur api difusi, memperkirakan laju reaksi keseluruhan untuk kombinasi tiap-tiap bahan bakar dan oksidator, dan dapat mengetahui efektivitas dari inhibitor dalam pembakaran. Hal ini juga diperkuat dari Li, (2002), dan Sasongko (2011) bahwa dengan menggunakan *counterflow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



Gambar 2.4 Nyala api pada *counterflow burner*

Sumber : Particle And Combustion Engineering, Tsinghua University

Pada skema *counter flow diffusion flame*, aliran bahan bakar berasal dari nosel bawah dan udara sebagai oksidan dari nosel atas. Nyala api stagnansi akan dihasilkan pada posisi *stagnation plane*. Biasanya terbentuknya api yang paling stabil akan didapatkan jika volume aliran antara bahan bakar dan oksidan sama besar, dan juga dengan menambahkan nitrogen atau gas inert pada bahan bakar dan oksidan dengan jumlah yang proporsional. Variabel-variabel yang biasanya digunakan adalah debit aliran antara bahan bakar dan oksidan dan juga jarak antara masing-masing nosel (*burner gap*).



Gambar 2.5 Skematik *Counterflow flame burner*

Sumber: Soo Kim Jeong, dkk. 5717-5728:2011

Penelitian sebelumnya dari Tsuji (1982) di jelaskan pula bahwa untuk api difusi dengan aliran laminar tipe counterflow dengan dua arah nosel berslawanan sangat cocok untuk mempelajari karakteristik pembakaran yang juga berhubungan dekat dengan fenomena padamnya api. Api pada metode ini juga dapat digunakan untuk mengamati kekuatan api pada berbagai variasi bahan bakar dan oksidator, efek dari inhibitor dan juga efek dari pengaruh medan elektrik pada kekuatan api.

2.8 Hipotesis

Hipotesisnya adalah semakin besar kandungan CO_2 pada bahan bakar maka karakteristik yang terjadi pada api adalah api semakin berjelaga dan warna semakin gelap. Hal ini dikarenakan kandungan gas CO_2 sebagai gas inert dan inhibitor akan menahan asupan gas oksigen pada saat pembakaran berlangsung maka api yang timbul adalah api kaya (api dengan kandungan bahan bakar lebih banyak dari oksidatornya).

Dan pada karakteristik lebar api akan ditemukan bentuk api yang lebih lebar pada debit aliran yang lebih besar dari oksidator maupun bahan bakar. Selain itu akan terlihat pula perubahan posisi api yang sedikit bergeser dari *stagnation plane* seiring dengan perubahan pada jumlah debit aliran.

Untuk pengaruh batas O_2 minimum atau *extinction* pada nyala api yang akan terjadi adalah api akan memiliki batas minimum mampu nyala dengan YO_2 yang lebih rendah pada bahan bakar tanpa campuran CO_2 dari pada bahan bakar yang dicampur oleh CO_2 .

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 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 sehingga dapat mengetahui pengaruh konsentrasi CO₂ terhadap karakteristik api pembakaran difusi CH₄-CO₂ pada *Counterflow Burner*.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel bebas

Variabel yang besarnya bebas ditentukan peneliti dan tidak dipengaruhi oleh variabel yang lain. Variabel bebas dalam penelitian yaitu :

- Konsentrasi O₂ pada Oksidator (YO₂)
- Konsentrasi gas Karbondioksida (CO₂) pada campuran bahan bakar mulai 0%, 10%, 20%, 30%, 40% dan 50%.
- Variasi debit bahan bakar sebagai data pembanding.

2. Variabel terikat

Variabel yang besarnya tergantung dari nilai variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah perilaku nyala api difusi yang meliputi warna api, lebar api, dan konsentrasi minimum oksigen pada kondisi api padam.

3. Variabel terkontrol

Parameter yang dijaga tetap selama pengujian adalah :

- Temperatur lingkungan dijaga konstan 25 °C;
- Kandungan biogas (Metana) 95%;
- Pipa *Counterflow flame burner* yaitu diameter pipa bagian dalam 1 inch dan bagian luar 1,5 inch;
- Tekanan gas yang dimasukkan ke ruang bakar *Counterflow flame burner* sebesar 0,5 bar;
- Jarak antar pipa *Counterflow flame burner* adalah 20 mm.

3.3 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Ruang bakar model *Counter-flow flame*.

Pipa *Counterflow flame burner* yaitu diameter pipa bagian dalam 1 inch dan bagian luar 1,5 inch. Panjang pipa bagian dalam adalah 75 cm dan pipa bagian luar adalah 40 cm.



Gambar 3.1 Ruang bakar model *Counterflow Flame*.

2. Pemantik



Gambar 3.2 Pemantik.

3. Kamera Video

Alat ini digunakan untuk mengambil atau merekam gambar perambatan api hasil pembakaran yang terjadi sehingga dapat digunakan untuk analisa visual. Dengan data spesifikasi sebagai berikut:

- a. Sensor : Sensor 16.2 MP, CMOS, APS-C
- b. Merk : Nikon D5000
- c. *Movie resolution* : HD movie, 1080p – 24fps / 720p – 30fps, H.264 codec.

- d. *ISO range* : ISO 100 - 6.400, expandable to 25.600



Gambar 3.3 Kamera Video

4. Regulator gas

Regulator digunakan untuk menurunkan tekanan dari tabung gas ke tekanan masuk pipa yang diinginkan.



Gambar 3.5 Regulator CO₂; Regulator O₂; Regulator N₂.

5. *Flowmeter gas*

Digunakan sebagai pengukur debit aliran yang masuk dalam pipa *Counterflow Burner*.



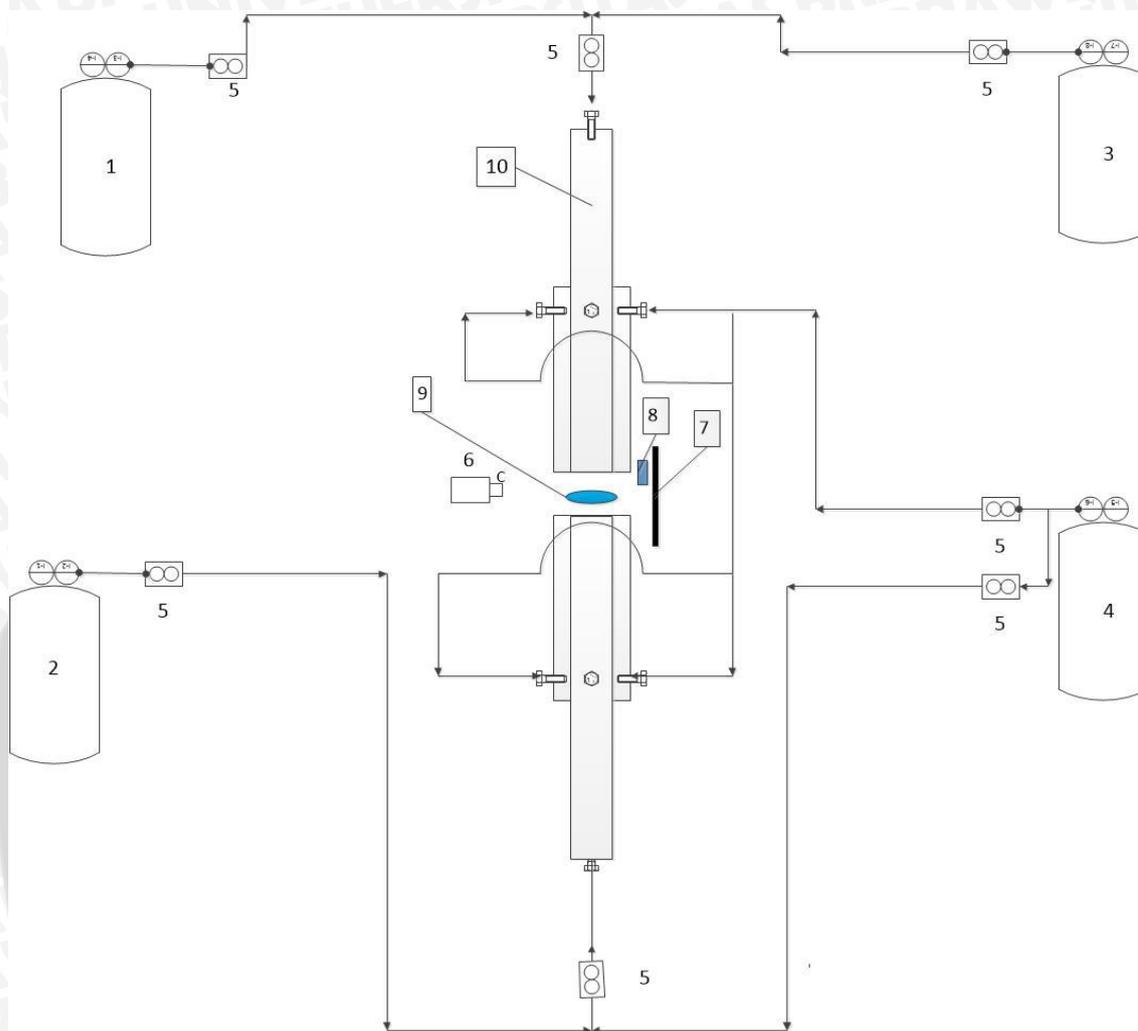
Gambar 3.7 Flowmeter gas

3.4 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

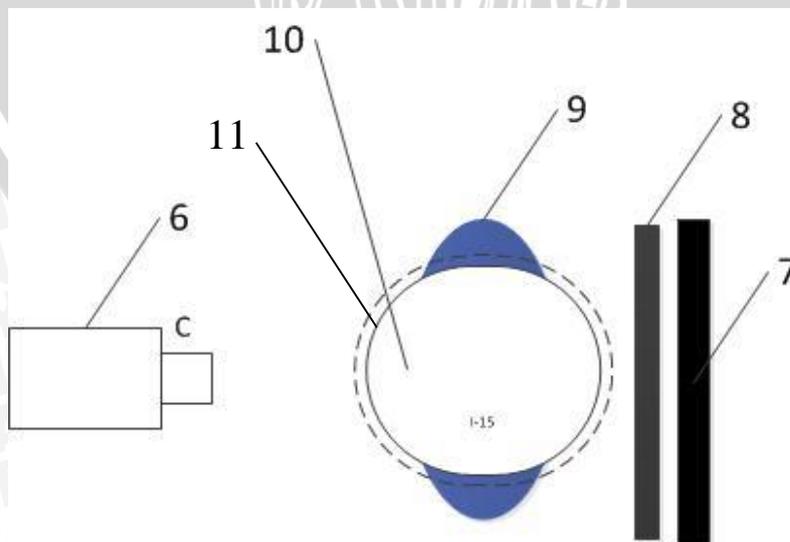
Penelitian dilakukan di Laboratorium Motor Bakar Teknik Mesin Universitas Brawijaya pada bulan September 2013 sampai dengan selesai.

3.5 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 CH₄
2. Tabung gas O₂
3. Tabung gas CO₂
4. Tabung gas N₂
5. *Flowmeter*
6. Kamera Video Digital
7. Kertas karton hitam sebagai *background* foto
8. Penggaris
9. Api difusi
10. Pipa *counterflow flame burner* bagian dalam
11. Pipa *counterflow flame burner* bagian luar

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 dari 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.

3.6 Metode Pengambilan Data

Untuk pembakaran difusi, bahan bakar biogas yang digantikan oleh campuran CH₄ dan gas CO₂ sebagai zat pengotor dialirkan dari pipa konsentrik sebelah atas, sedangkan gas oksigen dan nitrogen sebagai oksidator dialirkan dari pipa bagian bawah.

Kamera digital NIKON D5000 dipasang sejajar dengan nyala api untuk melihat karakteristik nyala api. Pengambilan gambar nyala api harus dilakukan dengan kondisi lingkungan yang gelap agar gambar yang dihasilkan benar-benar gambar dari api tersebut tanpa ada pengaruh cahaya dari luar. Karena salah satu karakteristik yang penting yang ingin diamati dalam penelitian ini adalah karakteristik warna api sebagai efek dari pengaruh gas CO₂ dalam pembakaran CH₄-CO₂.

Untuk proses pengambilan data :

1. Atur jarak antar pipa *counterflow* sesuai dengan jarak yang telah ditentukan;
2. Kemudian alirkan gas CH_4 dari pipa bagian atas dan oksigen dari pipa bagian atas bawah secara bersamaan sedikit demi sedikit;
3. Setelah bercampur di wilayah stagnansi pemantik dinyalakan;
4. Setelah api dinyalakan alirkan gas CO_2 dan N_2 sedikit demi sedikit kedalam masing-masing saluran sesuai skema diatas. Sebelum dimulai penelitian dan pengambilan data, massa alir masing-masing gas harus disesuaikan dengan variabel penelitian yang telah ditentukan. Proses pengambilan data dibagi menjadi dua tahapan sebagai berikut :
 - a. Pengambilan foto warna dan lebar api dilakukan oleh kamera digital yang diletakan 20 cm dari pusat api dan horizontal dengan api difusi. Setiap penurunan konsentrasi gas oksigen maupun CO_2 (variabel penelitian) dilakukan proses pengambilan gambar untuk mengetahui evolusi perubahan warna api dan lebar api akibat pengaruh dari kedua gas tersebut (dalam hal ini kedua gas tersebut adalah zat pengotor dalam kandungan biogas yang sesungguhnya);
 - b. Tahapan yang terakhir dari proses pengambilan data karakteristik pembakaran $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ adalah mengetahui oksigen minimum yang diperlukan oleh api campuran CH_4 dan CO_2 agar api masih bisa dipertahankan sebelum api padam. Pengambilan data dilakukan dengan cara mengurangi debit O_2 secara perlahan diiringi dengan menaikkan debit N_2 secara perlahan pula hingga api padam, hal ini dilakukan di tiap variasi CO_2 . Dari beberapa data tentang konsentrasi minimum oksigen pada saat api padam untuk beberapa variasi konsentrasi CO_2 dalam campuran bahan bakar CH_4 dan CO_2 , nantinya dapat digambarkan grafik kestabilan nyala api campuran bahan bakar CH_4 dan CO_2 pada beberapa variasi kandungan gas CO_2 sebagai pengotor bahan bakar $\text{CH}_4\text{-CO}_2$.
5. Setelah data terkumpul dilakukan pengulangan tiga kali dan hal ini dilakukan pula untuk mengumpulkan data pada dua variasi debit lainnya.

3.7 Metode Pengolahan Data

Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan dengan cara:

1. Untuk pengambilan data karakteristik api (warna dan lebar api) dilakukan dengan cara melihat wana api dan mengukur lebar api pada hasil foto dengan melihat skala pada perbandingan antara diameter pipa sesungguhnya dengan diameter pipa pada foto yang dimana hal ini yang dijadikan acuan dalam penskalaan lebar api. Cara pengukuran foto sendiri digunakan *software* Coreldraw untuk mengolah hasil foto agar dapat diketahui dengan rinci ukuran lebar api pada foto maupun kondisi aslinya;
2. Untuk pengambilan data batas mampu nyala api dilakukan dengan cara mencatat aliran pada seluruh *flowmeter* setiap percobaan pada masing-masing variasi. Dengan mencatat aliran pada percobaan tiap variasi maka akan diketahui pula kandungan oksigen minimum pada nyala api. 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 Pada kondisi 25°C, tekanan 1 atm.:

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

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

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

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

(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:

$$Y_{O_2} = \frac{\dot{m}_{O_2}}{\dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{N_2}} \quad (3-2)$$

Dimana:

Y_{O_2} = Menunjukkan perbandingan konsentrasi O_2 terhadap campuran gas pada oksidator

\dot{m}_{O_2} = Massa alir dari O_2 [kg/s]

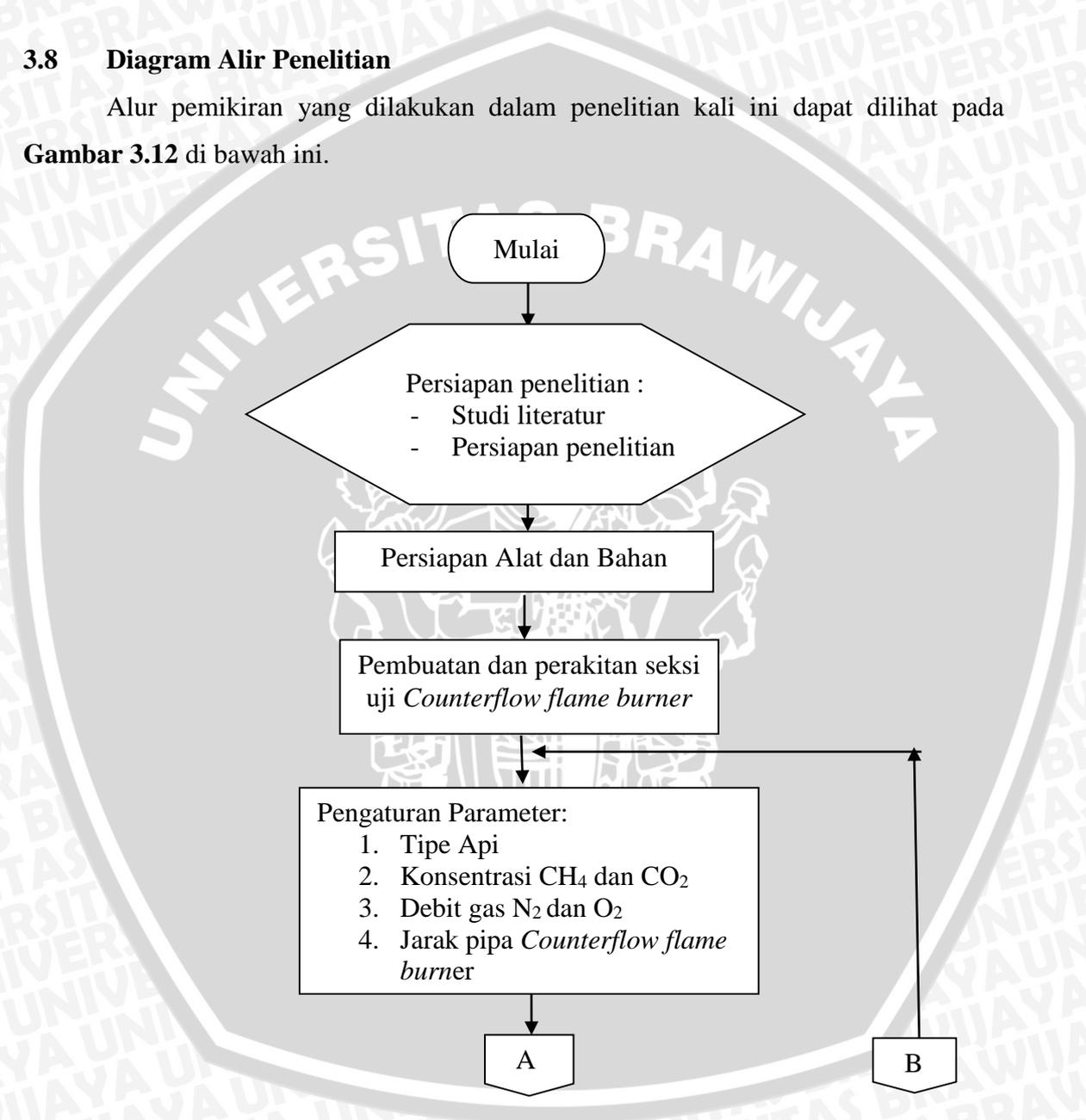
\dot{m}_{N_2} = Massa alir dari N_2 [kg/s]

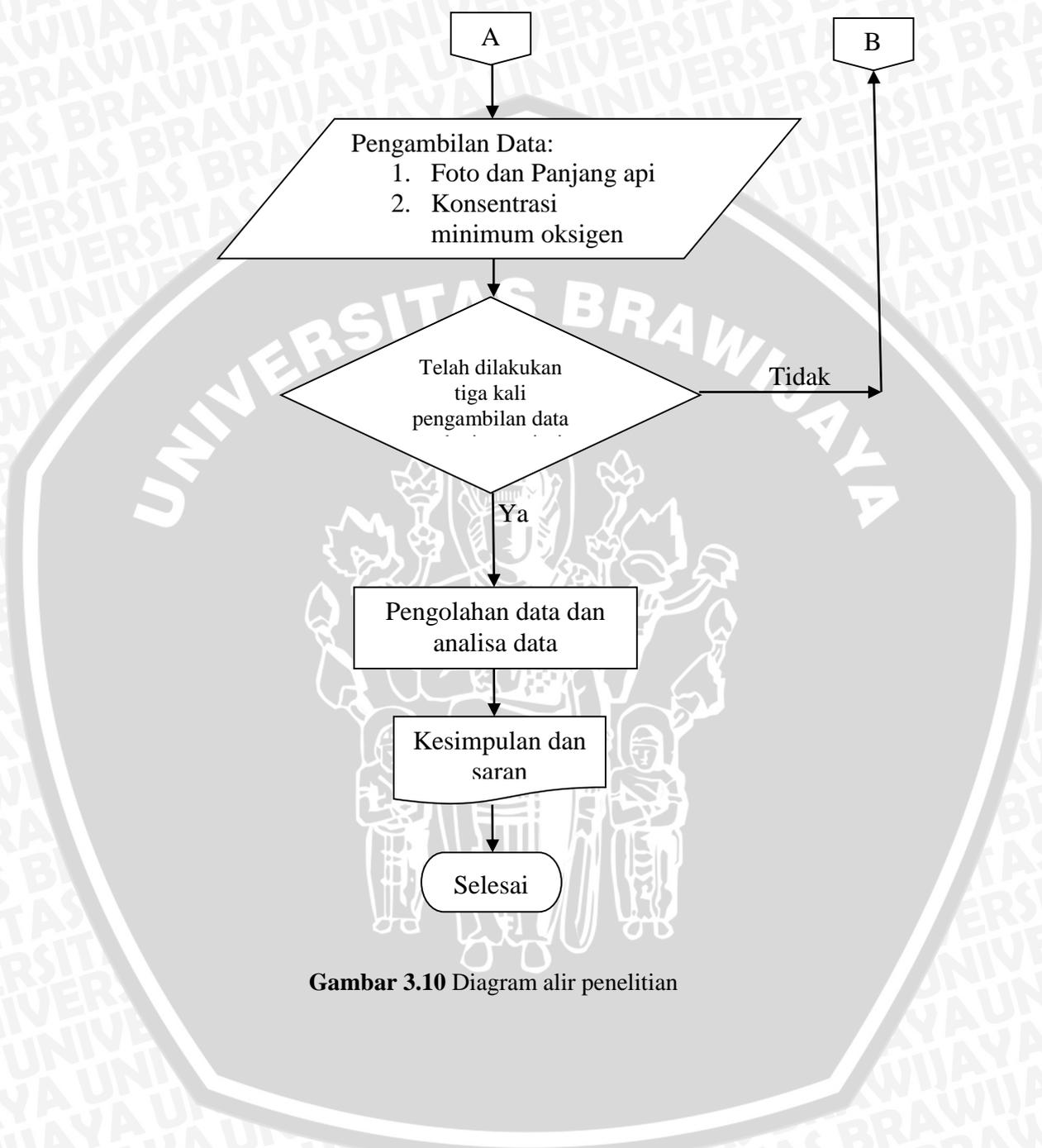
(Sumber : Hiroshi Tsuji “*Journal of counterflow diffusion flames*” 1982:17)

Setelah didapat data YO_2 , data dikumpulkan menjadi satu ke dalam tabel. Selanjutnya data diolah dengan menggunakan *software* Microsoft Excel untuk dibuat grafik untuk melihat pengaruh akibat variasi konsentrasi CO_2 pada bahan bakar.

3.8 Diagram Alir Penelitian

Alur pemikiran yang dilakukan dalam penelitian kali ini dapat dilihat pada **Gambar 3.12** di bawah ini.





Gambar 3.10 Diagram alir penelitian

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Hasil Penelitian

4.1.1 Data Lebar Api

Pengambilan data dilakukan dengan berbagai variasi konsentrasi CO₂ pada bahan bakar yaitu sebesar 0%, 10%, 20%, 30%, 40% dan 50% dan dilakukan pada tiga *sample* debit aliran bahan bakar yaitu 4 LPM, 8 LPM dan 12 LPM. Pada penelitian ini dipilih YO₂ sebesar 0.314; 0.276 dan 0.233 dikarenakan pada variasi tersebut terlihat cukup jelas perubahan bentuk dan warna api di setiap variasi CO₂ dan juga pada bebit bahan bakar yang telah ditentukan sebelumnya.

Berikut akan disajikan data tentang lebar api. **Tabel 4.1** merupakan data lebar api pada kondisi YO₂ sebesar 0.314 dengan debit bahan bakar sebesar 4 LPM (Liter per Menit) untuk lebar api biru, sedangkan **Tabel 4.2** merupakan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan dalam centimeter (cm).

Tabel 4.1 Lebar Api Biru

Konsentrasi CO ₂ Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.18	4.29	4.3	4.36	4.42	4.89

Tabel 4.2 Lebar Api Kuning

Konsentrasi CO ₂ Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.34	4.29	4.38	4.33	4.25	4.46

Tabel 4.3 menunjukkan data lebar api biru pada kondisi YO₂ sebesar 0.276 dengan debit bahan bakar sebesar 4 LPM (Liter per Menit), sedangkan **Tabel 4.4** menunjukkan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan dalam centimeter (cm).

Tabel 4.3 Lebar Api Biru

Konsentrasi CO ₂ Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.17	4.17	4.18	4.11	4.12	4.471

Tabel 4.4 Lebar Api Kuning

Konsentrasi CO ₂ Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.19	4.18	4.0	4.1	3.80	3.66

Tabel 4.5 menunjukkan data lebar api biru pada kondisi YO_2 sebesar 0.233 dengan debit bahan bakar sebesar 4 LPM (Liter per Menit), sedangkan **Tabel 4.6** menunjukkan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan dalam centimeter (cm).

Tabel 4.5 Lebar Api Biru

Konsentrasi CO ₂ Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
3.173	4.1	3.97	3.8	4.23	4.26

Tabel 4.6 Lebar Api Kuning

Konsentrasi CO ₂ Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.124	3.751	3.489	3.24	0	0

Berikut akan disajikan data tentang lebar api. **Tabel 4.7** merupakan data lebar api pada kondisi YO_2 sebesar 0.314 dengan debit bahan bakar sebesar 8 LPM (Liter per Menit) untuk lebar api biru, sedangkan **Tabel 4.8** merupakan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan dalam centimeter (cm).

Tabel 4.7 Lebar Api Biru

Konsentrasi CO ₂ Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.21	4.27	4.40	4.37	4.40	4.40

Tabel 4.8 Lebar Api Kuning

Konsentrasi CO ₂ Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.36	4.3	4.3	4.18	4.26	4.0

Tabel 4.9 menunjukkan data lebar api biru pada kondisi YO_2 sebesar 0.276 dengan debit bahan bakar sebesar 8 LPM (Liter per Menit), sedangkan **Tabel 4.10** menunjukkan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan dalam centimeter (cm).

Tabel 4.9 Lebar Api Biru

Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.21	4.19	4.3	4.2	4.3	4.28

Tabel 4.10 Lebar Api Kuning

Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.18	4.17	4.2	4.12	3.9	3.8

Tabel 4.11 menunjukkan data lebar api biru pada kondisi YO_2 sebesar 0.233 dengan debit bahan bakar sebesar 8 LPM (Liter per Menit), sedangkan **Tabel 4.12** menunjukkan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan dalam centimeter (cm).

Tabel 4.11 Lebar Api Biru

Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
3.87	3.85	4.04	3.97	4.00	3.87

Tabel 4.12 Lebar Api Kuning

Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.0	3.75	3.55	4.48	3.47	0

Berikut akan disajikan data tentang lebar api. **Tabel 4.13** merupakan data lebar api pada kondisi YO_2 sebesar 0.314 dengan debit bahan bakar sebesar 12 LPM (Liter per Menit) untuk lebar api biru, sedangkan **Tabel 4.14** merupakan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan dalam centimeter (cm).

Tabel 4.13 Lebar Api Biru

Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.4	4.07	4.39	4.39	4.39	4.4

Tabel 4.14 Lebar Api Kuning

Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.435	4.25	4.203	4.0	3.92	3.96

Tabel 4.15 menunjukkan data lebar api biru pada kondisi YO₂ sebesar 0.276 dengan debit bahan bakar sebesar 12 LPM (Liter per Menit), sedangkan **Tabel 4.16** menunjukkan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan dalam centimeter (cm).

Tabel 4.15 Lebar Api Biru

Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.05	3.97	4.02	4.05	4.08	4.061

Tabel 4.16 Lebar Api Kuning

Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
4.1	3.87	3.78	3.83	3.67	0

Tabel 4.17 menunjukkan data lebar api biru pada kondisi YO₂ sebesar 0.233 dengan debit bahan bakar sebesar 12 LPM (Liter per Menit), sedangkan **Tabel 4.18** menunjukkan data lebar api kuning pada parameter yang sama. Satuan dalam centimeter (cm).

Tabel 4.17 Lebar Api Biru

Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
3.71	3.46	3.65	3.76	3.8	3.69

Tabel 4.18 Lebar Api Kuning

Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar					
0%	10%	20%	30%	40%	50%
3.24	0	0	0	0	0

4.1.2 Data Extinction (api padam)

Tabel 4.19 Data Debit O₂ pada Keadaan *Extinct* pada Setiap Variasi Konsentrasi CO₂ dalam satuan LPM

Debit Bahan Bakar	Konsentrasi CO ₂ pada Bahan Bakar					
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
4 LPM	0.75	0.7	0.7	0.8	0.8	0.85
8 LPM	0.7	0.75	0.75	0.8	0.85	0.85
12 LPM	0.75	0.8	0.8	0.85	0.85	0.85

Dalam mempelajari batas api padam nyala difusi counterflow ini, penulis melakukan analisa dengan pendekatan perbandingan antara massa alir oksigen pada massa alir campuran pada oksidator dimana di lambangkan oleh Y_{O_2} .

$$Y_{O_2} = \frac{\dot{m}_{O_2}}{\dot{m}_{O_2} + \dot{m}_{N_2}} \dots\dots\dots (4.1)$$

Dimana:

Y_{O_2} = Perbandingan konsentrasi O₂ terhadap konsentrasi gas campuran O₂+N₂ pada oksidator

\dot{m}_{O_2} = Massa alir O₂ (kg/s)

\dot{m}_{N_2} = Massa alir N₂ (kg/s)

Pada penelitian karakteristik nyala api difusi ini kerapatan (*density*) udara dan bahan bakar dianggap konstan, pada kondisi $T_{\infty} = 300$ K dan $P = 1$ atm

ρ_{O_2} = 1.31725 kg/m³

ρ_{N_2} = 1.1531 kg/m³

ρ_{CH_4} = 0.6604 kg/m³

ρ_{CO_2} = 1.6658 kg/m³

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

Pada **Tabel 4.19** dapat dilihat data sebelum dilakukan pengolahan data. Pengolahan data dilakukan untuk mencari nilai dari YO_2 dengan cara memasukkan nilai yang ada pada **Tabel 4.19** ke dalam rumus (4.1)

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad \dots\dots\dots(4.2)$$

- \dot{m} = Massa alir gas (kg/s)
- Q = Debit gas (m^3/s)
- ρ = Kerapatan udara atau gas (kg/m^3)

Massa alir didapatkan dari debit O_2 pada **Tabel 4.19** yang dikalikan dengan kerapatan udaranya, begitu pula halnya dengan N_2 . Setelah semua data dihitung dengan menggunakan persamaan diatas maka didapatkan data seperti pada **Tabel 4.20**

Tabel 4.20 Data Nilai YO_2 pada Keadaan *Extinct* pada Setiap Variasi Konsentrasi CO_2

Debit Bahan Bakar	Konsentrasi CO_2 pada Bahan Bakar					
	0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %
4 LPM	0.170	0.160	0.160	0.179	0.179	0.188
8 LPM	0.160	0.170	0.170	0.179	0.188	0.188
12 LPM	0.170	0.179	0.179	0.188	0.188	0.188

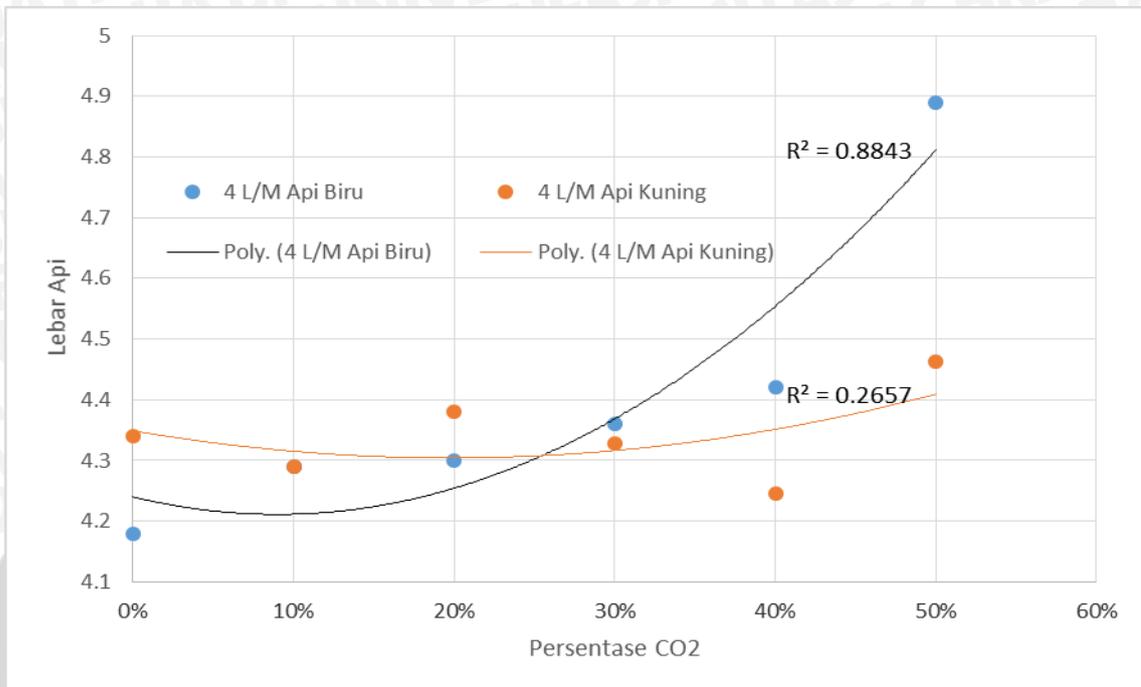
4.1.3 Data Warna Api

Data hasil penelitian berupa foto tiap variasi selengkapny dapat dilihat pada lampiran 1, lampiran 2 dan lampiran 3.

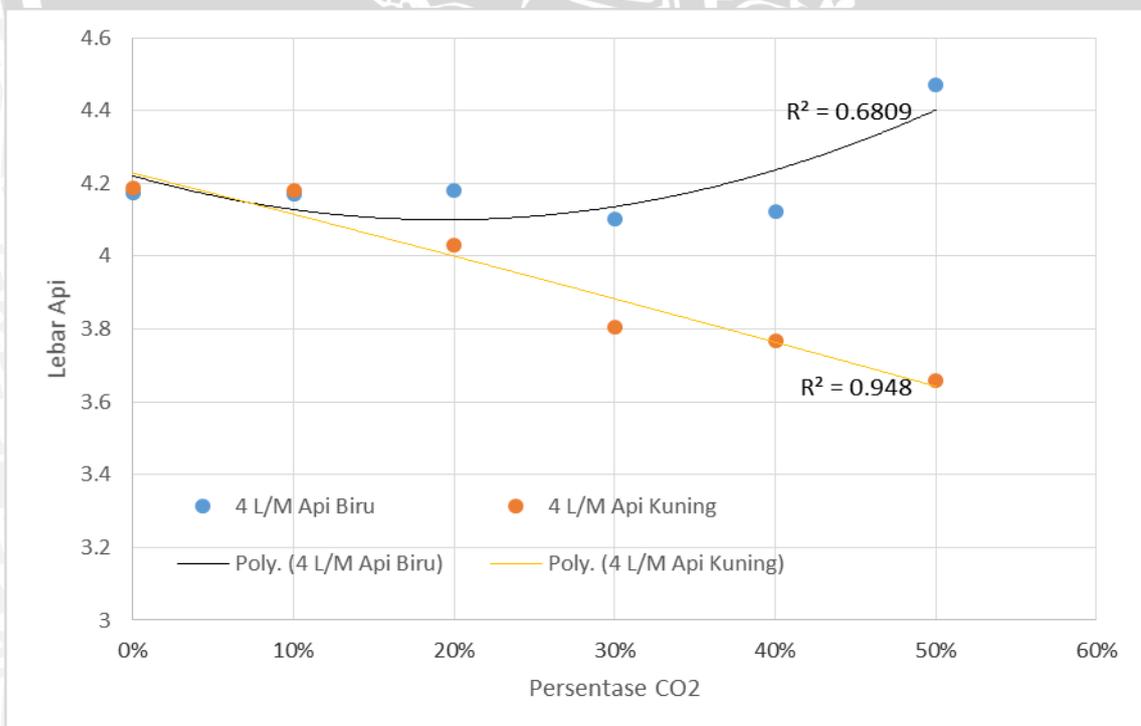


4.2 Pembahasan

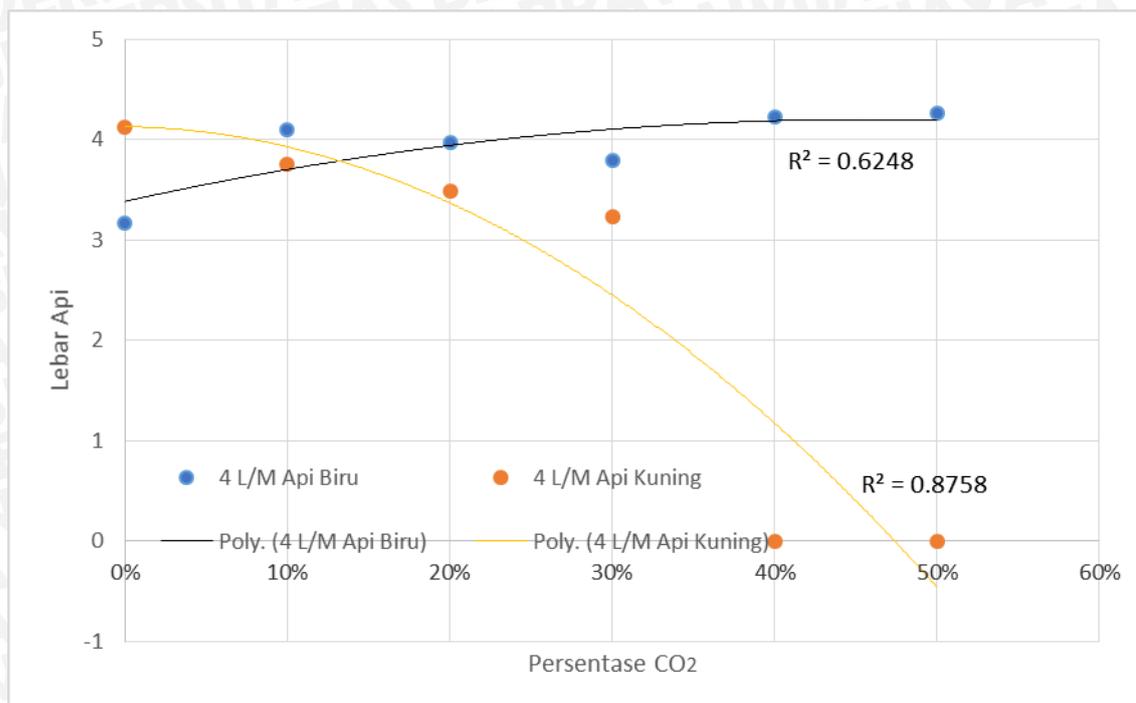
4.2.1 Analisa Grafik Hubungan Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api



Gambar 4.1 Grafik Hubungan Grafik Hubungan Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO₂ 0.314, Debit 4 LPM



Gambar 4.2 Grafik Hubungan Grafik Hubungan Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO₂ 0.276, Debit 4 LPM



Gambar 4.3 Grafik Hubungan Grafik Hubungan Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO₂ 0.233, Debit 4 LPM

Gambar 4.1, Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 di atas menunjukkan grafik pengaruh konsentrasi CO₂ terhadap lebar api pada debit aliran bahan bakar 4 LPM. 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 CH₄ yakni warna api biru dan api kuning. Api biru terjadi karena pada wilayah tersebut masih kaya akan O₂, sedangkan api kuning terjadi karena pada wilayah tersebut kaya akan bahan bakar, sehingga banyak bahan bakar yang belum terbakar sempurna. Pada grafik di **Gambar 4.1, Gambar 4.2 dan Gambar 4.3** terlihat kecenderungan lebar api dari ke dua warna api tersebut semakin meningkat seiring dengan penambahan CO₂ alir dari bahan bakar.

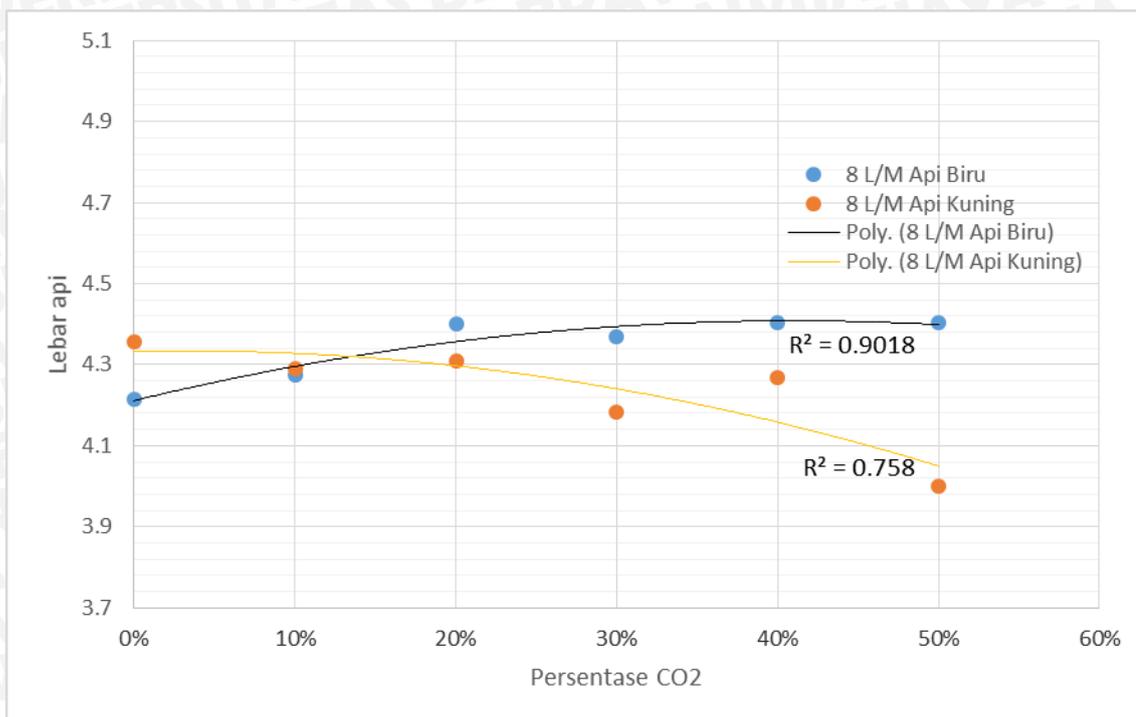
Hal ini telah sesuai dengan teori yang sudah ada bahwa semakin besar konsentrasi CO₂ dalam bahan bakar maka akan terjadi api padam pada YO₂ yang lebih besar dikarenakan asupan bahan bakar yang kurang disaat jumlah oksidator masih banyak, hal ini serupa dengan api miskin dimana ketika jumlah bahan bakar dikurangi terus menerus maka api akan semakin cepat padam maka dari itu api akan cenderung semakin turun dan melebar karena oksidator membutuhkan asupan bahan bakar lebih untuk melangsungkan proses pembakaran.

Dapat dilihat pula lebar api biru pada YO_2 yang tinggi lebih lebar jika dibandingkan dengan YO_2 yang lebih rendah seiring dengan bertambahnya CO_2 . Hal ini terjadi karena di saat jumlah oksigen jauh lebih banyak daripada jumlah bahan bakar menyebabkan bahan bakar bisa dikatakan hampir terbakar seluruhnya oleh oksidator dan hampir tidak ada bahan bakar yang tersisa pada ruang bakar, api akan semakin melebar pada counterflow flame terjadi karena gas bahan bakar yang bertumbukan pada ruang bakar akan mengalir kesamping arah aliran awal, lalu gas bahan bakar yang mengalami tumbukan ini terbakar habis sebelum sampai di garis stagnansi dan keluar dari ruang bakar maka api akan terlihat lebih lebar.

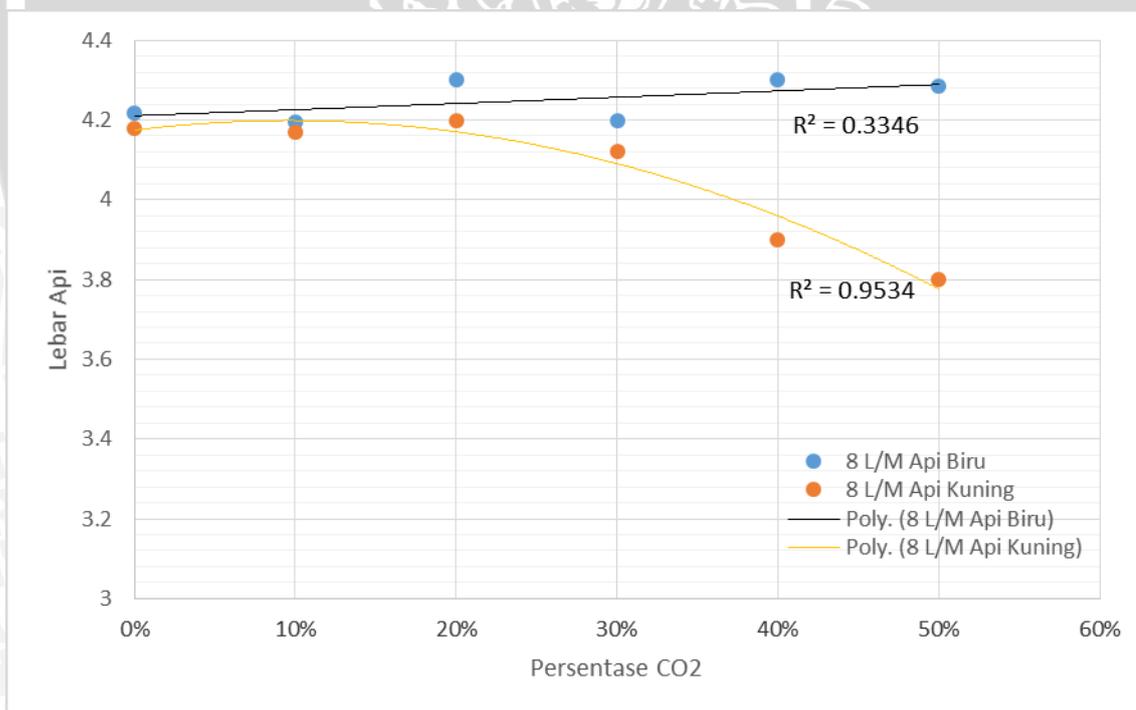
Makin kecilnya $Y O_2$ juga mempengaruhi lebar api kuning, dimana api kuning terlihat memendek dan hilang pada akhirnya seiring dengan penambahan CO_2 pada bahan bakar. Hal ini terjadi karena api kuning pada awalnya terbentuk dari bahan bakar yang belum terbakar habis saat api biru sudah terbentuk, api biru terbentuk karena adanya campuran sesuai stokiometri lalu gas oksidator dan bahan bakar yang masih tersisa akan ikut terbakar dengan kondisi campuran yang tidak stokiometri yang menyebabkan api berwarna kuning. Jika bahan bakar bahan bakar berkurang seiring penambahan CO_2 maka jumlah perbandingan antara oksidator dan bahan bakar akan semakin berbeda jauh yang menyebabkan api tidak lagi mampu menyala, sesuai dengan teori yang menyatakan jika pada api miskin bahan bakar dikurangi terus menerus maka api akan padam.

Dapat dilihat pula ketika konsentrasi CO_2 10% sampai dengan 30% api kuning dan biru hampir sama besar, hal ini mungkin terjadi karena pada jumlah bahan bakar yang banyak disaat konsentrasi tersebut jika dibandingkan dengan jumlah oksidator yang menyebabkan dapat terciptanya api biru dan kuning yang hampir sama besar namun ketika jumlah bahan bakar dikurangi api kuning akan meredup atau berubah menjadi campuran miskin yang nantinya akan padam jika bahan bakar dikurangi terus menerus.

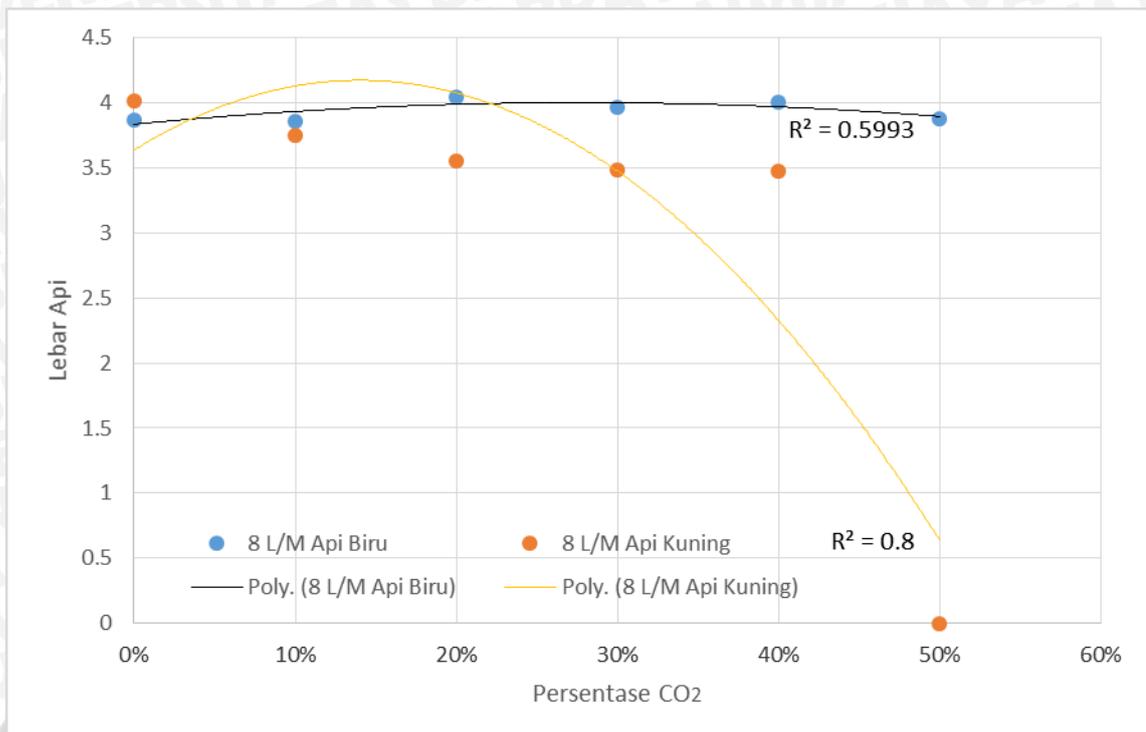
Perlu diperhatikan pula saat api kuning berkurang lebarnya api biru perlahan mengalami peningkatan, hal ini dikarenakan api biru mendapatkan asupan oksidator dan bahan bakar lebih yang menyebabkan terjadi api difusi dengan campuran stokiometri yang volumenya sedikit lebih besar, dan jika mengapa hanya sedikit lebih besar dikarenakan bahan bakar yang masih tersisa yang seharusnya menjadi api kuning akan terbuang karena tidak mampu menyala.



Gambar 4.4 Grafik Hubungan Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO₂ 0.314, Debit 8 LPM



Gambar 4.5 Grafik Hubungan Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO₂ 0.276, Debit 8 LPM

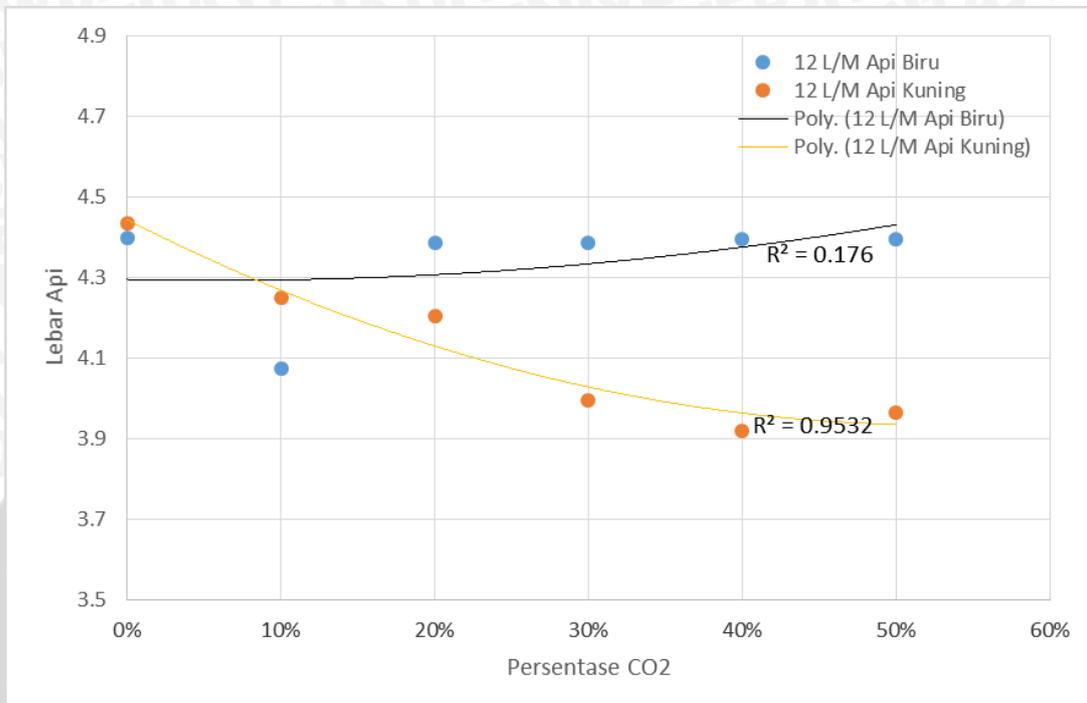


Gambar 4.6 Grafik Hubungan Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO₂ 0.233, Debit 8 LPM

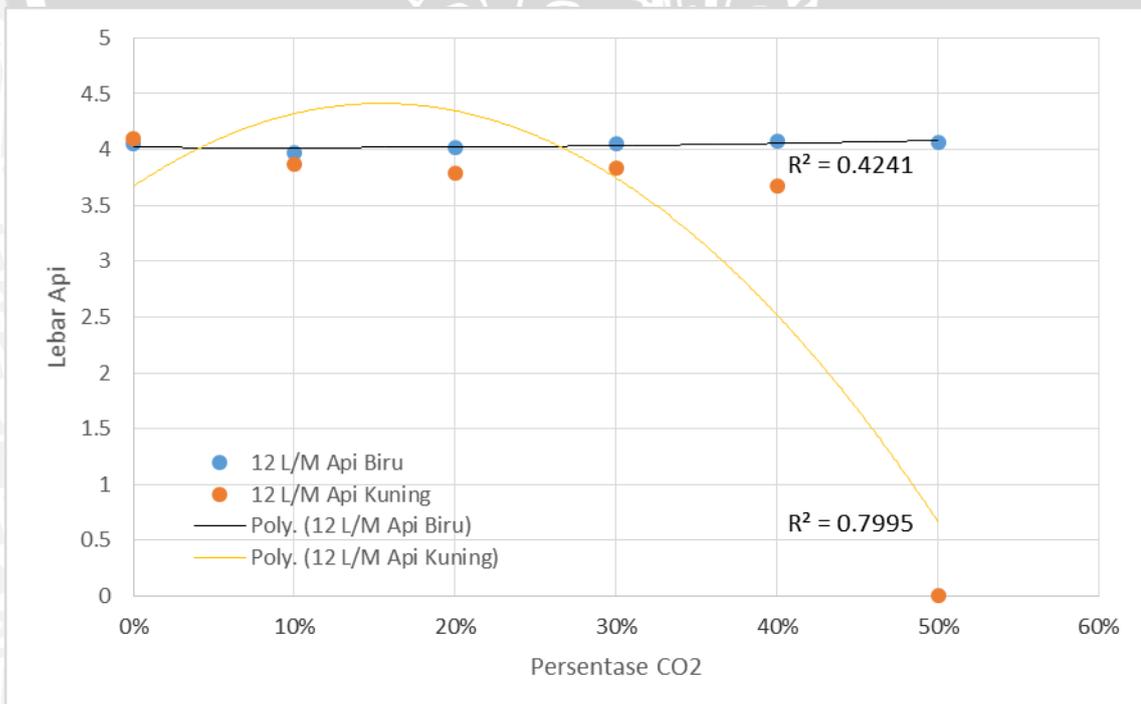
Gambar 4.4, Gambar 4.5 dan Gambar 4.6 di atas menunjukkan grafik pengaruh konsentrasi CO₂ terhadap lebar api pada debit aliran bahan bakar 8 LPM. Dalam grafik juga terdapat 2 buah parameter yang diuji yakni lebar api biru dan api kuning. Pada penelitian kali ini terdapat 2 buah warna api yang dihasilkan dari proses pembakaran CH₄ yakni warna api biru dan api kuning. Api biru terjadi karena pada wilayah tersebut masih kaya akan O₂, sedangkan api kuning terjadi karena pada wilayah tersebut kaya akan bahan bakar, sehingga banyak bahan bakar yang belum terbakar sempurna. Pada grafik di **Gambar 4.4, Gambar 4.5 dan Gambar 4.6** terlihat kecenderungan lebar api dari ke dua warna api tersebut semakin meningkat seiring dengan penambahan CO₂ alir dari bahan bakar.

Makin kecilnya YO₂ juga mempengaruhi lebar api kuning, dimana api kuning terlihat memendek dan hilang pada akhirnya seiring dengan penambahan CO₂ pada bahan bakar. Hal ini terjadi karena api kuning pada awalnya terbentuk dari bahan bakar yang belum terbakar habis saat api biru sudah terbentuk, api biru terbentuk karena adanya campuran sesuai stokiometri lalu gas oksidator dan bahan bakar yang masih tersisa akan ikut terbakar dengan kondisi campuran yang tidak stokiometri yang menyebabkan api berwarna kuning. Jika bahan bakar bahan bakar berkurang seiring

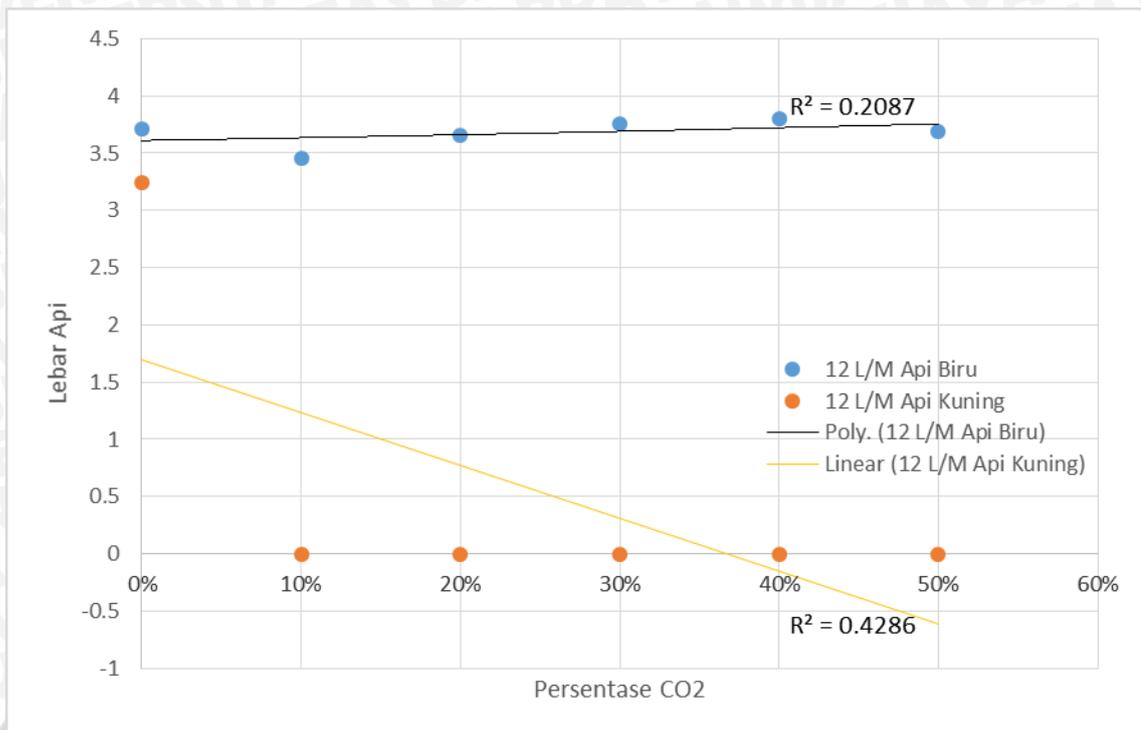
penambahan CO₂ maka jumlah perbandingan antara oksidator dan bahan bakar akan semakin berbeda jauh yang menyebabkan api tidak lagi mampu menyala, sesuai dengan teori yang menyatakan jika pada api miskin bahan bakar dikurangi terus menerus maka api akan padam.



Gambar 4.7 Grafik Hubungan Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO₂ 0.314, Debit 12 LPM



Gambar 4.8 Grafik Hubungan Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO₂ 0.276, Debit 12 LPM



Gambar 4.9 Grafik Hubungan Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap Lebar Api, YO₂ 0.233, Debit 12 LPM

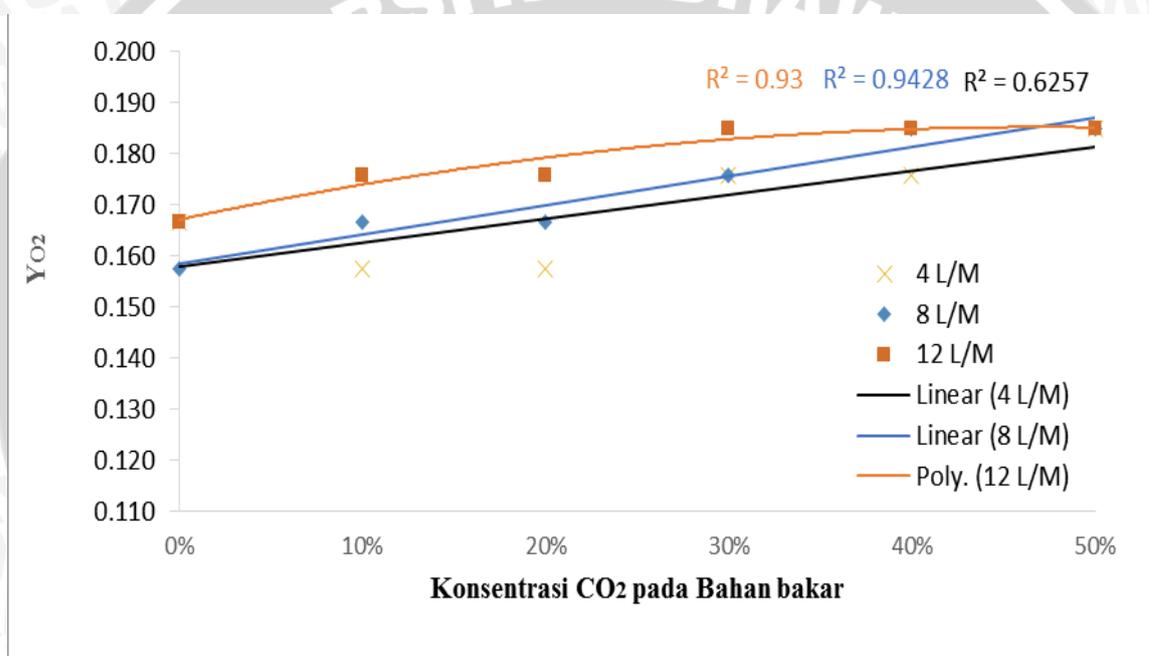
Gambar 4.7, Gambar 4.8 dan Gambar 4.9. Dalam grafik juga terdapat 2 buah parameter yang diuji yakni lebar api biru dan api kuning. Pada penelitian kali ini terdapat 2 buah warna api yang dihasilkan dari proses pembakaran CH₄ yakni warna api biru dan api kuning. Api biru terjadi karena pada wilayah tersebut masih kaya akan O₂, sedangkan api kuning terjadi karena pada wilayah tersebut kaya akan bahan bakar, sehingga banyak bahan bakar yang belum terbakar sempurna.

Hal ini serupa dengan dua kondisi dengan variasi debit bahan bakar sebelumnya dimana jumlah asupan bahan bakar masih di bawah jumlah oksidator yang teralirkan yang menjadikan api semakin melebar karena oksidator yang berlebih akan membakar seluruh bahan bakar yang dimana bahan bakar semakin ditambah maka api melebar karena api akan terus mengejar bahan bakar sampai habis untuk melangsungkan proses pembakaran, oleh karena itu api akan melebar dengan tujuan mendapatkan asupan oksigen tambahan dari luar ruang bakar. Tetapi pada kondisi kali ini oksidator jumlahnya tidak sebanyak jika dibanding dua kondisi sebelumnya jika dilihat dari perbandingan debit bahan bakarnya. Maka api yang timbul akan cenderung turun dari zona stagnansi karena proses pembakaran yang seharusnya terjadi di garis stagnansi

tidak terjadi disini diakibatkan debit bahan bakar yang jauh lebih besar disebanding oksidator maka api akan terdorong kearah pipa oksidator.

Gambar 4.7, Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 juga dapat terlihat terjadi pengurangan pada lebar api. Bahkan pada **Gambar 4.9** api kuning di beberapa variasi konsentrasi CO₂ sudah tidak terjadi lagi atau tidak ada. Hal ini disebabkan karena jumlah konsentrasi CO₂ yang ikut dalam proses pembakaran juga semakin besar dan hal ini yang menjadi penghambat terjadinya reaksi pembakaran pada proses pembakaran.

4.2.2 Analisa Grafik Hubungan Pengaruh Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap YO₂ Kondisi *Extinct*



Gambar 4.10 Grafik Hubungan Pengaruh Konsentrasi CO₂ pada Bahan Bakar Terhadap YO₂ pada Kondisi *Extinct*

Gambar 4.10 diatas menunjukkan grafik hubungan konsentrasi CO₂ terhadap kondisi *extinct* (api padam) pada pembakaran CH₄-CO₂. Pada grafik tersebut terdapat 3 contoh debit bahan bakar yang diuji pengaruhnya pada konsentrasi CO₂ 0%,10%, 20%, 30%, 40% dan 50% pada tiap debitnya. Dapat dilihat bahwa kecenderungan dari nilai YO₂ adalah semakin meningkat seiring dengan penambahan konsentrasi CO₂ bahan bakar. Hal ini disebabkan karena pada peningkatan konsentrasi CO₂ terjadi pengurangan asupan CH₄ yang mengakibatkan bahan bakar yang bereaksi semakin sedikit, O₂ yang

diperlukan untuk mempertahankan api agar tetap nyala sampai pada kondisi padam dalam jumlah yang sama akan sulit bereaksi dikarenakan bahan bakar yang kurang.

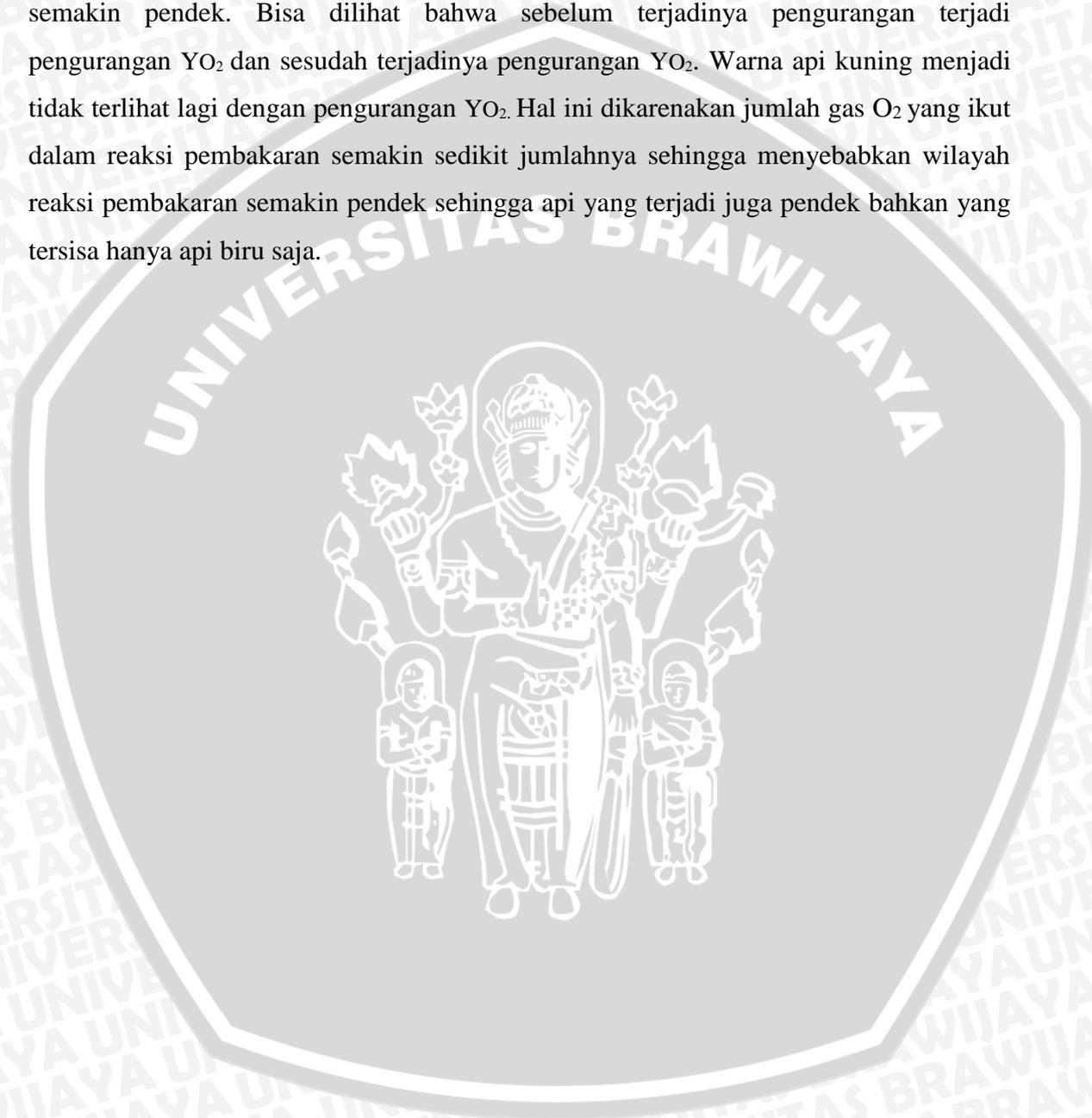
Pada proses pembakaran dibutuhkan oksidator, panas dan bahan bakar. Jika salah satu dari ke empat komponen tersebut tidak ada maka pembakaran tidak akan terjadi. Proses pembakaran yang terjadi pada kondisi *extinct* ini terjadi karena kurangnya asupan O_2 dalam pembakaran. Sebelum terjadinya kondisi *extinct* api akan terus mengecil sebelum akhirnya padam. Api padam dikarenakan asupan dari O_2 tidak cukup untuk melakukan proses pembakaran. Dan ketika bahan bakar kurang maka akan terciptalah api miskin bahan bakar yang dimana sampai suatu titik api padam dikarenakan oksidator kekurangan bahan bakar untuk melanjutkan proses pembakaran.

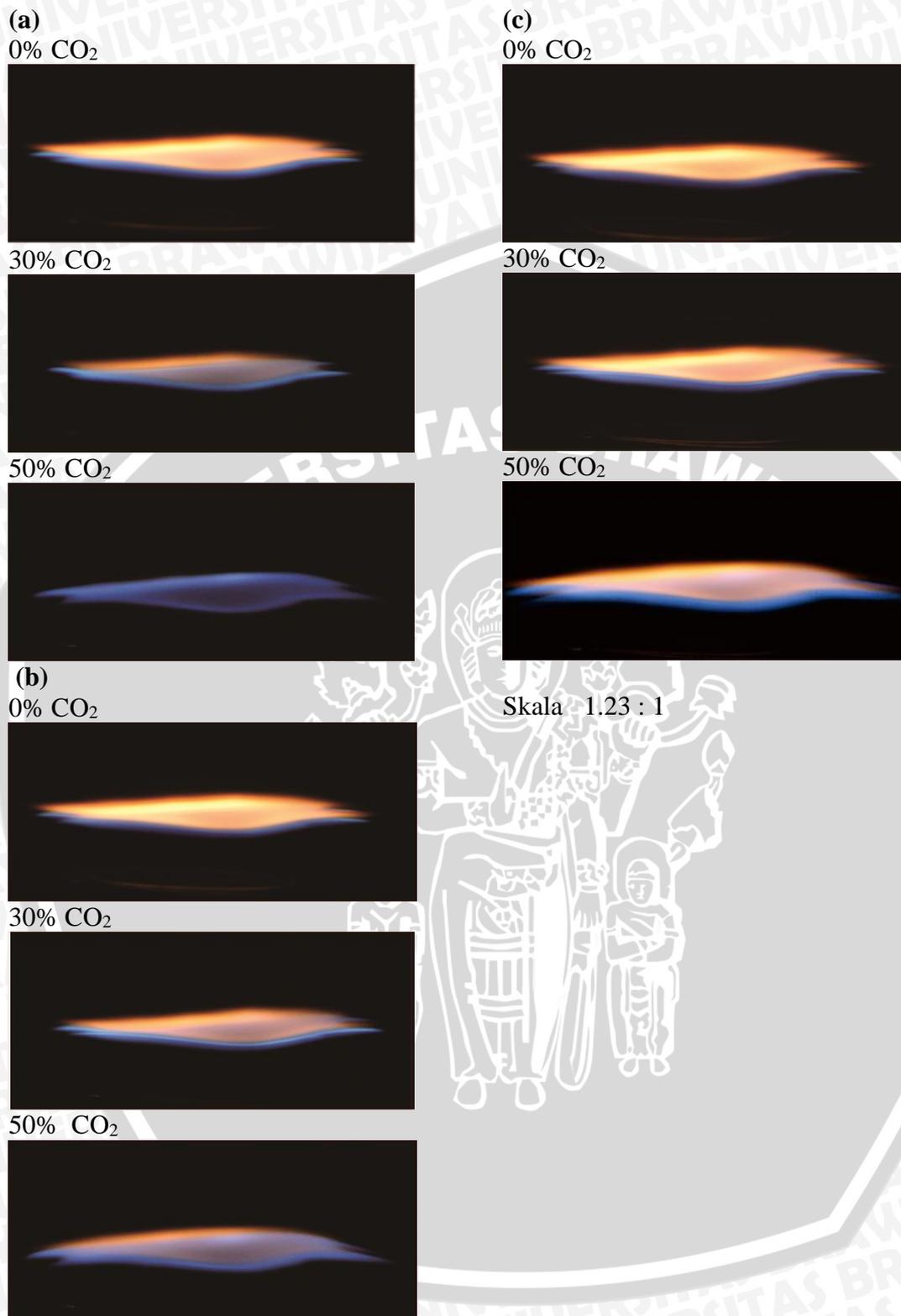
4.2.3 Analisa Pengaruh Konsentrasi CO_2 Terhadap Warna Api

Pada **Gambar 4.11**, **Gambar 4.12** dan **Gambar 4.13** menunjukkan perubahan warna api disertai perubahan lebarnya yang diakibatkan adanya variasi penambahan CO_2 pada bahan bakar.. Konsentrasi CO_2 yang ditampilkan dalam foto tersebut adalah 0%, 10%, 20%, 30%, 40% dan 50% di tiap sampel massa alir yaitu 4 LPM, 8 LPM dan 12 LPM dimana di setiap variasi tersebut diamati pula pengaruh pengurangan YO_2 pada setiap variasi.

Pola api yang terbentuk terlihat bahwa dengan semakin meningkatnya konsentrasi CO_2 dari bahan bakar menyebabkan api semakin gelap. Dapat dilihat pula pada gambar variasi penambahan debit aliran bahan bakar akan mempengaruhi warna api yang terbentuk, dimana pada debit bahan bakar yang lebih besar terlihat warna api yang lebih terang atau memiliki *luminosity* tinggi. Hal ini dikarenakan pada debit bahan bakar yang lebih besar api menjadi lebih kuat atau memiliki *flame strength* yang lebih dibandingkan dua variasi debit bahan bakar yang lebih rendah. Pada peristiwa ini sudah sesuai teori dikarenakan CO_2 yang ikut dalam reaksi pembakaran mengganggu jalannya proses pembakaran. Untuk lebar api terlihat api biru akan terlihat lebih lebar dan dominan ketika konsentrasi CO_2 pada bahan bakar semakin tinggi. Hal ini dipengaruhi oleh campuran api yang miskin bahan bakar maka api kuning hanya sedikit yang terbentuk, lalu ketika dilihat pengaruhnya pada variasi YO_2 api dengan variasi YO_2 yang lebih besar akan terlihat api kuning semakin melebar seiring meningkatnya YO_2 . Ini dikarenakan dengan O_2 semakin bertambah maka kemungkinan bahan bakar yang ikut terbakar lebih banyak.

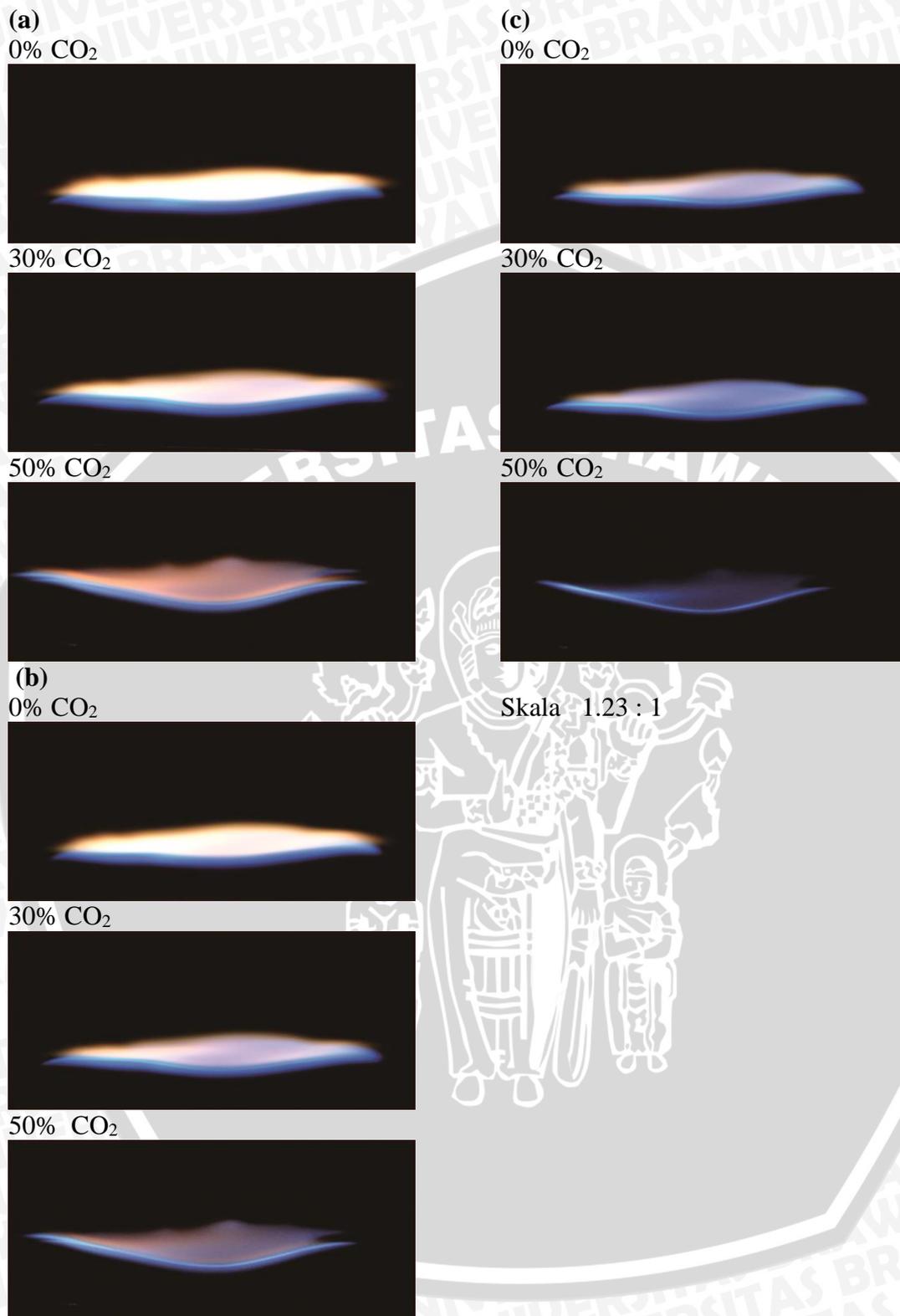
Pada **Gambar 4.11, Gambar 4.12 dan Gambar 4.13** juga terjadi pengurangan YO_2 . Pengurangan YO_2 juga memberikan pengaruh terhadap warna api yang dihasilkan. Hal ini telah sesuai dengan teori karena pengurangan YO_2 menyebabkan O_2 yang ikut dalam proses reaksi pembakaran semakin sedikit sehingga wilayah yang diakibatkan oleh reaksi pembakaran juga semakin sedikit sehingga menyebabkan api yang dibentuk semakin pendek. Bisa dilihat bahwa sebelum terjadinya pengurangan terjadi pengurangan YO_2 dan sesudah terjadinya pengurangan YO_2 . Warna api kuning menjadi tidak terlihat lagi dengan pengurangan YO_2 . Hal ini dikarenakan jumlah gas O_2 yang ikut dalam reaksi pembakaran semakin sedikit jumlahnya sehingga menyebabkan wilayah reaksi pembakaran semakin pendek sehingga api yang terjadi juga pendek bahkan yang tersisa hanya api biru saja.





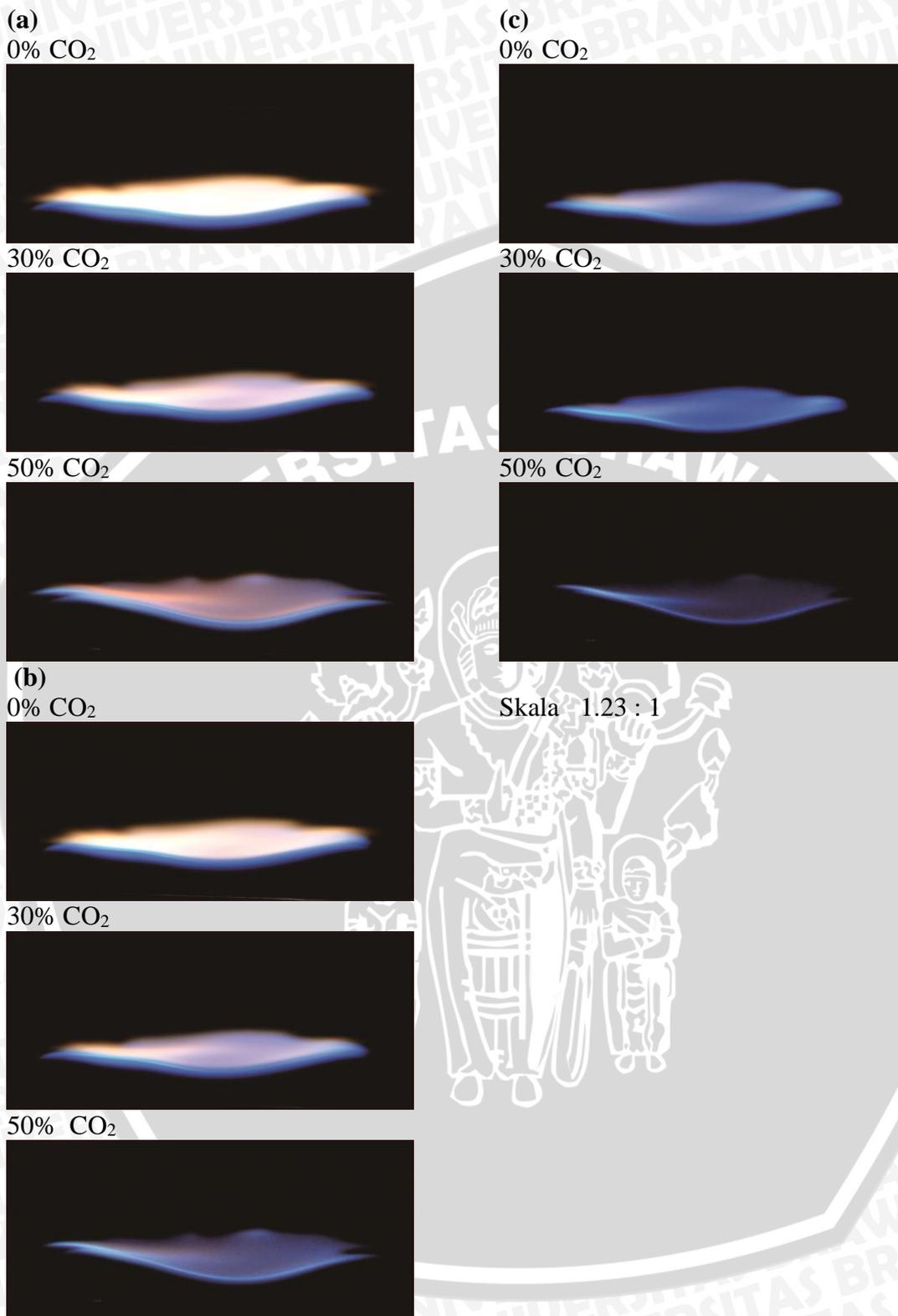
Gambar 4.11. (a) YO₂ 0.233 (4 LPM) (b) YO₂ 0.276 (4 LPM) (c) YO₂ 0.314 (4 LPM)





Gambar 4.12. (a) YO₂ 0.314 (8 LPM) (b) YO₂ 0.276 (8 LPM) (c) YO₂ 0.233 (8 LPM)





Gambar 4.13. (a) YO₂ 0.314 (12 LPM) (b) YO₂ 0.276 (12 LPM) (c) YO₂ 0.233 (12 LPM)



BAB V PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari hasil dan analisa pembahasan pengaruh kandungan CO₂ terhadap karakteristik api pembakaran difusi CH₄+CO₂ pada counterflow burner, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

- Pada pengamatan kondisi *extinction* dapat disimpulkan pula bahwa ketika konsentrasi CO₂ ditambah maka api akan lebih cepat padam. Dengan adanya konsentrasi CO₂ di dalam bahan bakar mengakibatkan penurunan batas mampu nyala dari campuran bahan bakar baik pada campuran miskin maupun campuran kaya.
- Untuk lebar api terlihat api biru akan terlihat lebih lebar dan dominan ketika konsentrasi CO₂ pada bahan bakar semakin tinggi. Lalu ketika dilihat pengaruhnya pada variasi YO₂ api dengan variasi YO₂ yang lebih besar akan terlihat api kuning semakin melebar seiring meningkatnya YO₂. Pada peristiwa ini sudah sesuai teori dikarenakan CO₂ yang ikut dalam reaksi pembakaran mengganggu jalannya proses pembakaran.
- Penambahan CO₂ berpengaruh besar terhadap warna nyala api biru dan api kuning. Hal ini terlihat jelas pada campuran kaya, dimana banyak ditemukan api kuning yang lebih terang. Pola api yang terbentuk terlihat bahwa dengan semakin meningkatnya konsentrasi CO₂ dari bahan bakar menyebabkan api semakin gelap. Pola api yang terbentuk terlihat bahwa dengan semakin meningkatnya konsentrasi CO₂ dari bahan bakar menyebabkan api semakin gelap.

5.2 Saran

Adapun saran yang penulis harapkan tentang penelitian lanjutan untuk :

- Meneliti lebih lanjut tentang pengaruh penambahan CO₂ karakteristik pembakaran difusi pada *Counterflow Burner* dengan pada titik penyalaan bawah dengan menambahkan pengaruh temperatur.
- Meneliti lebih lanjut tentang pengaruh CO₂ karakteristik pembakaran premix pada *Counterflow Burner*.

DAFTAR PUSTAKA

- Cengel Yunus A. and Cimbula John M. 2004. *Fluid Mechanics fundamental and Application*. New York: McGraw-Hill Companies, Inc.
- Chelliah, H. K., Lazzarini, A. K., Wanigarathne, P. C., Linteris, G. T. 2002. *Inhibition of Premixed and Non-premixed Flames with Fine Droplets Water and Solutions*. Proceedings of the Combustion Institute. Vol. 29: 369-376.
- Chen, S., Zheng, C. 2011. *Counterflow Diffusion Flame of Hydrogen Enriched Biogas Under Mild Oxy-fuel Condition*. International Journal of Hydrogen Energy. Vol. 36, Issue 23: 15403-15413.
- Fessenden, Ralph J., and J. S. Fessenden. 1989. *Kimia Organik Jilid 1*, Edisi Ke-3, Jakarta: Erlangga.
- Firmansyah, R.H. 2008. *Penelitian Kestabilan dan Panjang Nyala Api Premix Akibat Variasi Diameter Dalam Ring Menggunakan Gas Propane pada Bunsen Burner*. Jakarta. Teknik Mesin Universitas Indonesia
- Karim, G.A., Wierzba, I. 1998. *Methane-Carbon dioxide Mixtures as a fuel*, AFRC/JFRC International Symposium, Hawaii, October 1998.
- Karim, G.A., Hanafi. A.S., Zhou, G. 1992. *A Kinetic Investigation Of The Oxidation Of Low Heating Value Fuel Mixtures Of Methane And Diluents*, Journal of Emerging Energy Technology. Vol. 41: 103.
- Karim, G.A., Hanafi. A.S. 1991. *An analytical Examination of the Partial Oxidation of Rich Mixture of Methane and a Oxygen*, Journal of Fossil Fuel Combustion. Vol. 33: 127.
- Kristoferson dan Bokalders. 1991. *Penanganan dan Pemanfaatan Limbah Padat*. Jakarta: Mediyatama Sarana Perkasa.
- Li, S. C. 1997. *Spray Stagnation Flames*, Progress in Energy and Combustion Science. Vol. 23: 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. 2011. *Effect of soot addition on extinction limits of luminous laminar counterflow diffusion flames*, Journal Proceedings of the Combustion Institute. Vol. 33: 2539–2546.
- Porpatham, E., Ramesh, A., Nagalingam, B. 2008. *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: 1651-1659.
- Price, E. C., and Cheremisinoff, P. N., 1981. *Biogas Production and Utilization*. United States of America: Ann Arbor Science Publisher, Inc.

- Sasongko, M. N., Mikami, M., Dvorjetski. 2011. *Extinction Condition of Counterflow Diffusion Flame with Polydisperse Water Spray*, Journal of Proceedings of Combustion Institute, Vol. 33, Issue 2: 2555-2562.
- Tsuji, H. 1982. *Counterflow Diffusion Flames*, Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 8: 93-119.
- Ukisu Yuji, Kitajima Akio, Hatanaka Takeshi, Takeuchi Masao. 2004. *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.
- Wardana, ING. 2008. *Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran*. PT. Danar Wijaya Brawijaya University Press: Malang.
- Yoon, S.H., Lee, C.S. 2011. *Experimental Investigation on the Combustion and Exhaust Emission Characteristics of Biogas-Biodiesel Dual-fuel Combustion in a CI Engine*, Journal of Fuel Processing Technology. Vol. 92, Issue 5: 992-1000.
- W. Sun, S. H. Won, T. Ombrello, C. Carter, Y. Ju. 2013. *Direct ignition and the S-curve transition by in situ nano-second pulsed discharge in methane/oxygen/helium counterflow flame*. Proceedings of the Combustion Institute. Tsinghua University. 34:847-855 .
- Bayong, T., 2004. *Klimatologi*. Bandung: Institut Teknologi Bandung Press.
- Dederichs, Anne S. 2004. *Flamelet Modelling of Soot Formation In Diffusion Flames*. Lund: Lund Institute of Technology.

(a) 4 LPM YO_2 0.233 Skala 1.23 : 1

0% CO_2



10%



20%



30%



40%



50%



(b) 4 LPM YO_2 0.276 Skala 1.23 : 1

0% CO_2



10%



20%



30%



40%



50%



4 LPM YO₂ 0.314

Skala 1.23 : 1

0% CO₂



10%



20%



30%



40%



50%



(a) 8 LPM YO_2 0.314 Skala 1.23 : 1

0% CO_2



10%



20%



30%



40%



50%

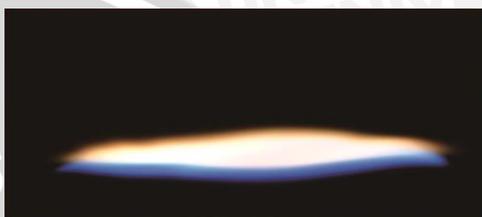


(b) 8 LPM YO_2 0.276 Skala 1.23 : 1

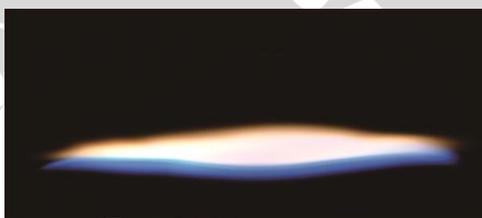
0% CO_2



10%



20%



30%



40%



50%



(c) 8 LPM YO_2 0.233 Skala 1.23 : 1

0% CO_2



10%



20%



30%



40%



50%



(a) 12 LPM YO_2 0.314 Skala 1.23 : 1

(b) 12 LPM YO_2 0.2.76 Skala 1.23 : 1

0% CO2

0% CO2



10%

10%



20%

20%



30%

30%



40%

40%



50%

50%

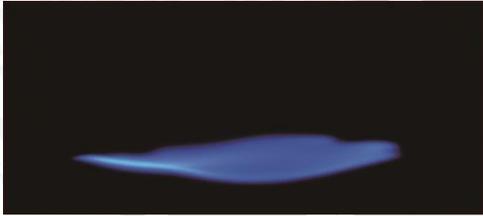


(c) 12 LPM YO_2 0.233 Skala 1.23 : 1

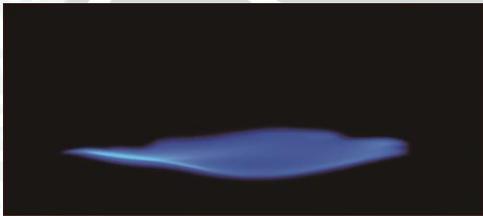
0% CO2



10%



20%



30%



40%



50%

