

**PENGARUH *EQUIVALENT RATIO* TERHADAP  
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN *PREMIX CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>*  
PADA *COUNTERFLOW FLAME BURNER***

**SKRIPSI  
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**SANDY PRADITA HADI UTAMA  
NIM. 115060200111007-62**

**KEMENTERIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN  
TINGGI**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN MESIN  
MALANG  
2015**

**LEMBAR PERSETUJUAN**

**PENGARUH *EQUIVALENT RATIO* TERHADAP  
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN *PREMIX CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>* PADA  
*COUNTERFLOW FLAME BURNER***

**SKRIPSI**

**KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan  
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh

**SANDY PRADITA HADI UTAMA**  
**NIM. 115060200111007-62**

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr.Eng., Mega Nur Sasongko, ST.,MT.,  
NIP. 19740930 200012 1 001

Dr.Eng., Nurkholis Hamidi, ST.,M.Eng.,  
NIP. 19740121 199903 1 001

## 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 *Equivalent Ratio* Terhadap Karakteristik Pembakaran Premix  $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-O}_2$  Pada *Counterflow Flame 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 terima kasih kepada:

1. Dr. Eng. Nurkholis Hamidi ST., M.Eng. selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin yang juga sebagai dosen pembimbing II 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. Motor Bakar atas semua ilmu dan saran yang telah diberikan selama penyusunan skripsi.
3. Seluruh Dosen pengajar dan Staf administrasi Jurusan Teknik Mesin.
4. Kedua orang tua penulis, yaitu Akhmad Riduwan dan Jumiatin yang tak henti-hentinya memberikan segala pengorbanan baik do'a, semangat, nasihat maupun material yang telah diberikan kepada penulis hingga sampai saat ini. Juga beserta saudara-saudara penulis, yaitu 'adek' Dendi Alga Utama yang selalu memberikan doa dan nasihat-nasihat tentang kehidupan serta menjadi motivasi bagi penulis karena telah menghibur disaat penat.
5. Riyan Fajar K.A. dan Ilman Kamil A. yang telah bersama sama menyelesaikan skripsi ini, serta memberikan nuansa ramai dan meriah saat penelitian berlangsung.
6. Hano, Amril dan Hangga sebagai kakak-kakak penulis yang telah membantu membimbing penulis dalam mengerjakan skripsi ini.
7. Syitti Hajar Royani yang selalu memberikan do'a dan semangat serta menjadi tempat sharing dan kerjasama yang baik sehingga menjadi motivasi bagi penulis untuk segera menjadi sarjana serta motivasi untuk segera sukses semuda mungkin.
8. Saudara-saudara Mesin 2011, yang telah memberikan doa, dukungan, bantuan, canda tawa, pengalaman dan pelajaran kehidupan mulai dari mahasiswa baru

hingga sampai saat ini dan juga abu bakar, ricky, hermantoro telah membantu dalam pengerjaan sebagian alat skripsi ini.

9. Afif, Iman, Ricky, Adith, Abu Bakar, Roid, Hermantoro yang telah memberikan canda tawa serta berbagi cerita.
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.

Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan skripsi ini dan ilmu yang dimiliki masih butuh penyempurnaan. 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, Juni 2015

Penuli

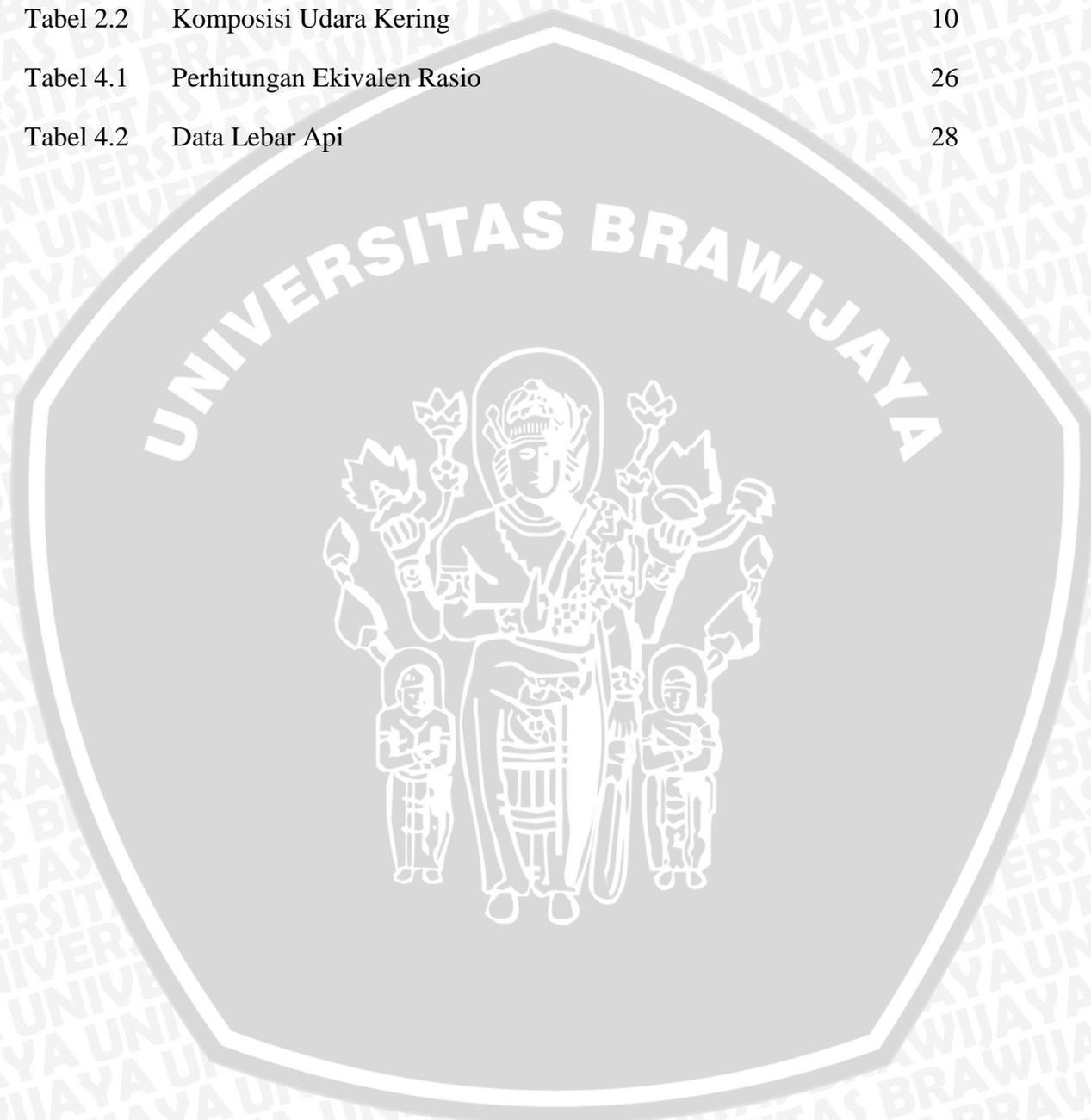
## DAFTAR ISI

<b>KATA PENGANTAR</b> .....	i
<b>DAFTAR ISI</b> .....	iii
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	v
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	vi
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b> .....	viii
<b>DAFTAR SIMBOL</b> .....	ix
<b>RINGKASAN</b> .....	x
<b>BAB I LATAR BELAKANG</b> .....	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
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	4
2.1 Penelitian Sebelumnya.....	4
2.2 Biogas .....	5
2.2.1 Proses pembentukan biogas .....	5
2.2.2 Karakteristik gas yang terkandung dalam biogas .....	7
2.3 Definisi Pembakaran.....	8
2.3.1 Pembakaran Stoikiometri .....	9
2.3.2 Rasio Udara Bahan Bakar ( <i>air-fuel ratio</i> /AFR) .....	11
2.3.3 Udara Berlebih dan Udara Teoritis .....	11
2.3.4 Rasio Ekuivalen ( <i>Equivalent Ratio</i> , $\Phi$ ) .....	12
2.4 Pembakaran Premiks dan Difusi.....	13
2.4.1 <i>Flashback</i> dan <i>Lift off</i> .....	13
2.5 Karakteristik Pembakaran.....	13
2.5.1 Temperatur rata-rata .....	14

2.5.2	Warna Api.....	14
2.5.3	Lebar Api.....	15
2.6	<i>Inhibitor</i> .....	16
2.7	<i>Counter Flow Premixed Flame</i> .....	17
2.8	Hipotesis .....	18
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....		19
3.1	Metode Penelitian .....	19
3.2	Variabel Penelitian .....	19
3.3	Skema Instalasi Penelitian .....	20
3.4	Metode Pengambilan Data.....	22
3.5	Metode Pengolahan Data .....	23
3.6	Diagram Alir Penelitian .....	23
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....		25
4.1	Data Hasil Penelitian .....	25
4.1.1	Data Karakteristik Pembakaran .....	25
4.1.2	Data Distribusi Temperatur .....	28
4.2	Pembahasan dan Hasil Penelitian .....	36
4.2.1	Karakteristik Pembakaran .....	36
4.2.2	Distribusi Temperatur .....	39
<b>BAB V PENUTUP</b> .....		42
5.1	Kesimpulan.....	43
5.2	Saran .....	43
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>		
<b>LAMPIRAN</b>		

**DAFTAR TABEL**

No.	Judul	Halaman
Tabel 2.1	Komposisi Biogas	6
Tabel 2.2	Komposisi Udara Kering	10
Tabel 4.1	Perhitungan Ekuivalen Rasio	26
Tabel 4.2	Data Lebar Api	28



## DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Halaman
Gambar 2.1	Skematik Proses Pembakaran	9
Gambar 2.2	Deskripsi Umum Nyala Api bunsen Laminar	15
Gambar 2.3	Aliran bahan bakar dan oksidator	17
Gambar 2.4	Foto <i>close up</i> dari konfigurasi <i>twin flame</i> campuran isooktana dan udara	18
Gambar 3.1	Skema Instalasi Alat Penelitian	20
Gambar 3.2	Skematik Pengambilan Data Distribusi Temperatur	21
Gambar 3.3	Diagram Alir Penelitian	23
Gambar 4.1	Foto api variasi CH <sub>4</sub> 40% 6 LPM dan 8 LPM	27
Gambar 4.2	Foto api variasi CH <sub>4</sub> 50% 6 LPM dan 8 LPM	27
Gambar 4.3	Foto api variasi CH <sub>4</sub> 60% 6 LPM dan 8 LPM	28
Gambar 4.4	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 40%, $\Phi = 0.94$ (8 LPM)	29
Gambar 4.5	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 30%, $\Phi = 0.94$ (8 LPM)	29
Gambar 4.6	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 20%, $\Phi = 0.94$ (8 LPM)	29
Gambar 4.7	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 10%, $\Phi = 0.94$ (8 LPM)	29
Gambar 4.8	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 0%, $\Phi = 0.94$ (8 LPM)	30
Gambar 4.9	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 40%, $\Phi = 1.17$ (8 LPM)	30
Gambar 4.10	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 30%, $\Phi = 1.17$ (8 LPM)	30
Gambar 4.11	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 20%, $\Phi = 1.17$ (8 LPM)	30
Gambar 4.12	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 10%, $\Phi = 1.17$ (8 LPM)	31
Gambar 4.13	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 0%, $\Phi = 1.17$ (8 LPM)	31
Gambar 4.14	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 40%, $\Phi = 1.40$ (8 LPM)	31
Gambar 4.15	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 30%, $\Phi = 1.40$ (8 LPM)	31
Gambar 4.16	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 20%, $\Phi = 1.40$ (8 LPM)	32

Gambar 4.17	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 10%, $\Phi = 1.40$ (8 LPM)	32
Gambar 4.18	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 0%, $\Phi = 1.40$ (8 LPM)	32
Gambar 4.19	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 40%, $\Phi = 0.94$ (6 LPM)	32
Gambar 4.20	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 30%, $\Phi = 0.94$ (6 LPM)	33
Gambar 4.21	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 20%, $\Phi = 0.94$ (6 LPM)	33
Gambar 4.22	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 10%, $\Phi = 0.94$ (6 LPM)	33
Gambar 4.23	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 0%, $\Phi = 0.94$ (6 LPM)	33
Gambar 4.24	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 40%, $\Phi = 1.17$ (6 LPM)	34
Gambar 4.25	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 30%, $\Phi = 1.17$ (6 LPM)	34
Gambar 4.26	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 20%, $\Phi = 1.17$ (6 LPM)	34
Gambar 4.27	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 10%, $\Phi = 1.17$ (6 LPM)	34
Gambar 4.28	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 0%, $\Phi = 1.17$ (6 LPM)	35
Gambar 4.29	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 40%, $\Phi = 1.40$ (6 LPM)	35
Gambar 4.30	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 30%, $\Phi = 1.40$ (6 LPM)	35
Gambar 4.31	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 20%, $\Phi = 1.40$ (6 LPM)	35
Gambar 4.32	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 10%, $\Phi = 1.40$ (6 LPM)	36
Gambar 4.33	Plot distribusi suhu pada variasi CH <sub>4</sub> 40%, CO <sub>2</sub> 0%, $\Phi = 1.40$ (6 LPM)	36
Gambar 4.34	Grafik Lebar Api pada berbagai Variasi	38
Gambar 4.35	Grafik Pengaruh CO <sub>2</sub> terhadap temperatur rata-rata pada berbagai <i>equivalent ratio</i>	40

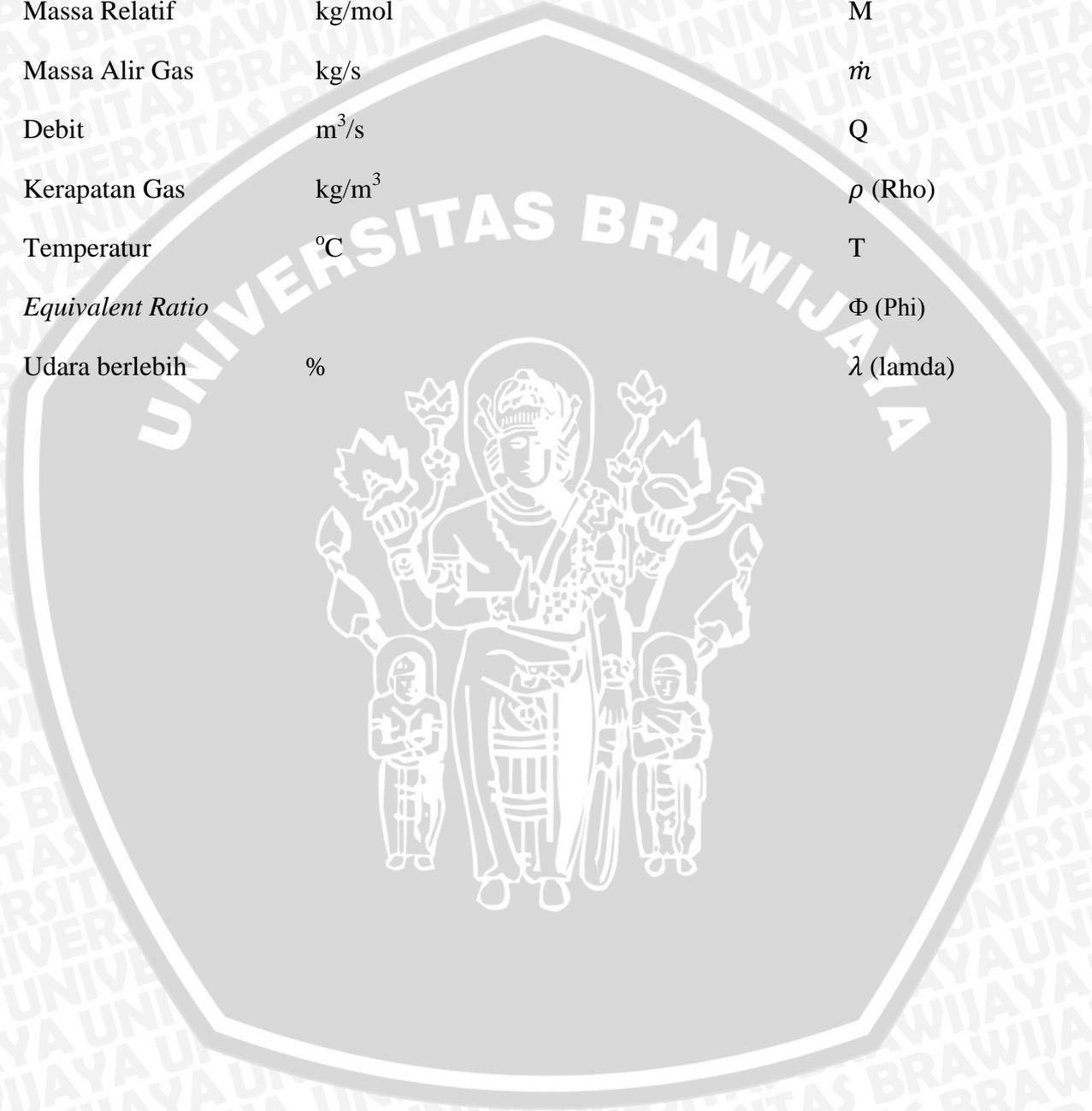
## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data dsitribusi temperatur api



## 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	$\text{m}^3/\text{s}$	Q
Kerapatan Gas	$\text{kg}/\text{m}^3$	$\rho$ (Rho)
Temperatur	$^{\circ}\text{C}$	T
<i>Equivalent Ratio</i>		$\Phi$ (Phi)
Udara berlebih	%	$\lambda$ (lamda)



## RINGKASAN

**Sandy Pradita Hadi Utama**, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Mei 2015, Pengaruh *Equivalent Ratio* Terhadap Karakteristik Pembakaran *Premix CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub>-O<sub>2</sub>* Pada *Counterflow Flame Burner*. Dosen Pembimbing : Mega Nur Sasongko dan Nurkholis Hamidi.

Biogas merupakan energi terbarukan yang sangat berpotensi untuk dikembangkan. Biogas sebagian besar mengandung CH<sub>4</sub> sebesar 50%-70% dan CO<sub>2</sub> sebesar 25%-45%. CH<sub>4</sub> dimanfaatkan untuk pembakaran namun kandungan CO<sub>2</sub> menurunkan nilai kalor pembakaran. *Equivalent ratio* merupakan nilai yang menunjukkan kondisi suatu pembakaran berlangsung secara stoikiometri atau tidak. Saat pembakaran mendekati stoikiometri maka pembakaran akan mendekati sempurna. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui *equivalent ratio* serta kandungan CO<sub>2</sub> yang optimal untuk pembakaran. Pada penelitian ini digunakan instalasi *counterflow burner* untuk meneliti struktur api. *Equivalent ratio* yang digunakan adalah 0,94 , 1,17 , 1,40 divariasikan pada CO<sub>2</sub> sebesar 0%,10%,20%,30%,40%. Jarak antara pipa bawah dan atas sebesar 20mm serta menggunakan *thermocouple* tipe K dengan tekanan udara yang dimasukkan dalam ruang bakar sebesar 0,5 bar dengan aliran total campuran *premixed* ini sebesar 6 LPM dan 8LPM. Pada *equivalen* 0,94 api yang dihasilkan memiliki suhu rata rata yang paling tinggi dan kemudia diikuti suhu pada *equivalent ratio* 1,17 kemudian 1,40. Pada *equivalent ratio* yang sama dengan penambahan CO<sub>2</sub> maka api semakin tipis dan semakin lebar serta temperatur rata-rata turun. Selain itu dengan pengurangan kandungan CO<sub>2</sub> warna api juga berubah diiringi oleh kenaikan temperatur yang dihasilkan. Dengan perubahan warna menjadi warna biru yang menunjukkan suhu tinggi dikarenakan pancaran cahaya yang memiliki panjang gelombang pendek saat bersuhu tinggi.

Kata kunci : Biogas, Equivalent Ratio, Counterflow Burner, Pembakaran premiks CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>

# BAB I

## LATAR BELAKANG

### 1.1 Latar Belakang

Energi merupakan aspek yang sangat penting di dalam kehidupan. Akan tetapi kebutuhan energi yang semakin besar serta tidak diiringi oleh bertambahnya sumber sumber energi yang ada menyebabkan krisis dalam bidang energi. Seperti yang dilangsir menteri ESDM Susilo Siswoutimo (Liputan 6 : 2013) menyatakan bahwa indonesia saja telah mengaami krisis dalam bidang energi minyak dikarenakan pertumbuhan ekonomi yang melonjak 6% dan peningkatan jumlah penduduk sebesar 1,1%. Oleh karena itu diperlukan adanya terobosan untuk mendapatkan sumber energi alternatif yang dapat diperbaharui.

Terdapat dua macam energi, energi konvensional dan energi terbarukan. Energi yang konvensional banyak tersedia di alam dengan cuma-cuma contohnya minyak bumi, gas alam, batu bara serta masih banyak yang lain (Kemenristek : 2012). Namun penggunaan energi ini harus diperhatikan dengan baik. Energi konvensional ini akan habis sia-sia jika tidak digunakan dengan bijak, apa lagi persediaan energi ini di alam mulai menipis.

Saat ini energi alternatif terbarukan dengan prinsip fermentasi mulai banyak dikembangkan. Bahan yang difermentasikan adalah bahan-bahan organik maupun limbah hasil dari kotoran hewan ternak. Hasil fermentasi dari bahan-bahan tersebut kita kenal dengan nama biogas. Presentase dari biogas yang paling besar adalah  $\text{CH}_4$  dan  $\text{CO}_2$ , persentase besarnya yaitu sekitar 50%-70% untuk  $\text{CH}_4$  dan 30%-40% untuk  $\text{CO}_2$ . Presentase lain dari biogas yaitu  $\text{H}_2$  berkisar antara 5%-10%,  $\text{H}_2\text{S}$  sebesar 0%-3%,  $\text{N}_2$  sebesar 1%-2%,  $\text{H}_2\text{O}$  sebesar 0,3%, dan presentase lain (Teodorita dan R. Dominik, 2008).

Senyawa yang menguntungkan di dalam presentase biogas ini hanyalah  $\text{CH}_4$  karena memiliki nilai panas (kalor) yang dapat dimanfaatkan sebagai energi yang kemudian diolah. Sementara presentase lainnya hanya bersifat sebagai zat pengotor yang merugikan, seperti  $\text{CO}_2$  dan  $\text{N}_2$ . Oleh karena itu ketika dalam proses pembakaran biogas gas  $\text{CO}_2$  dapat menurunkan nilai kalor pembakaran. Keadaan ini mengakibatkan terjadinya penurunan energi dan menghambat laju reaksi pembakaran (Karim, 1991). Selain itu  $\text{CO}_2$  dapat menyerap sebagian panas yang dihasilkan dalam pembakaran

seiring dengan meningkatnya pembakaran, karena  $\text{CO}_2$  memiliki nilai kalor spesifik yang tinggi.

Jenis presentase bahan bakar yang berbeda dapat menghasilkan kalor yang berbeda dan karakteristik api yang berbeda pula. Sehingga untuk mengetahui kalor yang dihasilkan serta karakteristik pembakaran dari komposisi suatu bahan bakar perlu dilakukan percobaan. Pembakaran dengan *Counterflow premix flame*.

Beberapa penelitian telah diadakan baik berupa eksperimental maupun studi numeris untuk mencaritahu pengaruh dari presentase  $\text{CO}_2$  pada karakteristik pembakaran premiks  $\text{CH}_4/\text{O}_2$ . Salah satunya adalah A. Amato (2011) yang menyimpulkan berdasarkan penelituanannya bahwa pembakaran premiks  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$  memiliki reaksi kinetik kimiawi yang lebih lama dan juga stabilitas dari nyala api yang lebih buruk mudah untuk terjadinya *blow off*.

Penelitian sebelumnya pun telah meneliti pengaruh presentase  $\text{CO}_2$  pada campuran  $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{O}_2$  terhadap distribusi nyala api premiks dengan instalasi *counterflow burner* namun dengan *equivalent ratio* yang berubah ubah. Sehingga pengaruh presentase  $\text{CO}_2$  pada pembakaran premiks  $\text{CH}_4/\text{O}_2/\text{CO}_2$  terhadap distribusi dan karakteristik pembakarannya masih belum dapat dibandingkan dengan detail. Sehingga untuk mendapatkan pengaruh yang detail dapat dilakukan penelitian dengan *equivalent ratio* yang sama.

Oleh karena itu untuk menghasilkan pembakaran yang optimal maka harus dilakukan penelitian terlebih dahulu sehingga diketahui distribusi dan karakteristik nyala api pada pembakaran premiks dengan berbagai persentase presentase  $\text{CO}_2$  yang berbeda pada berbagai *equivalent ratio*.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas dapat diambil rumusan permasalahannya yaitu “Apakah pengaruh konsentrasi gas  $\text{CO}_2$  dengan *equivalent ratio* yang sama pada campuran bahan bakar  $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{O}_2$  terhadap karakteristik nyala api serta distribusi pada pembakaran premiks dengan instalasi *counterflow burner*”

## 1.3 Batasan Masalah

Untuk lebih memfokuskan penelitian ini dalam mencapai tujuan yang lebih terarah, maka akan diberikan batasan-batasan permasalahan yang meliputi:

1. Hanya memperhitungkan komposisi presentase gas terbesar dalam dalam biogas yaitu: CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, dan O<sub>2</sub>;
2. Kondisi ruangan merupakan kondisi pada saat penelitian berlangsung, yakni:
  - Tekanan pada ruangan 714 mmHg
  - Temperatur udara 29°C
3. Komposisi gas CH<sub>4</sub> pada tabung dianggap murni;

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh ekuivalen rasio serta konsentrasi CO<sub>2</sub> terhadap karakteristik nyala api dan distribusi pembakaran premiks CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> menggunakan instalasi *counterflow burner*.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Mengurangi ketergantungan penggunaan bahan bakar fosil yang semakin menipis.
2. Sebagai aktualisasi ilmu perkuliahan mengenai pembakaran.
3. Dapat digunakan sebagai referensi tambahan mengenai karakteristik pembakaran biogas dengan jenis pembakaran premiks.
4. Dapat mengetahui pengaruh dari inhibitor CO<sub>2</sub> pada pembakaran premiks biogas terhadap karakteristik nyala api, serta distribusi dari nyala api.

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Beberapa penelitian mengenai pengaruh adanya *inhibitor* CO<sub>2</sub> terhadap pembakaran premiks CH<sub>4</sub> dan O<sub>2</sub> antara lain telah dilakukan oleh :

Hongsheng Guo (1998) meneliti menggunakan metode numerik tentang panas serta yang hilang karena radiasi dan karakteristik pemadaman campuran CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara dan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> pada pembakaran premiks instalasi *counterflow*. Dari penelitian tersebut dijelaskan bahwa pada batas mampu nyala api premiks *counterflow* campuran CH<sub>4</sub>/udara sedikit dipengaruhi oleh fenomena *radiation reabsorption* dengan rasio ekuivalen yang rendah. Namun fenomena tersebut berpengaruh besar pada campuran CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara dan CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> dengan skema instalasi yang sama terutama pada batas dari radiasi. Daerah mampu nyala pada api premiks *counterflow* dari campuran CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/udara menjadi semakin kecil seiring dengan meningkatnya kadar persentase gas CO<sub>2</sub>. Radiasi yang mulai hilang pada nyala api campuran CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> didapatkan pada *stretch rate* yang lebih tinggi daripada nyala api CH<sub>4</sub>/udara.

Chaîneux Jacques. (2011) meneliti secara studi eksperimental mengenai kemampunyaan campuran CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> terutama tentang keselamatan pada kemungkinan terjadinya ledakan. Eksperimen tersebut menggunakan instalasi yang berbentuk bulat dan diisi dengan campuran CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> pada tekanan 1 bar. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa tekanan yang dihasilkan dari ledakan serta laju peningkatan tekanan yang tertinggi terjadi pada saat campuran stoikiometri. Sedangkan penambahan konsentrasi CO<sub>2</sub> di dalam tangki berpengaruh secara signifikan didalam mereduksi ledakan yang terjadi. Tekanan dari ledakan dan laju peningkatan tekanan terendah terjadi pada saat campuran memiliki konsentrasi tertinggi CO<sub>2</sub> yaitu sebesar 65%.

Chen (2011), meneliti tentang karakteristik pembakaran biogas dengan menggunakan metode *counterflow burner*. Hasilnya adalah dengan metode ini dapat diketahui kelayakan pemanfaatan bahan bakar biogas tanpa menggunakan proses pemurnian terlebih dahulu. Pemurnian yang dimaksud adalah pemurnian dari kandungan zat-zat pengotor yang dapat mengganggu proses pemanfaatan biogas seperti CO<sub>2</sub>.

## 2.2 Biogas

Biogas merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang dihasilkan dari pembusukan bahan-bahan organik. Biogas dapat dihasilkan dari berbagai sumber seperti kotoran sapi serta dapat juga berasal dari limbah organik. Energi biogas ini dapat diolah untuk menghasilkan energi lain seperti panas yang kemudian diubah menjadi listrik, atau sebagai bahan bakar kendaraan. Biogas saat ini mulai banyak digunakan di berbagai negara maju dan berkembang seiring dengan isu bahan bakar fosil yang semakin menipis.

Dalam pembentukannya, biogas dihasilkan oleh bakteri dan berbagai macam mikroorganisme yang memecah serta memakan bahan organik tanpa adanya oksigen, proses ini dikenal sebagai pencernaan anaerobik. Proses pencernaan anaerobik ini berlangsung terus menerus, dan untuk menghasilkan biogas yang maksimal maka telah diciptakan alat bernama digester. Komposisi dari biogas sangat dipengaruhi oleh bahan dan jenis dari alat digester, namun komposisi utama dari biogas adalah metana. Semakin tinggi presentase gas metana yang terbentuk dari proses *anaerobic digesting* semakin bagus pula potensi biogas untuk dijadikan sebagai bahan bakar.

Selain menghasilkan  $\text{CH}_4$  (50%-70%) biogas memiliki presentase gas lain yang sifatnya dapat merugikan dalam proses pembakaran. Gas merugikan yang tercipta memiliki variasi yang berbeda bergantung pada jenis substrat yang digunakan sebagai bahan utama.

### 2.2.1 Proses Pembentukan Biogas

Pembentukan biogas dilakukan dengan reaksi anaerobic yang dilakukan oleh bakteri dan berbagai macam mikroorganisme. Ada 4 proses utama pada reaksi *anaerobic digesting* yaitu :

#### a. Hidrolisis

Merupakan tahap pertama dalam proses *anaerobic*. Dalam tahap ini unsur organik dipecah menjadi unsur yang lebih kecil atau pendekomposisi dengan bantuan enzim oleh mikroorganisme hidup. Unsur organik yang di pecah adalah seperti karbohidrat, lemak, asam nukleid, dan protein dikonversi menjadi glukosa, purin, dan piridin.

#### b. Acidogenesis

Pada proses *acidogenesis*, produk hasil dari proses hidrolisis diubah lagi oleh bakteri *acidogenic* (fermentatif) menjadi *methanogenic*, Asam lemak, glukosa, asam

amino didegradasi menjadi asetat, karbon dioksida, dan hidrogen (70%) maupun asam lemak volatil (VFA) dan alkohol (30%).

c. *Acetogenesis*

Pada proses *acetogenesis* alkohol dan asam lemak volatil (VFA) dioksidasi menjadi substansi metanogenik seperti asetat, hidrogen, dan karbon dioksida. Terkadang *acetogenesis* dan *methanogenesis* berjalan secara paralel, sebagai simbiosis dari dua kelompok organisme yang berbeda.

d. *Methanogenesis*

Produksi metana dan karbon dioksida dilakukan oleh bakteri metanogenik. 70% dari metana yang terbentuk berasal dari asetat, di mana 30% lainnya diproduksi dari hasil konversi hidrogen dan karbon dioksida.

Secara umum produk hasil *anaerobic digesting* memiliki komposisi yang berbeda-beda, bergantung kepada tipe bahan baku yang dipakai pada proses *digesting*, instalasi *digester*, saat proses terjadi, jangka waktu, dan lain-lain. Pada **Tabel 2.1** menunjukkan komposisi umum dari produk biogas.

Tabel 2.1 Komposisi Biogas

No	Komponen	Simbol Kimia	Komposisi
1	Metana	CH <sub>4</sub>	50-75 %
2	Karbon dioksida	CO <sub>2</sub>	25-45%
3	Uap air	H <sub>2</sub> O	2% (20 <sup>0</sup> C) – 7% (40 <sup>0</sup> C)
4	Oksigen	O <sub>2</sub>	<2%
5	Nitrogen	N <sub>2</sub>	<2%
6	Amonia	NH <sub>3</sub>	<1%
7	Hidrogen	H <sub>2</sub>	<1%
8	Hidrogen sulfide	H <sub>2</sub> S	<1%

Sumber : AS. Teodorita dan R. Dominik, 2008

## 2.2.2 Karakteristik gas yang terkandung dalam biogas

### a. Metana (CH<sub>4</sub>)

Adalah senyawa hidrokarbon sederhana dengan satu atom karbon terpasang oleh ikatan tunggal empat atom hidrogen. Metana murni tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak beracun. Senyawa ini mudah terbakar sehingga dalam penggunaannya diberi bau-bauan agar mudah terdeteksi jika terjadi kebocoran. Reaksi pembakaran metana pada penelitian kali ini dapat dilihat dalam persamaan berikut ini:



Adapun sifat dari metana adalah sebagai berikut:

- Massa molar : 16,043 kg/kmol
- Densitas / massa jenis pada tempetarur 25 °C (ρ) : 0,6604 kg/m<sup>3</sup>
- Kalor spesifik pada tekanan konstan (Cp) : 1,7354 kJ/(kg.K)
- Kalor spesifik pada volume konstan (Cv) : 2,2537 kJ/(kg.K)
- Low Heating Value (LHV) : 7973,13 kkal/m<sup>3</sup>
- High Heating Value (HHV) : 8851,43 kkal/m<sup>3</sup>

### b. Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>)

Senyawa yang berasal dari unsur karbon dan oksigen ini tidak berbau, berwarna dan massa jenisnya lebih berat dari udara. Dapat dihasilkan dari pembakaran, fermentasi cairan, dan hembusan nafas manusia. Berikut sifat dari gas karbon dioksida:

- Massa molar : 44,01 kg/kmol
- Densitas / massa jenis pada tempetarur 25 °C (ρ) : 1,6658 kg/m<sup>3</sup>
- Kalor spesifik pada tekanan konstan (Cp) : 0,846 kJ/(kg.K)
- Kalor spesifik pada *volume* konstan (Cv) : 0,657 kJ/(kg.K)

### c. Nitrogen (N<sub>2</sub>)

Nitrogen adalah salah satu unsur golongan VA yang merupakan unsur non logam dan gas yang paling banyak di atmosfer bumi. Nitrogen merupakan unsur yang relatif stabil, tetapi membentuk isotop-isotop yang empat di antaranya bersifat radioaktif. Nitrogen tidak mudah terbakar dan tidak

memperbesar pembakaran. Energi ikatnya cukup tinggi sehingga sangat stabil dan sulit bereaksi. Pada temperatur yang rendah nitrogen dapat berbentuk cairan atau bahkan kristal padat yang tidak berwarna (bening). Dalam penelitian ini, nitrogen digunakan sebagai gas yang menyelubungi api agar dapat terisolasi dengan udara lingkungan. Berikut merupakan sifat dari Nitrogen:

- Densitas pada 25°C : 1.1513 kg/m<sup>3</sup>
- Massa molar : 28.013 kg/kmol
- Kalor spesifik pada tekanan konstan (Cp) : 0.74 kJ/kg.K
- Kalor spesifik pada *volume* konstan (Cv) : 1.040 kJ/kg.K

d. Oksigen (O<sub>2</sub>)

Oksigen adalah unsur yang menyusun 21% dari udara di atmosfer. Oksigen merupakan senyawa yang sangat dibutuhkan untuk semua makhluk hidup. Selain itu oksigen juga banyak digunakan dalam dunia industri contohnya pengelasan, pembakaran, pemotongan, pemanasan, serta yang lain. Di dalam proses pembakaran, oksigen merupakan unsur yang paling penting dikarenakan jika tanpa adanya oksigen maka proses pembakaran yang berupa proses oksidasi bahan bakar tidak akan dapat berlangsung. Berikut merupakan sifat dari Oksigen:

- Massa molar : 32,06 kg/kmol
- Densitas / massa jenis pada temperatur 25 °C ( $\rho$ ) : 1,31725 kg/m<sup>3</sup>
- Kalor spesifik pada tekanan konstan (Cp) : 0,918 kJ/(kg.K)
- Kalor spesifik pada *volume* konstan (Cv) : 0,661 kJ/(kg.K)

### 2.3 Definisi Pembakaran

Pembakaran adalah suatu reaksi oksidasi yang berlangsung secara cepat antara bahan bakar dan oksidator disertai dengan proses pelepasan panas, atau panas dan cahaya. Reaksi ini berjalan spontan dan jika bahan bakar serta oksidator disuplai secara terus menerus maka akan berlangsung secara berkelanjutan karena adanya suplai kalor yang dibangkitkan oleh reaksi itu sendiri. Pembakaran sempurna hanya terjadi pada lingkungan yang memiliki oksigen secara memadai serta perbandingan yang juga sesuai. Pada **gambar 2.1** merupakan ilustrasi skematik dari proses pembakaran.



Gambar 2.1 Skematik proses Pembakaran

Sumber : Wardana (2008:1)

Proses pembakaran dapat terjadi jika bahan bakar teroksidasi. Pada **persamaan (2-1)** merupakan contoh reaksi pembakaran sempurna dari biogas (metana dan karbon dioksida) dengan Oksigen. Pada persamaan tersebut, Metana akan dioksidasi oleh gas oksigen sehingga menghasilkan panas, kemudian panas yang dihasilkan akan digunakan kembali sebagian untuk membangkitkan pembakaran selanjutnya sehingga terjadi pembakaran yang terus menerus.

Untuk proses pembakaran tidak sempurna, maka akan terbentuk CO, CO<sub>2</sub>, dan H<sub>2</sub>O. 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

Stoikiometri adalah kesetimbangan yang terjadi pada reaktan dan produk dari suatu reaksi kimia. Sehingga pembakaran stoikiometri merupakan pembakaran yang semua unsur dan senyawa sebelum reaksi akan menghasilkan berbagai produk dengan sempurna.

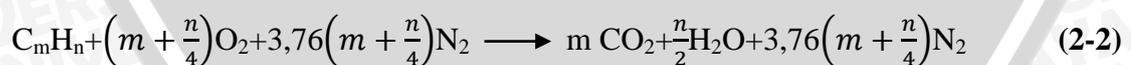
Pada proses pembakaran suatu bahan bakar selalu dibutuhkan oksigen agar proses pembakaran itu dapat berlangsung. Seringkali kita jumpai proses pembakaran menggunakan oksigen pada lingkungan didapatkan dari udara sekitar. Hal ini dikarenakan udara sekitar yang berlimpah serta gratis dalam pemanfaatannya. Dimana oksigen, nitrogen, argon, karbon dioksida, uap air, serta sejumlah gas dan presentase lain dalam persentase yang berbeda beda. Komposisi dari udara lingkungan tersebut dapat dilihat pada **Tabel 2.2**.

**Tabel 2.2** Komposisi Udara kering

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

Sumber : Bayong (2004)

Untuk memudahkan perhitungan dalam reaksi pembakaran, maka untuk Oksigen dapat diasumsikan sebesar 21% dan 79% untuk Nitrogen. Sehingga dalam penggunaan 1 mol O<sub>2</sub> akan melibatkan penggunaan  $\left(\frac{79,0}{21,0}\right) = 3,76$  mol N<sub>2</sub>. Agar menjadi proses pembakaran yang sempurna maka semua atom C harus dapat bereaksi menjadi CO<sub>2</sub> dan semua gas H<sub>2</sub> dapat bereaksi menjadi H<sub>2</sub>O. Reaksi pembakaran sempurna dapat dituliskan sebagai berikut:



Persamaan diatas menggunakan jumlah udara yang sesuai atau biasa disebut udara stoikiometri. Namun, 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 pembakarannya.

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

Rasio udara-bahan bakar atau AFR, merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk membandingkan jumlah bahan bakar dan jumlah udara pembakaran. Untuk membandingkannya perlu diketahui persamaan reaksi yang terjadi dalam proses pembakaran. Rasio udara atau bahan bakar (*air-fuel ratio*) dapat dilihat pada persamaan berikut, dimana N pada **persamaan (2-3)** adalah jumlah mol sedangkan M pada **persamaan (2-4)** adalah massa molekul. AFR juga dapat dinyatakan dalam perbandingan *volume* karena sebanding dengan perbandingan mol. Perbandingan *volume* ini sering digunakan untuk bahan bakar gas.

$$(AFR) = \left( \frac{N_{udara}}{N_{bahan\ bakar}} \right) \quad (2-3)$$

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

### 2.3.3 Udara berlebih dan Udara Teoritis

Dalam kenyataannya pembakaran sempurna sangat sulit untuk direalisasikan dikarenakan berbagai hal. Berbagai cara dilakukan agar pembakaran dapat terjadi mendekati- sempurna. Salah satunya dengan cara menambah udara ke dalam ruang bakar.

Persen udara berlebih dilambangkan dengan  $\lambda$  (lamda). Dimana secara matematis persen udara berlebih dapat dirumuskan sesuai **persamaan (2-5)** :

$$\lambda = \frac{AFR_{aktual} - AFR_{stoik}}{AFR_{stoik}} \times 100 \% \quad (%) \quad (2-5)$$

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

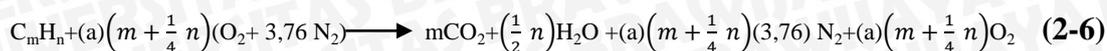
Udara berlebih (*Excess Air*) merupakan udara yang diberikan untuk pembakaran dalam jumlah lebih besar dari jumlah yang perlukan bahan bakar untuk terbakar sempurna. Dari sinilah juga muncul istilah lain yaitu udara teoritis. Hubungan antara udara teoritis dengan udara lebih ( $\lambda$ ) adalah sebagai berikut ini:

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

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

$$\text{Persen udara berlebih} = \text{Persen udara teoritis} - 100\%$$

Untuk mengetahui lebih lanjut dimana letak dari persen udara lebih, dapat dilihat dari **persamaan (2-6)**:



Notasi a dilambangkan untuk menunjukkan koefisien pada sebuah unsur. Dari rumus reaksi kimia dapat dilihat reaksi menggunakan udara berlebih, stoikiometri, atau kekurangan udara.

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*)

Pada proses pembakaran sangat diharapkan berlangsungnya pembakaran secara sempurna atau yang kita kenal dengan pembakaran stoikiometri karena dapat menghasilkan efisiensi pembakaran yang sempurna dan menghasilkan energi serta gas buang yang tidak merusak lingkungan. Akan tetapi pembakaran sempurna sangat susah untuk dilakukan dan hanya dapat mendekati sempurna. Oleh karena itu dibutuhkan parameter yang dapat membandingkan pembakaran itu berlangsung mendekati sempurna atau tidak.

Parameter yang dapat membandingkan pembakaran itu berlangsung secara sempurna atau tidak adalah dengan melihat *equivalent rationya*. *Equivalent ratio* tersebut dihitung dengan membandingkan antara AFR pembakaran stoikiometri dengan AFR pembakaran aktual yang terjadi. Rumus perhitungan *equivalent ratio* yang dilambangkan dengan Φ (phi) dapat dilihat pada **persamaan (2-7)** berikut ini.

$$\Phi = \frac{AFR \text{ stoik}}{AFR \text{ aktual}} \quad (2-7)$$

Rasio ekuivalen umumnya digunakan untuk menentukan apakah campuran udara dengan bahan bakar merupakan campuran kaya, miskin, atau stoikiometri. Yang dimaksudkan pembakaran kaya adalah pembakaran dengan persentase bahan bakar yang lebih besar dibanding oksidatornya. Sedangkan pembakaran miskin adalah pembakaran dengan persentase oksidatornya lebih besar dibandingkan dengan bahan bakarnya. Jika ditinjau berdasarkan angka nilai *equivalent ratio* maka akan dirumuskan dengan:

- $\Phi > 1$  terdapat kelebihan bahan bakar, komposisi kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*)
- $\Phi < 1$  Komposisi ini adalah komposisi miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*)

- $\Phi = 1$  merupakan campuran stoikiometrik (pembakaran sempurna)

## 2.4 Pembakaran Premiks dan Difusi

Ada dua jenis klasifikasi pembakaran, yaitu pembakaran secara premiks dan difusi. Perbedaan mendasar antara keduanya adalah pada proses pencampuran bahan bakar dan oksidatornya. Pada pembakaran difusi, tidak ada proses pencampuran bahan bakar dan oksidator sebelum pembakaran terjadi. Sehingga pencampuran oksidator dan bahan bakar bercampur secara alami oleh adanya difusi molekul. Sedangkan pada pembakaran premiks sebelum masuk proses pembakaran, bahan bakar dan oksidator dicampur terlebih dahulu.

### 2.4.1 *Flashback dan Liftoff*

*Flashback* dan *liftoff* merupakan istilah yang menyatakan kesetimbangan yang terjadi pada api saat dilakukan proses pembakaran. Ketika kecepatan rambat api lebih besar daripada kecepatan reaktan dan perambatan api tidak disertai dengan adanya proses *quenching*, maka terjadilah *flashback*.

Pada  $\text{CH}_4$  terjadinya *flashback* cenderung lebih rendah kemungkinannya dibandingkan dengan gas manufaktur lainnya. Hal ini dikarenakan gas  $\text{CH}_4$  memiliki kecepatan rambat yang lebih kecil.

Sedangkan *liftoff* adalah keadaan yang terjadi saat api merambat lebih pelan dibandingkan aliran bahan bakar yang keluar dari mulut nosel dan stabil pada jarak tertentu dari mulut nosel. Keadaan ini bergantung dari kondisi api dan aliran yang keluar dari nosel. Peningkatan kecepatan reaktan yang semakin tinggi menyebabkan api akan semakin menjauh dari hulu dan menuju hilir dan kemudian mati. Matinya api yang diakibatkan oleh hal ini disebut dengan *blowoff*.

## 2.5 Karakteristik Pembakaran

Dalam proses pembakaran akan dihasilkan panas atau panas serta cahaya. Dalam pembakaran  $\text{CH}_4$  dengan oksidator berupa oksigen akan dihasilkan panas dan cahaya. Cahaya yang dihasilkan dari proses pembakaran ini kemudian disebut dengan api. Api merupakan energi yang dihasilkan dari proses pembakaran yang memiliki intensitas bervariasi dan akan dilihat manusia pada intensitas tertentu. Api juga dapat menunjukkan hasil dari proses reaksi pembakaran.

Nyala api yang dihasilkan dari rekasi pembakaran akan berbeda beda, tergantung pada komposisi bahan bakar serta presentase senyawa yang terlibat dalam proses oksidasi tersebut. Karakteristik nyala api yang dihasilkan tersebut meliputi tempetarur rata-rata, warna api, serta lebar api.

### 2.5.1 Tempetarur Rata-Rata

Proses pembakaran adalah oksidasi bahan bakar yang berlangsung secara cepat serta mengeluarkan sejumlah energi. Energi tersebut dalam bentuk energi panas serta cahaya. Energi panas yang dihasilkan dari proses pembakaran tersebut dipengaruhi oleh berbagai hal diantaranya tekanan saat terjadi pembakaran diantaranya tempetarur ruangan, tekanan dan presentase dari bahan bakar serta oksidator.

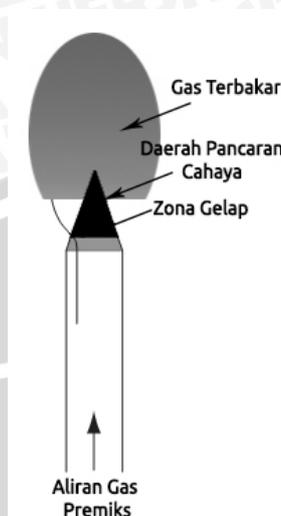
Temperatur ruangan dapat berpengaruh besar pada temperatur yang dihasilkan saat pembakaran. Karena pada saat temperatur ruangan lebih rendah dan perbedaannya sangat besar maka akan meurunkan kalor hasil pembakaran yang disebabkan berpindahnya panas ke lingkungan. Tekanan lingkungan juga ikut berpengaruh dalam pembakaran yang menyebabkan perbedaan temperatur rata-rata yang dihasilkan. Selain itu komposisi dari rekatan yang berbeda beda akan menghasilkan temperatur rata-rata yang berbeda pula. Dalam penelitian ini presentase  $\text{CO}_2$  mempengaruhi temperatur rata-rata yang dihasilkan karena sifatnya yang inhibitor, sifat dari  $\text{CO}_2$  yang merupakan inhibitor akan di bahas pada sub bab 2.6.

### 2.5.2 Warna Api

Pembakaran merupakan perubahan energi yang menghasilkan panas serta cahaya. Cahaya yang dihasilkan dari pembakaran pun bermacam-macam warna yang dihasilkan. Tergantung dari komposisi bahan bakar serta oksidatornya. Pada berbagai api yang dihasilkan dari pembakaran menghasilkan berbagai warna berdasarkan panjang gelombang yang dipancarkan. Semakin pendek panjang gelombang yang dipancarkan maka nyala api akan berwarna semakin biru, dan semakin panjang maka akan kemerah merahan. Hal ini berdasarkan sifat dari spektrum warna yang berbeda-beda panjang gelombangnya.

Pada pembakaran dengan bunsen burner yang terlihat pada **gambar 2.2** terdapat berbagai macam zona daerah reaksi pembakaran. Zona gelap merupakan daerah di mana gas premiks yang belum terbakar karena reaksi kimia dan proses pelepasan panas pembakaran terjadi setelah melewati daerah pancaran cahaya. Daerah pancaran cahaya

memiliki presentase paling tinggi dibandingkan zona yang lain. Warna dari cahaya yang dikeluarkan juga bergantung pada perbandingan bahan bakar dan udara (*equivalent ratio*).



Gambar 2.2: Deskripsi umum nyala api Bunsen laminar  
Sumber : Irvin Glassman (2008: 152)

Pengaruh campuran bahan bakar dan udara pada pengujian bunsen *burner* maka akan dapat dilihat api campuran miskin berwarna merah dan berjelaga dan pada api campuran kaya terbentuk api berwarna biru atau lebih terang. Hal ini juga mempengaruhi api dimana api yang berwarna lebih terang memiliki lebih tinggi.

Campuran tersebut dapat diketahui dengan melihat *equivalent ratio* dari udara-bahan bakar ( $\Phi$ ). Pada pembakaran api campuran miskin, bahan bakar akan habis terbakar di mana kelebihan oksidator membuat semua presentase bahan bakar bereaksi dan terbakar. Sedangkan pada api campuran kaya, bahan bakar yang berlebih akan terbuang karena tidak semua bahan bakar dapat bereaksi dan terbakar dikarenakan oksidator yang kurang memenuhi.

Jika dilihat dari tempetarurnya, api yang berwarna biru memiliki temperatur yang lebih panas jika dibandingkan dengan api dengan warna merah. Hal ini dikarenakan panjang dari gelombang yang dipancarkan saat api bertempetarur tinggi memiliki panjang gelombang yang pendek dengan frekuensi yang tinggi.

### 2.5.3 Lebar Api

Lebar dari api dipengaruhi oleh berbagai macam hal, yakni laju aliran massa bahan bakar, fraksi bahan bakar pada permukaan api dan fraksi bahan bakar pada sumbu nosel.

Konsentrasi bahan bakar yang semakin besar pada sumbu nosel akan membuat api semakin lebar begitu pula sebaliknya. Namun hal ini memperhitungkan jumlah oksidator yang dapat berikatan sehingga dapat mengoksidasi bahan bakar. Pembakaran yang lebih sempurna akan menghasilkan lebar api yang lebih besar. Hal ini dikarenakan saat pembakaran mendekati stoikiometri maka bahan bakar dan oksidator memiliki perbandingan yang sesuai sehingga seluruhnya akan terbakar sempurna sempurna dan akan menghasilkan nyala api yang lebih lebar dikarenakan seluruh bahan bakar akan terbakar habis.

Pada penelitian kali ini presentase dari gas  $\text{CO}_2$  juga berpengaruh pada lebar api. Gas yang memiliki sifat inhibitor tersebut tidak ikut bereaksi namun menurunkan kalor yang dihasilkan dalam pembakaran serta menghambat pembakaran yang terjadi. Oleh karena itu semakin besar presentase gas  $\text{CO}_2$  maka lebar api akan semakin kecil karena pembakaran yang terjadi akan terhambat oleh gas  $\text{CO}_2$  tersebut sehingga proses oksidasi bahan bakar tidak dapat berlangsung secara baik.

## 2.6 *Inhibitor*

*Inhibitor* merupakan sifat dari suatu zat yang dapat penghambat atau zat yang bersifat menurunkan laju reaksi kimia, dalam hal ini reaksi kimia pembakaran. Inhibitor merupakan kebalikan dari katalis. Pada saat proses reaksi pembakaran zat yang bersifat *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).

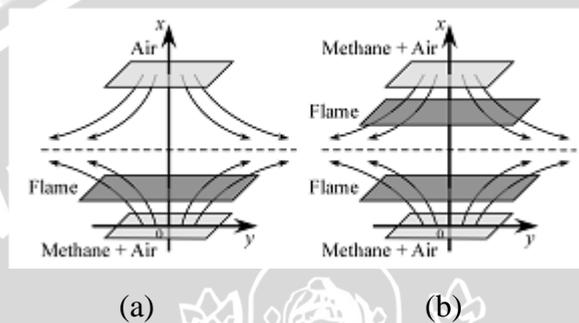
Chaineux J. (2011) mengamati pengaruh dari penambahan  $\text{CO}_2$  pada pembakaran  $\text{CH}_4$  dan oksigen dalam penelitiannya tentang karakteristik ledakan pada tangki bulat, mendapati penambahan konsentrasi dari  $\text{CO}_2$  berpengaruh secara signifikan dalam mereduksi dampak dari ledakan yang terjadi.

Dalam penelitian yang saya lakukan. Inhibitor berupa gas  $\text{CO}_2$  akan ditinjau pengaruhnya jika dicampurkan dalam pembakaran gas  $\text{CH}_4$ . Diperkirakan pada saat pencampuran gas  $\text{CO}_2$  ini akan menyebabkan kalor pembakaran yang dihasilkan akan menurun serta proses pembakaran akan terganggu. Hal ini di tandai dengan turunnya tempetarur rata-rata hasil pembakaran serta api yang semakin mengecil karena pembakaran yang terjadi dengan adanya zat *inhibitor* tersebut.

## 2.7 Counter Flow Premixed Flame

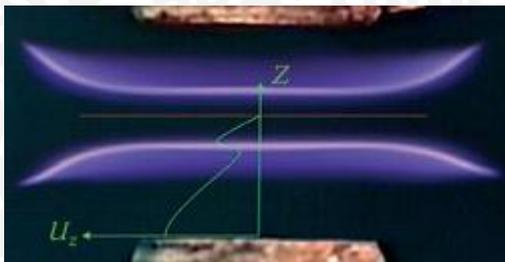
Instalasi *counterflow burner* merupakan instalasi yang sangat cocok untuk mempelajari karakteristik pembakaran. Hal ini dikarenakan pada instalasi ini menghasilkan nyala api yang sederhana di mana antara daerah *flame front* dan daerah bayangan api terlihat dengan sangat jelas (Powling J. 1949).

*Counterflow burner* merupakan burner dengan prinsip aliran dari dua pipa yang saling berlawanan arah. Jika debit aliran pipa atas dan bawah sama maka api dari instalasi tersebut datar.



Gambar 2.3 (a) *single flame* aliran bahan bakar dan oksidator hanya dari salah satu pipa (b) *twin flame* aliran bahan bakar dan oksidator pada kedua pipa yang berlawanan arah. Sumber : Irvin Glassman (2008: 314)

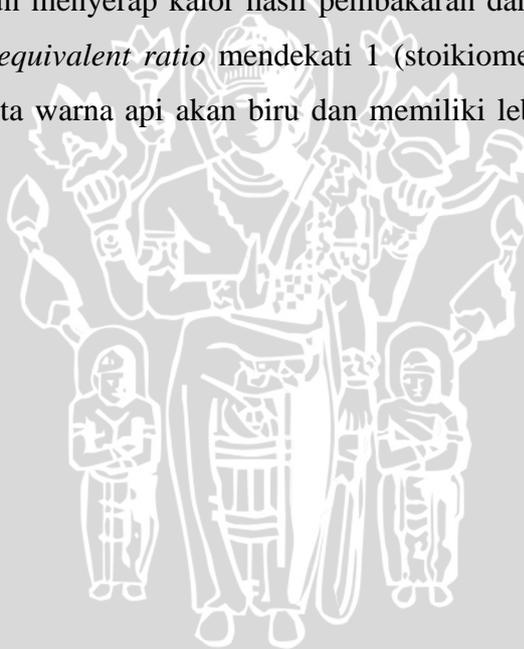
Jenis instalasi ini dapat digunakan baik pada pembakaran difusi maupun premiks. Pada konfigurasi api premiks *counterflow burner* yang telah ditunjukkan pada **gambar 2.3** terdapat dua jenis api yang dapat terbentuk yaitu *single flame* dan *twin flame*. *Single flame* terjadi ketika pada salah satu saluran *counterflow burner* berisi campuran bahan bakar dan oksidator sedangkan lawan dari saluran tersebut berisi gas inert yang tidak ikut beraksi dalam pembakaran. dalam hal ini gas  $N_2$  yang digunakan sebagai gas inert.  $N_2$  akan bersifat inert karena tersusun atas molekul diatomik dan memiliki ikatan kovalen sehingga tidak reaktif dalam kondisi normal. *Twin flame* terjadi karena pada dua saluran yang berlawanan pada instalasi *counterflow burner* sama-sama berisi bahan bakar dan oksidator. Nampak hasil api *twin flame* dapat dilihat pada **gambar 2.4** berikut ini.



Gambar 2.4 Foto *close up* dari konfigurasi *twin flame* campuran isooktana dan udara  
Sumber : Chih-Jen Sung, 2009

## 2.8 Hipotesis

Hipotesis penelitian ini adalah semakin besar presentase gas *inhibitor*  $\text{CO}_2$  pada campuran bahan bakar, maka akan menyebabkan karakteristik api yang semakin gelap. Selain itu distribusi tempetarur pada api akan menurun seiring dengan naiknya persentase gas  $\text{CO}_2$ . Hai ini dikarenakan sifat dari gas  $\text{CO}_2$  sebagai gas *inhibitor* yang tidak ikut bereaksi namun menyerap kalor hasil pembakaran dan mengganggu proses pembakaran. Serta saat *equivalent ratio* mendekati 1 (stoikiometri) maka tempetarur api akan lebih tinggi serta warna api akan biru dan memiliki lebar api yang semakin lebar.



## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Metode Penelitian

Pada penelitian kali ini digunakan metode eksperimental terhadap pengaruh konsentrasi CO<sub>2</sub> dan ekuivalen rasio pembakaran terhadap distribusi temperatur serta karakteristik nyala api pembakaran premiks campuran CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> pada instalasi pembakaran *counterflowburner*.

#### 3.2 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 lain. Variabel bebas dalam penelitian ini adalah:

- a. Konsentrasi CH<sub>4</sub> pada campuran biogas yaitu 40%, 50%, dan 60%
- b. Konsentrasi gas Karbon dioksida (CO<sub>2</sub>) pada campuran bahan bakar mulai 0%, 10%, 20%, 30% dan 40%.
- c. Ekuivalen rasio pada pembakaran sebesar 0,94 , 1,17 dan 1,40

2. Variabel terikat

Variabel yang besarnya dipengaruhi dari variabel bebas dan diketahui setelah penelitian dilakukan. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah karakteristik nyala api premiks yang meliputi warna api, lebar api, dan distribusi dari api.

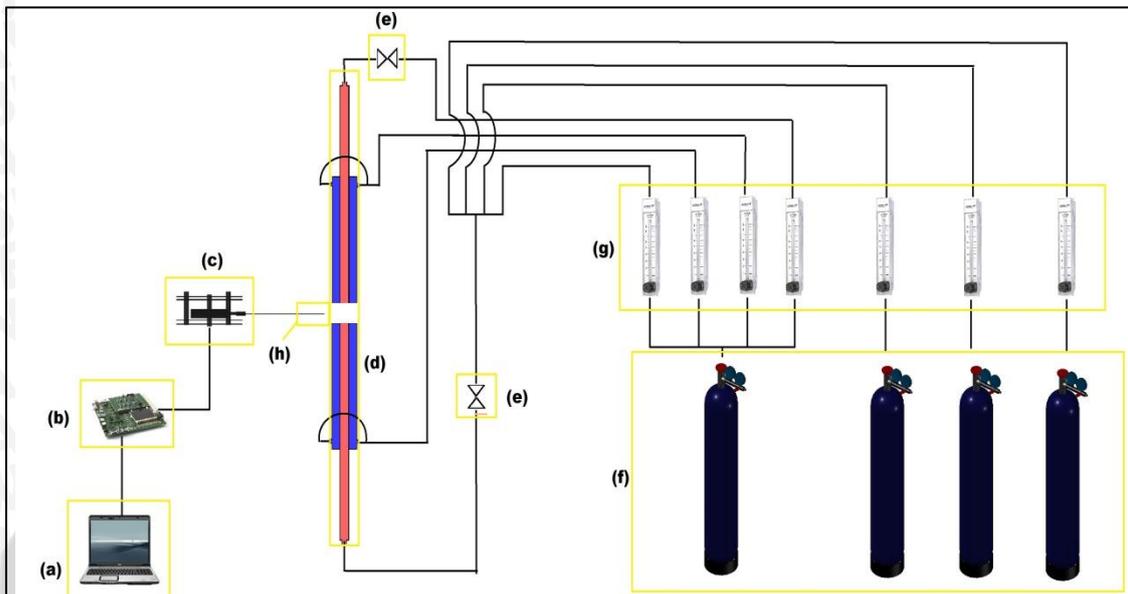
3. Variabel terkontrol

Variabel yang nilainya dijaga tetap selama pengujian. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah:

- a. Tekanan gas yang dimasukkan ke ruang bakar *Counterflow flame burner* sebesar 0,5 bar.
- b. Jarak antar pipa *Counterflow flame burner* adalah 20 mm.
- c. Konsentrasi oksidator 30% dan campuran bahan bakar 70% dari masa alir keseluruhan.

### 3.3 Skema Instalasi Penelitian

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



Keterangan Gambar:

- |   |                          |
|---|--------------------------|
| a) Komputer penerima data tempetarur serta pengendali step motor. | e) Katup pengaman motor. |
| b) Mikrokontroller step motor                                     | f) Tabung gas            |
| c) Instalasi penggerak <i>thermocouple</i>                        | g) <i>Flow meter</i>     |
| d) Instalasi Pipa <i>counterflow flame</i>                        | h) <i>Thermocouple</i>   |

Gambar 3.1 Skema Instalasi Alat Penelitian

Instalasi yang digunakan pada percobaan ini menggunakan konfigurasi *counterflow burner* yang diadopsi dari percobaan yang dilakukan oleh Mikami et al. Pembakaran yang akan dilakukan adalah pembakaran premiks dengan bahan bakar

Pembakaran yang dilakukan berjenis premiks, dapat dilihat pada **Gambar 3.1** bahan bakar yakni  $\text{CH}_4$ , oksidator yakni  $\text{O}_2$ , dan gas  $\text{CO}_2$  serta  $\text{N}_2$  dari tabung pada daerah (F) dialirkan menuju daerah (G) di mana terdapat *flowmeter* yang digunakan sebagai alat pengatur *flow rate* masing-masing gas. Kemudian gas tersebut mengalir melalui katup pengaman pada daerah (E) dan dialirkan pada perangkat *counterflow burner* (D) bagian bawah. Pada bagian atas pipa perangkat *counterflow burner* (D)

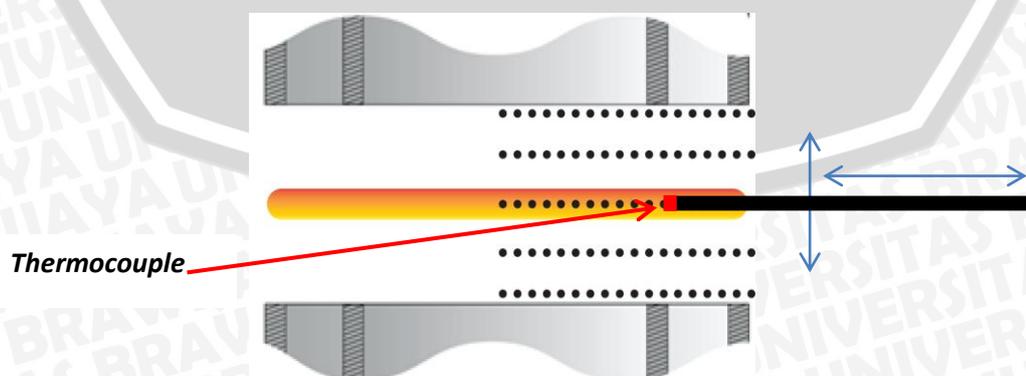
dialiri oleh gas  $N_2$  dengan debit aliran yang sama dengan debit aliran pada bagian bawah.

Pada perangkat *counterflow burner* (D) terdapat dua lapis pipa. Pipa pada bagian dalam berfungsi untuk mengalirkan gas yang akan diteliti. Sedangkan pada pipa bagian luar berguna untuk mengalirkan gas  $N_2$ . Gas  $N_2$  yang dialirkan pada sekeliling pipa utama berfungsi untuk mengisolasi gas yang akan diteliti dengan udara sekitar. Hal ini dimaksudkan agar udara luar tidak ikut bereaksi saat terjadinya pembakaran.

Pada semua gas yang akan dialirkan melalui perangkat *counterflow burner* (D) akan selalu melewati *flowmeter* (G) agar aliran dapat disesuaikan dengan eksperimen yang akan dilakukan.

Diameter pipa bagian dalam baik pada bagian atas maupun bawah berdiameter 1 Inch atau  $\pm 2.54$  cm dan panjang 75 cm. Sedangkan untuk pipa bagian luar memiliki diameter 1.5 Inch atau  $\pm 3.81$  cm dan panjang 40 cm. Jarak antar ujung pipa diatur sebesar 2 cm.

Pengambilan data berupa foto dilakukan oleh kamera yang akan langsung mengambil foto. Sedangkan alat pengukur temperatur dilakukan oleh *thermocouple* yang digerakkan oleh mekanisme step motor (C). Pergerakan step motor ini sesuai dengan perintah yang telah dimasukkan melalui komputer (A) dan mikrokontroler (B) dan kemudian berjalan secara vertikal dan horizontal. Data yang didapat oleh *thermocouple* (H) disimpan secara otomatis dengan menggunakan komputer. Alat pengukur (*thermocouple* (H)) dalam percobaan ini digerakkan secara horisontal dan vertikal dengan skema yang telah ditunjukkan pada **gambar 3.2**. pada gambar tersebut pengambilan dilakukan dengan 18 titik vertikal berjarak 1mm dan dilakukan pada lima tahapan dengan jarak masing-masing tahapan 2,5 mm.



Gambar 3.2 Skematik pengambilan data distribusi  
Sumber : Dokumentasi pribadi

### 3.4 Metode Pengambilan Data

Bahan bakar biogas yang digantikan oleh campuran  $\text{CH}_4$ ,  $\text{O}_2$ , serta gas  $\text{CO}_2$  sebagai zat pengotor dan gas  $\text{N}_2$  sebagai gas pengisi dialirkan dari pipa bagian dalam sebelah bawah, sedangkan gas dan nitrogen dialirkan dari pipa bagian atas.

Pada saat pengambilan data termometer *thermocouple* (H) ditempatkan pada posisi awal pergerakan. Sebelumnya debit aliran dari berbagai macam gas yang akan diteliti ini di atur sedemikian rupa dan kemudian dibakar dengan bantuan pemantik untuk pembakaran awalnya. Setelah api mulai stabil *thermocouple* digerakkan secara otomatis menggunakan mikrokontroler yang telah diatur oleh sesuai dengan ketentuan.

Saat *thermocouple* bergerak maka akan merekam setiap termometer yang dilalui oleh *thermocouple* kemudian data termometer tersebut disimpan secara otomatis pada .

Data yang didapat oleh *Thermocouple* kemudian dicatat oleh data *logger* untuk setiap variasi konsentrasi  $\text{CO}_2$ . Setelah pergerakan dan proses pengambilan data selesai, *Thermocouple* dikembalikan ke posisi awal kemudian bersiap untuk pengambilan data berikutnya.

Untuk proses pengambilan data :

1. Atur jarak antar pipa *counterflow* sesuai dengan jarak yang telah ditentukan.
2. Kemudian alirkan gas  $\text{CH}_4/\text{CO}_2/\text{N}_2$  dari pipa bagian bawah dan  $\text{O}_2/\text{N}_2$  dari pipa bagian atas bawah secara bersamaan sedikit demi sedikit.
3. Setelah bercampur di wilayah stagnansi pemantik dinyalakan.
4. Setelah api dinyalakan alirkan gas  $\text{O}_2$  dari pipa bawah bersamaan dengan  $\text{O}_2$  dari pipa atas ditutup sedikit demi sedikit sampai dengan konsentrasi yang telah ditentukan. Hal ini dilakukan untuk mengantisipasi terjadinya *flasback* setelah penyalaan api. Sebelum dimulai penelitian dan pengambilan data, debit aliran masing-masing gas harus disesuaikan dengan variabel penelitian yang telah ditentukan. Proses pengambilan data dibagi menjadi dua tahapan sebagai berikut :
  - a. Pengambilan data karakteristik api (warna dan lebar api) dilakukan dengan menggunakan pemotretan pada api dengan menggunakan kamera yang terletak bersilangan arah dengan *thermocouple*.
  - b. Pengambilan data dilakukan oleh *thermocouple* yang diletakkan pada posisi awal. Setiap penurunan konsentrasi gas  $\text{CH}_4$  maupun  $\text{CO}_2$  (variabel penelitian) dilakukan

proses satu kali running perpindahan *Thermocouple* untuk mengetahui distribusi api pada setiap titik akibat pengaruh dari kedua gas tersebut (dalam hal ini CO<sub>2</sub> gas tersebut adalah zat pengotor dalam presentase biogas yang sesungguhnya). Setelah data terkumpul dilakukan pengulangan tiga kali dan hal ini dilakukan pula untuk mengumpulkan data pada dua variasi konsentrasi oksigen lainnya.

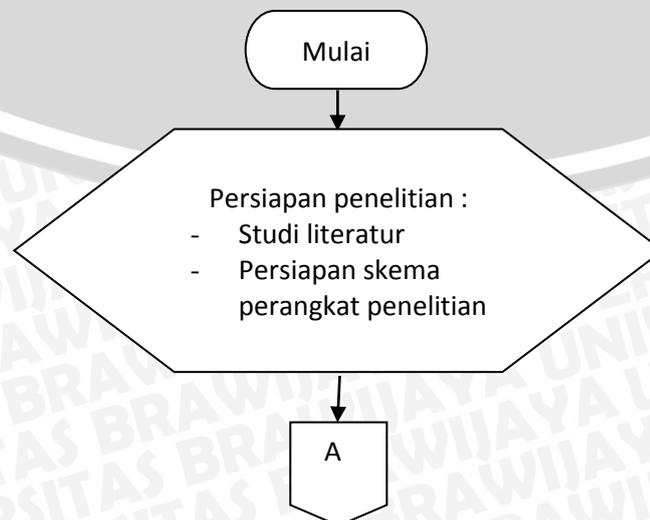
### 3.5 Metode Pengolahan Data

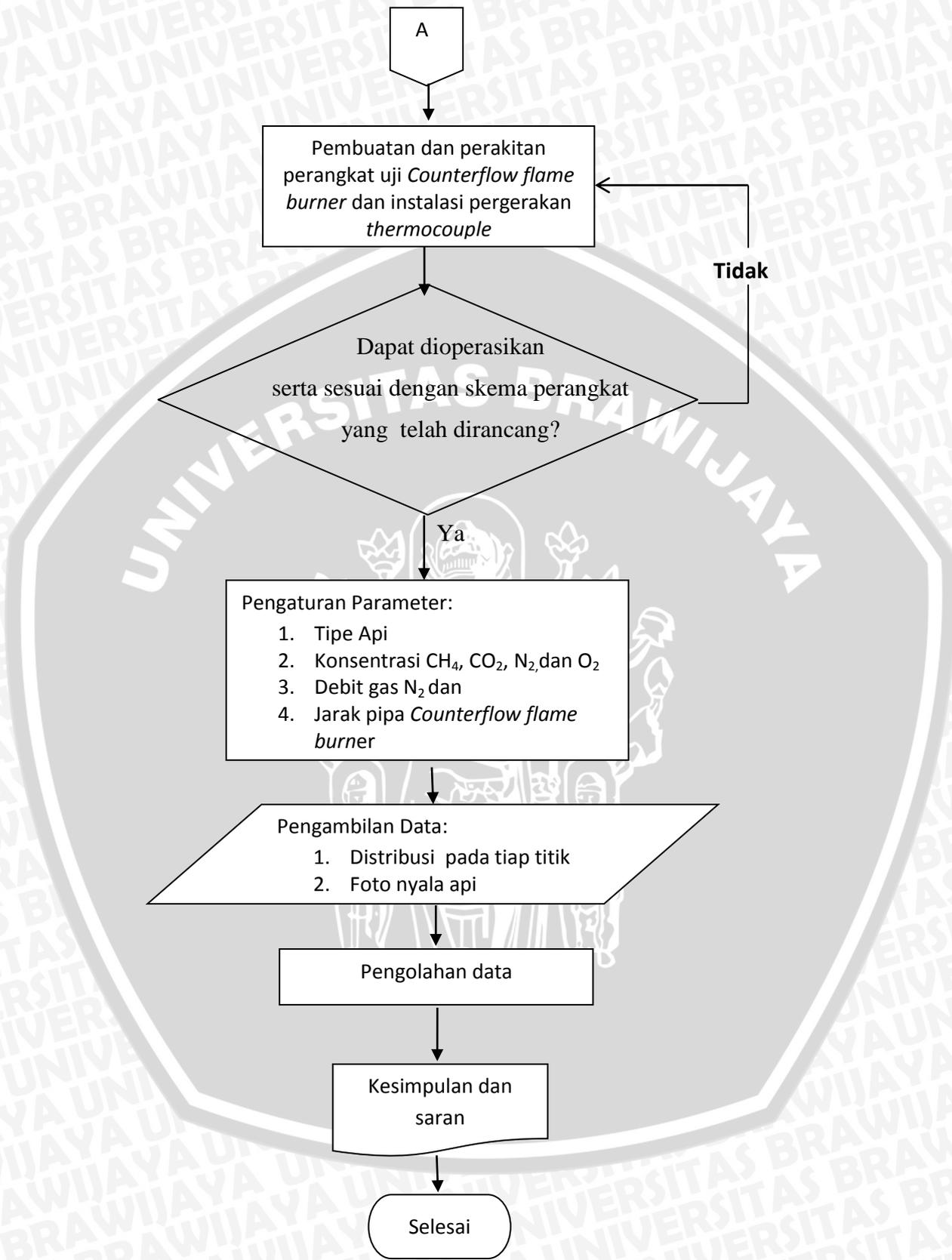
Pengolahan data pada penelitian ini dilakukan dengan cara:

1. Untuk pengambilan data distribusi pada setiap titik yang dilakukan oleh *Thermocouple* secara otomatis akan tersimpan pada data *logger*. Langkah berikutnya adalah pembuatan grafik berupa *color plot* dengan menggunakan software MATLAB spesifikasi *plotting* adalah *spline interpolation*. Perbedaan pada setiap variasi dianalisis untuk mengetahui pengaruh dari penambahan inhibitor CO<sub>2</sub>.
2. 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 pengskalaan lebar api. Cara pengukuran foto sendiri digunakan *software* Photoshop untuk mengolah hasil foto agar dapat diketahui dengan rinci ukuran lebar api pada foto maupun kondisi aslinya.

### 3.6 Diagram Alir Penelitian

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





Gambar 3.12 Diagram alir penelitian

## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Data Hasil Penelitian

##### 4.1.1 Data Karakteristik Pembakaran

Pengambilan data karakteristik nyala api diambil dengan berbagai variasi konsentrasi yang telah ditentukan. Variasi konsentrasi CH<sub>4</sub> sebesar 40%, 50%, 60% dengan ekuivalen rasio sebesar 0,94 , 1,17 , 1,40. Pada variasi tersebut diambil *sample* variasi konsentrasi CO<sub>2</sub> yang besarnya 40%, 30%, 20%, 10%, dan 0%. Pada penelitian ini menggunakan dua macam variasi masa alir yaitu 6 liter/menit dan 8 liter/menit. Pada pengujian kali ini menggunakan diameter pipa sebesar 2,54 cm.

Pada proses pembakaran aktual udara yang ikut dalam proses reaksi berlebih dan kekurangan udara sehingga koefisien dalam persamaan reaksinya akan berbeda sehingga menyebabkan nilai AFR yang berbeda pula

Pada pembakaran aktual udara yang diberikan sebesar 2,469 mol O<sub>2</sub> dengan 1,155 mol CH<sub>4</sub>. Maka perhitungan nilai AFR nya adalah:

$$\text{AFR aktual} = \left( \frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{bahan bakar}}} \right)$$

$$\text{AFR aktual} = \left( \frac{2,469}{1,155} \right) = 2,137 \left( \frac{\text{Mol Udara}}{\text{Mol Bahan bakar}} \right)$$

Pada reaksi pembakaran stoikiometri jika terdapat 1,155 mol CH<sub>4</sub> maka akan membutuhkan oksidator sebanyak 2,310 mol O<sub>2</sub> karena sesuai dengan rumus reaksi stoikiometri. Jadi saat kita mereaksikan dengan maka nilai AFR stoikiometrinya didapatkan:

$$\text{AFR stoikiometri} = \left( \frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{bahan bakar}}} \right)$$

$$\text{AFR stoikiometri} = \left( \frac{2,310}{1,155} \right) = 2 \left( \frac{\text{Mol Udara}}{\text{Mol Bahan bakar}} \right)$$

Maka dapat dihitung *equivalent ratio* untuk pembakarannya adalah:

$$\Phi = \frac{AFR \text{ stoik}}{AFR \text{ aktual}}$$

$$\Phi = \frac{2}{2,137}$$

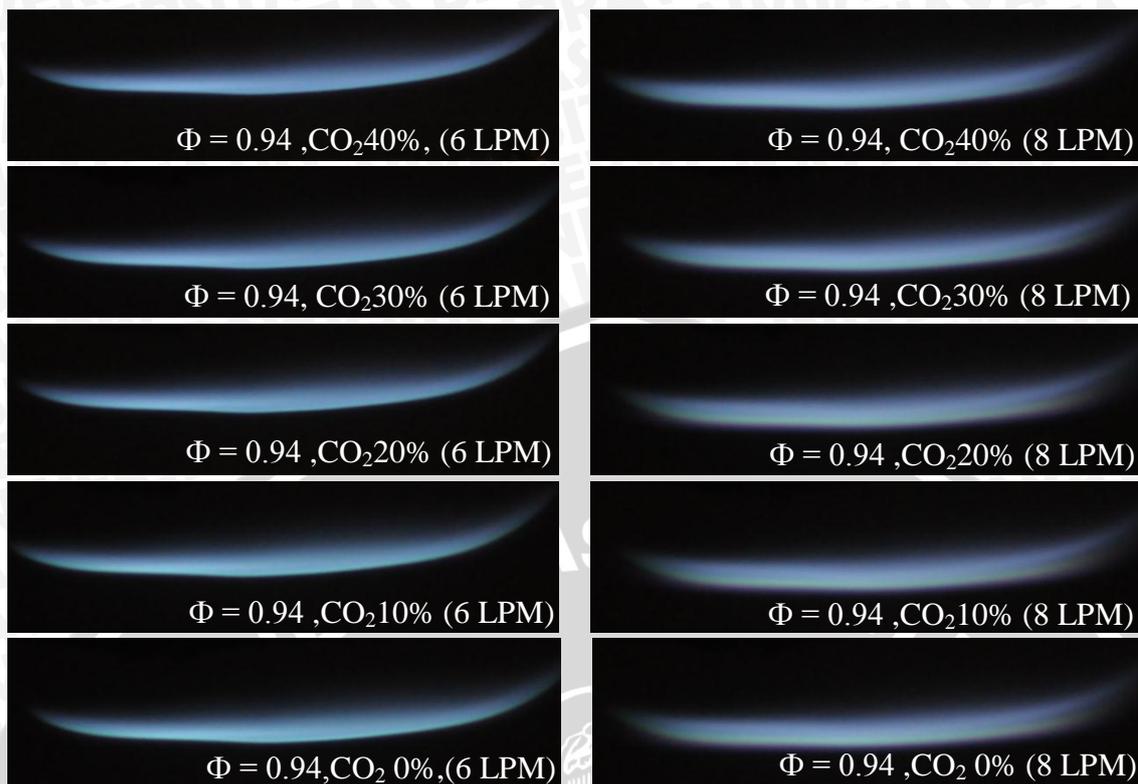
$$\Phi = 0,94$$

Pada perhitungan AFR yang dibandingkan yakni O<sub>2</sub> sebagai oksidator dan CH<sub>4</sub> sebagai bahan bakar . **Tabel 4.1** berikut ini merupakan tabel perhitungan ekuivalen rasio pada variasi data yang digunakan

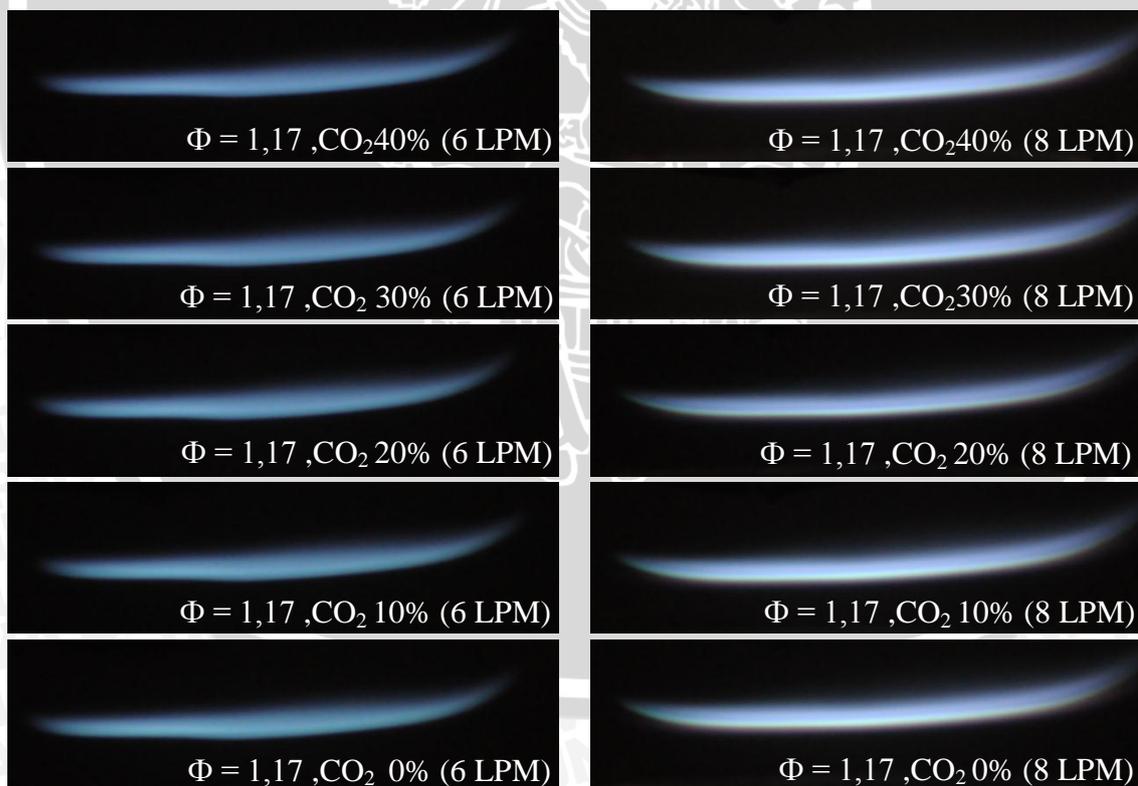
**Tabel 4.1** Perhitungan ekuivalen rasio ( $\Phi$ )

		Variasi CO <sub>2</sub>	AFR aktual	AFR stoik	$\Phi$
Variasi CH <sub>4</sub>	40%	40%	2,137	2	0,94
		30%	2,137	2	0,94
		20%	2,137	2	0,94
		10%	2,137	2	0,94
		0%	2,137	2	0,94
	50%	40%	1,709	2	1,17
		30%	1,709	2	1,17
		20%	1,709	2	1,17
		10%	1,709	2	1,17
		0%	1,709	2	1,17
	60%	40%	1,424	2	1,40
		30%	1,424	2	1,40
		20%	1,424	2	1,40
		10%	1,424	2	1,40
		0%	1,424	2	1,40

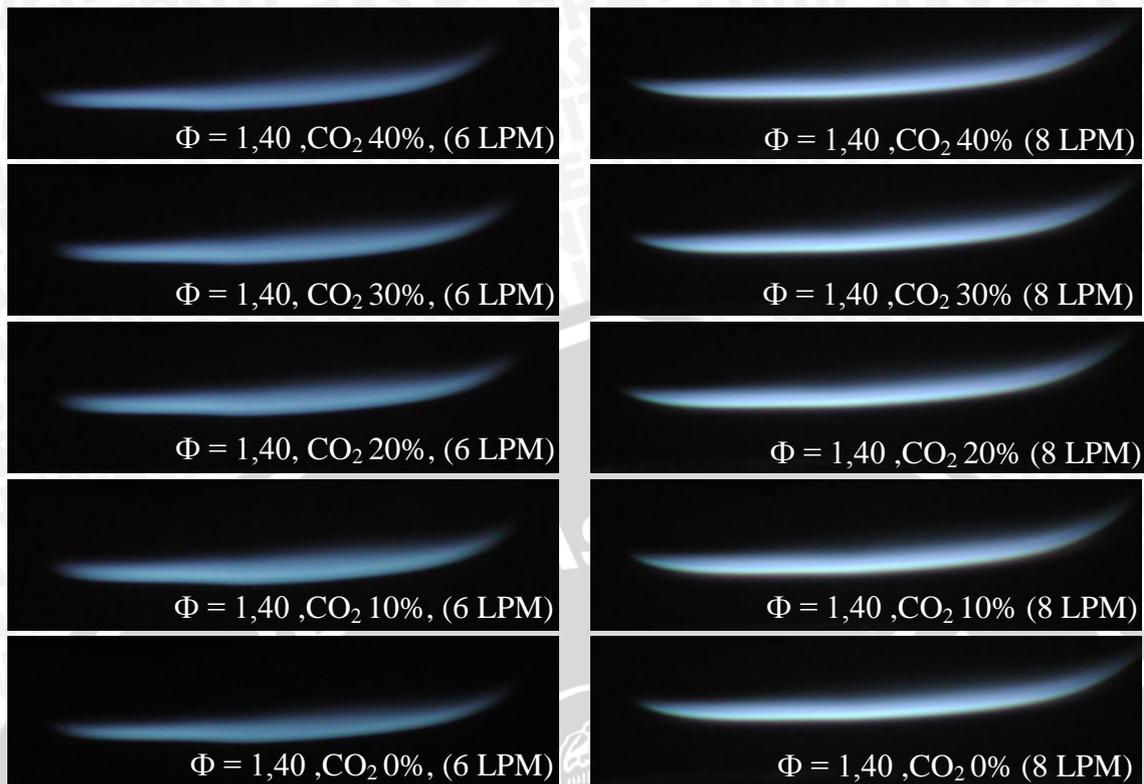
Pada tabel diatas nilai ekuivalen rasio ( $\Phi$ ) dibuat tetap agar dapat mengamati perbedaan karakteristik nyala api, distribusi temperatur, temperatur rata-rata yang pasti saat komposisi gas CO<sub>2</sub>



**Gambar 4.1** Foto api variasi  $\text{CH}_4$  40% 6 LPM dan 8 LPM



**Gambar 4.2** Foto api variasi  $\text{CH}_4$  50% 6 LPM dan 8 LPM



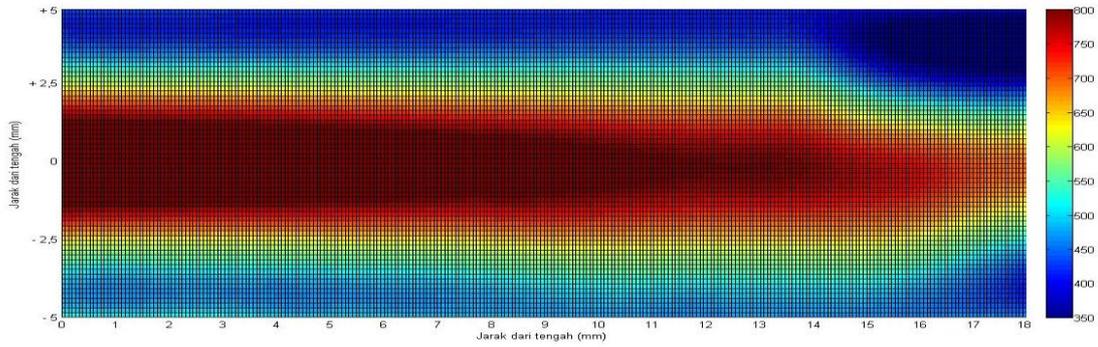
**Gambar 4.3** Foto api variasi CH<sub>4</sub> 60% 6 LPM dan 8 LPM

**Tabel 4.2** Data lebar api

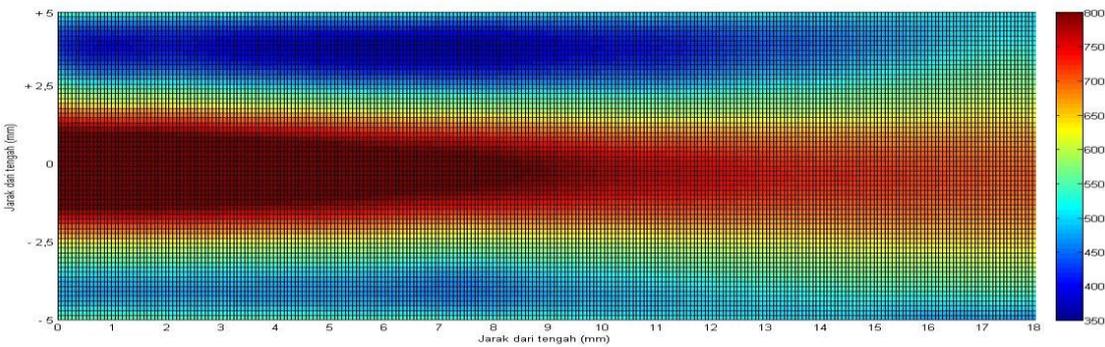
LPM	Φ	Komposisi CH <sub>4</sub>	40%	30%	20%	10%	0%
6 LPM	0,94	40%	5,328cm	5,346cm	5,407cm	5,543cm	5,597cm
	1,17	50%	4,775cm	4,805cm	4,832cm	4,853cm	4,871cm
	1,4	60%	4,584cm	4,642cm	4,678cm	4,669cm	4,696cm
8 LPM	0,94	40%	5,507cm	5,522cm	5,570cm	5,636cm	5,669cm
	1,17	50%	5,301cm	5,321cm	5,353cm	5,377cm	5,356cm
	1,4	60%	5,280cm	5,301cm	5,318cm	5,330cm	5,330cm

#### 4.1.2 Data Distribusi Temperatur

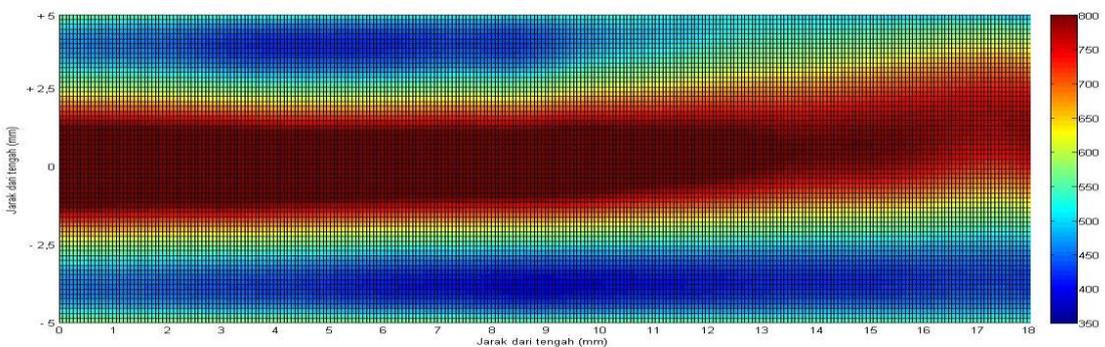
Hasil pengambilan data distribusi temperatur pada berbagai titik yang telah ditentukan kemudian diinterpolasikan dengan metode interpolasi *spline*. Data kemudian di *plotting* menggunakan software MATLAB. **Gambar 4.4** sampai **gambar 4.33** merupakan hasil *plotting* yang didapatkan.



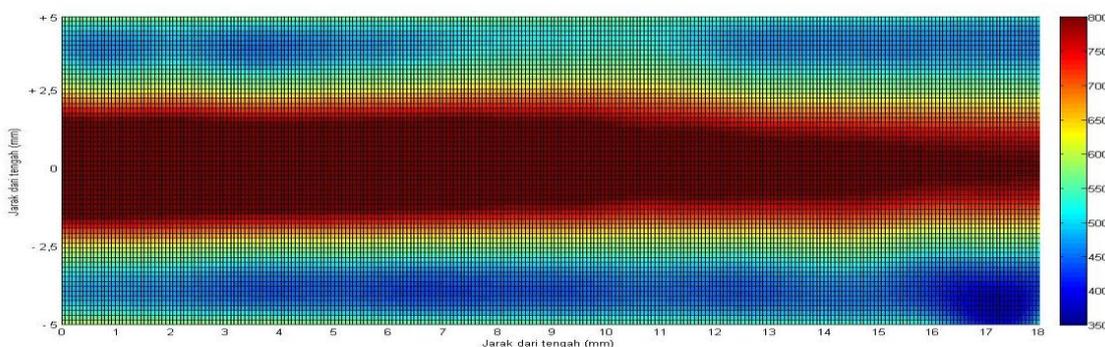
**Gambar 4.4** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 0.94, \text{CO}_2 40\%$  (8 LPM)



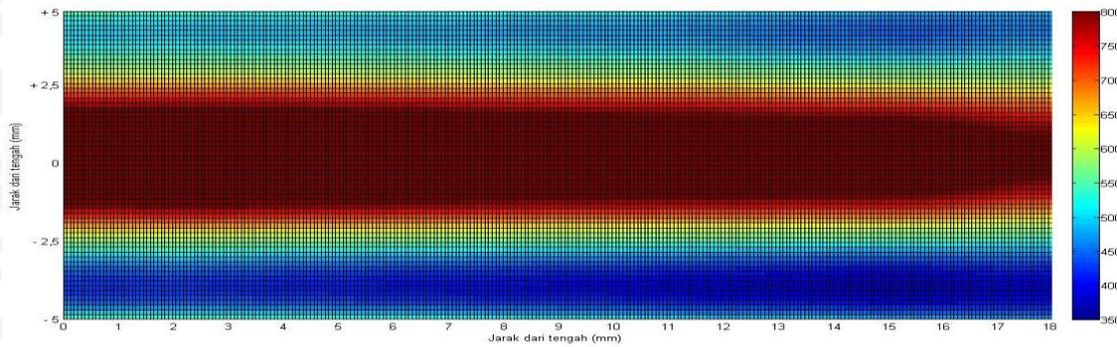
**Gambar 4.5** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 0.94, \text{CO}_2 30\%$  (8 LPM)



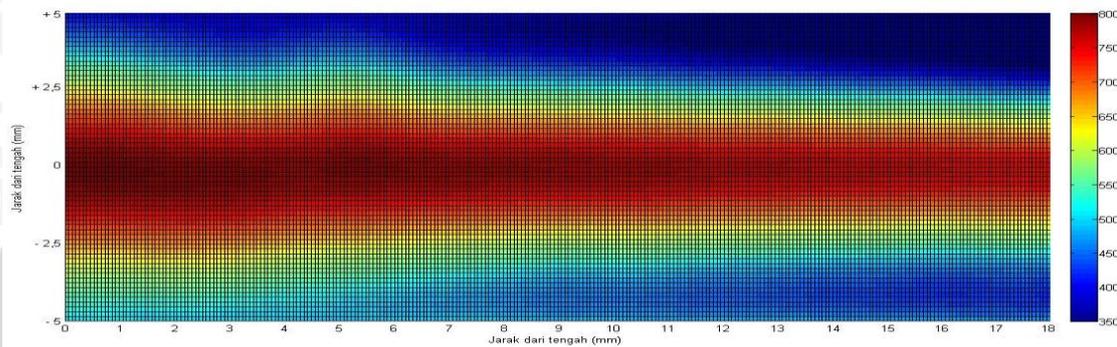
**Gambar 4.6** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 0.94, \text{CO}_2 20\%$  (8 LPM)



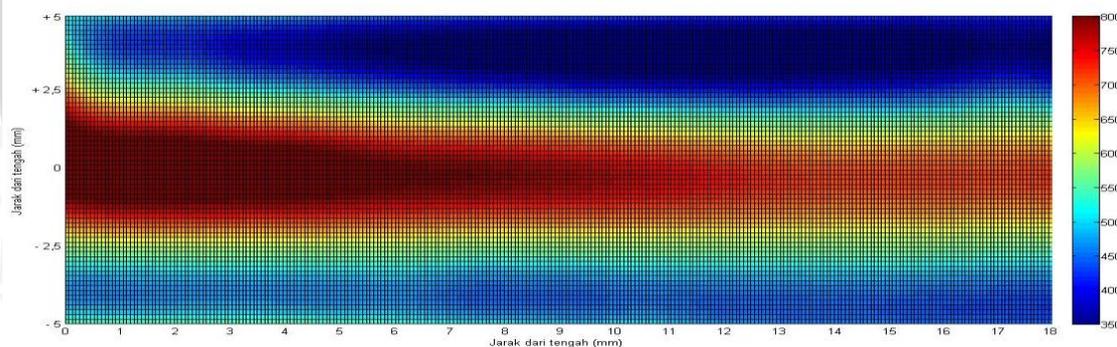
**Gambar 4.7** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 0.94, \text{CO}_2 10\%$  (8 LPM)



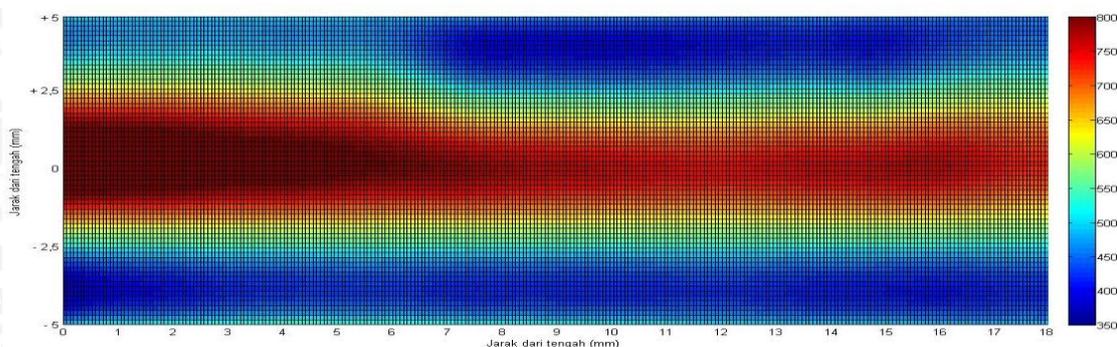
**Gambar 4.8** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub> 0% (8 LPM)



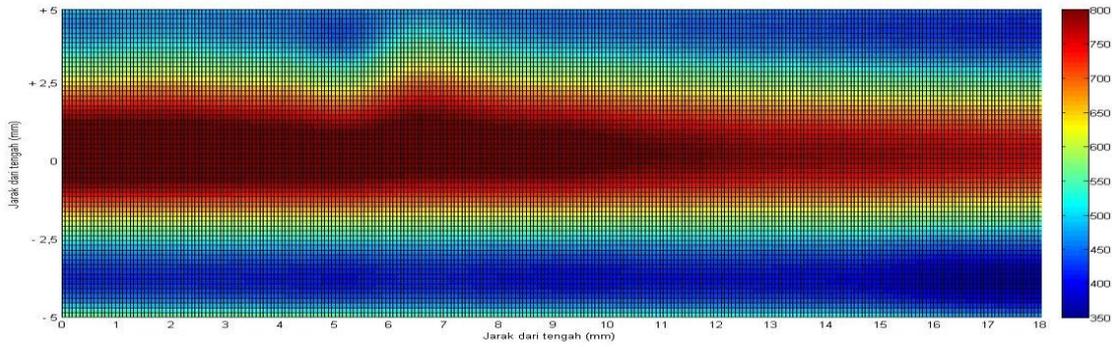
**Gambar 4.9** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.17$ , CO<sub>2</sub> 40% (8 LPM)



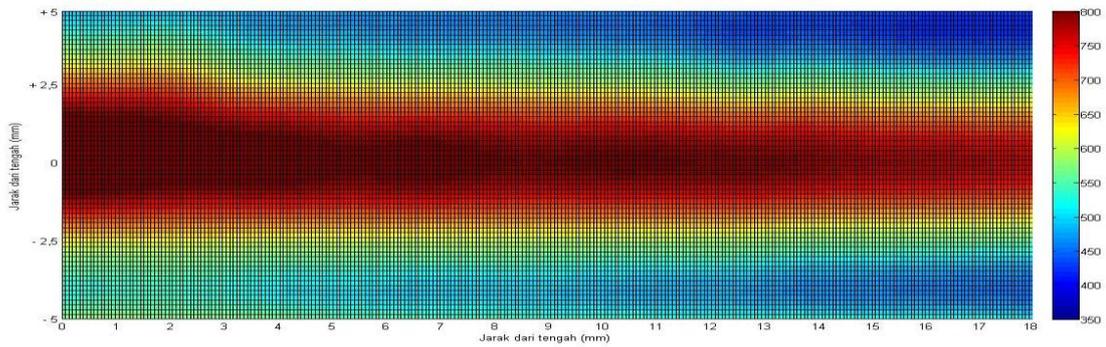
**Gambar 4.10** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.17$ , CO<sub>2</sub> 30% (8 LPM)



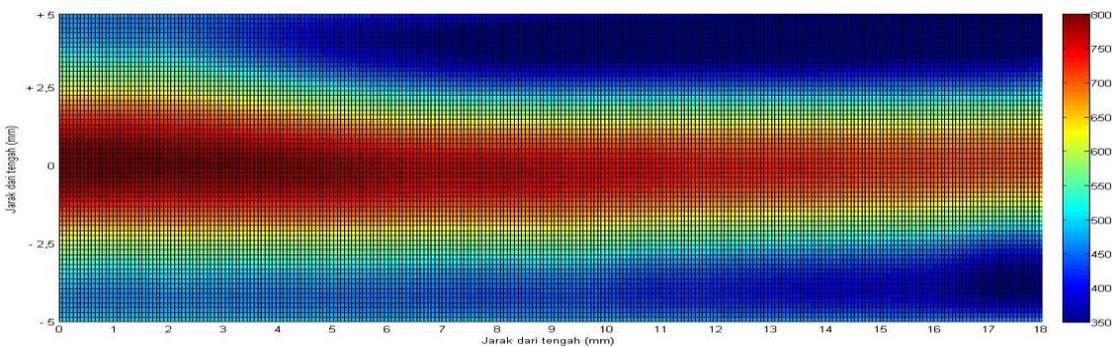
**Gambar 4.11** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.17$ , CO<sub>2</sub> 20% (8 LPM)



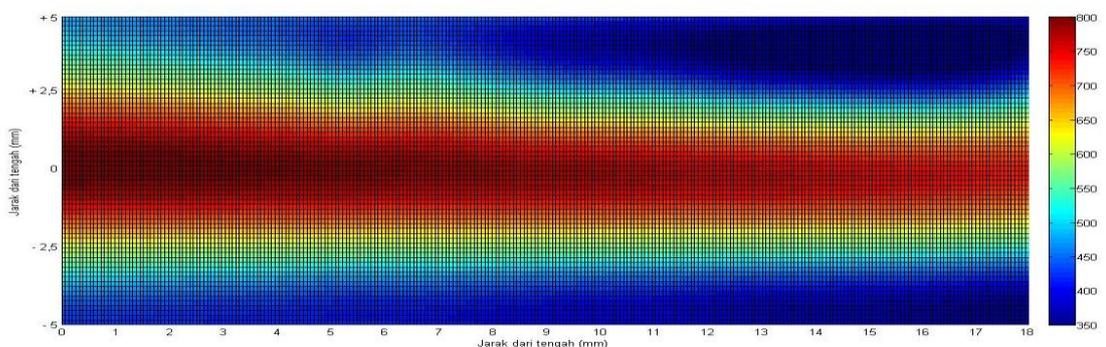
**Gambar 4.12** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.17$ , CO<sub>2</sub> 10% (8 LPM)



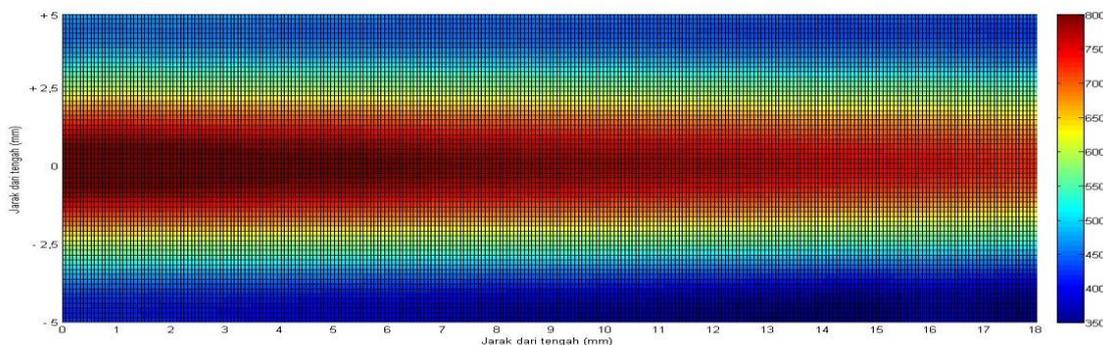
**Gambar 4.13** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.17$ , CO<sub>2</sub> 0% (8 LPM)



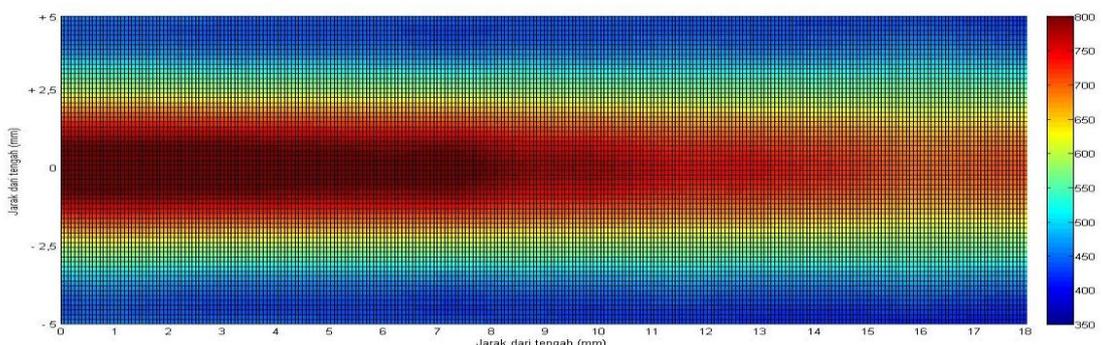
**Gambar 4.14** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 40% (8 LPM)



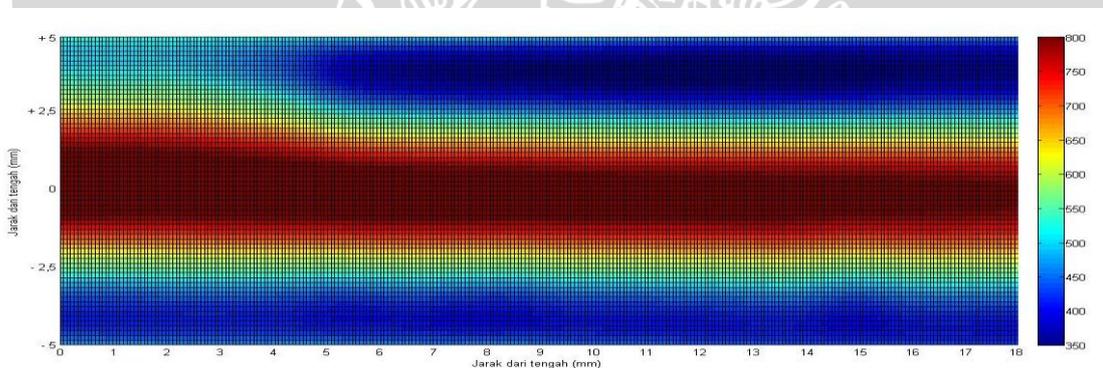
**Gambar 4.15** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 30% (8 LPM)



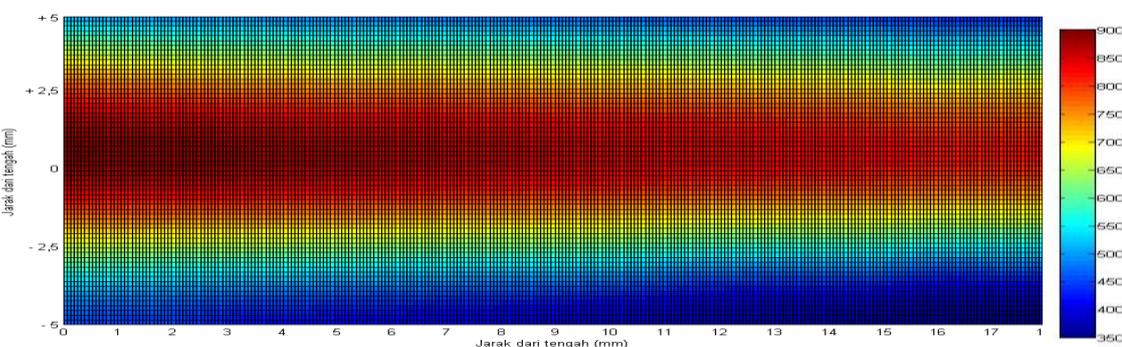
**Gambar 4.16** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 20% (8 LPM)



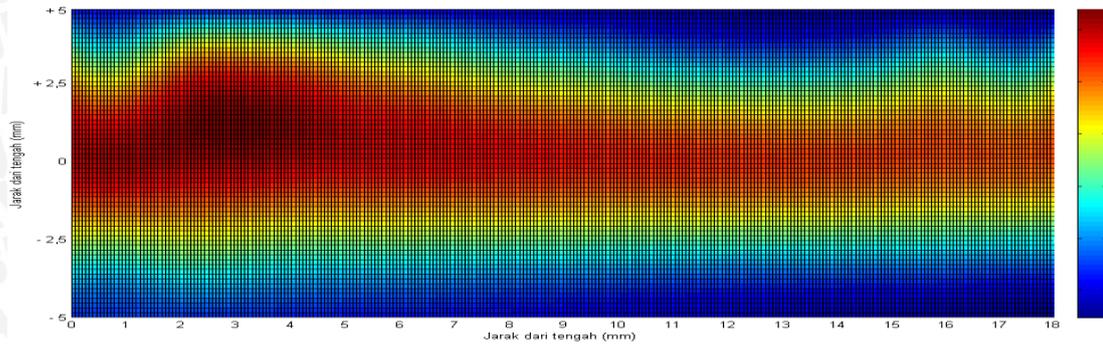
**Gambar 4.17** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 10% (8 LPM)



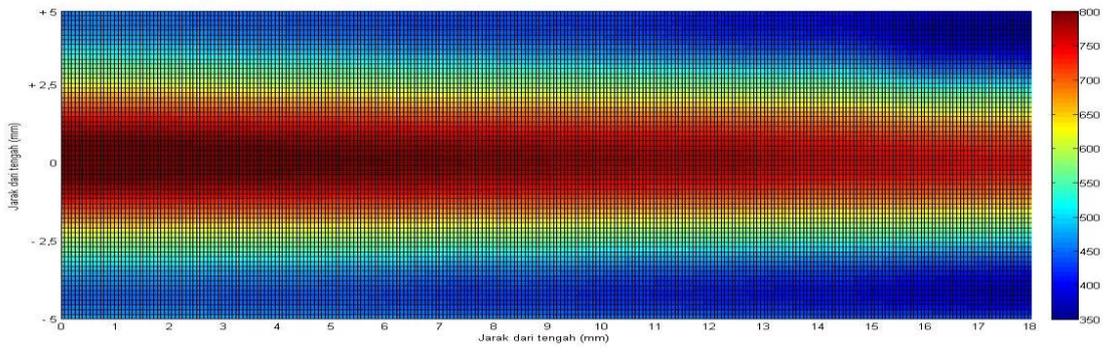
**Gambar 4.18** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 0%, (8 LPM)



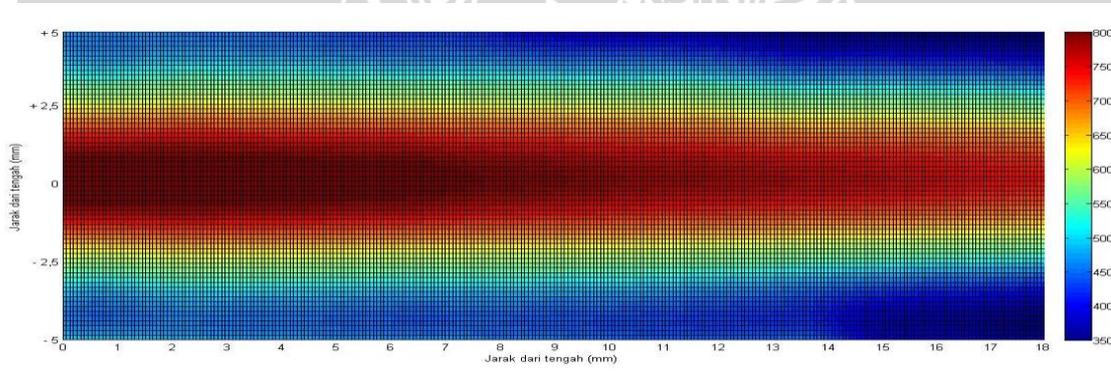
**Gambar 4.19** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub> 40% (6 LPM)



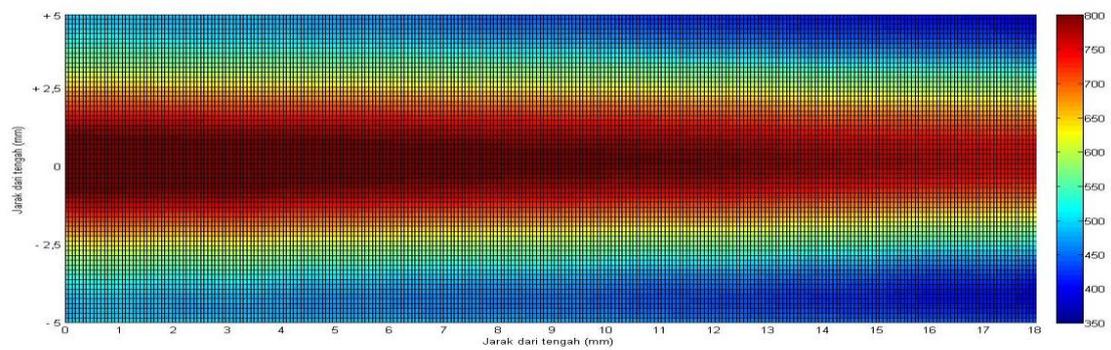
**Gambar 4.20** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub> 30% (6 LPM)



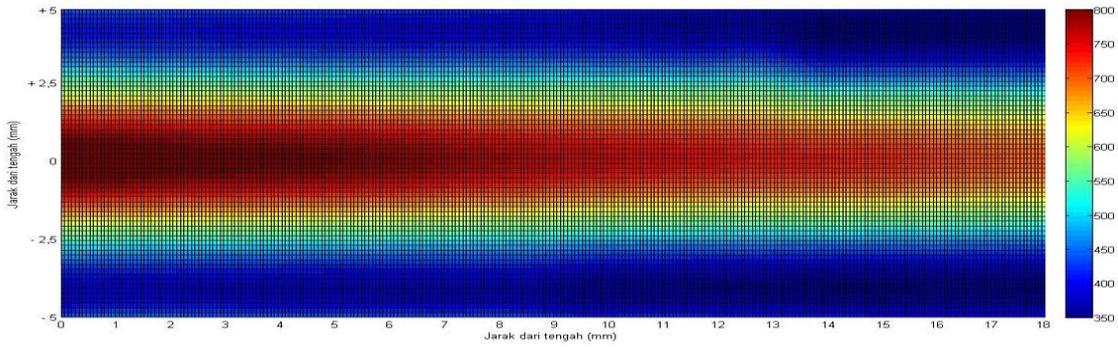
**Gambar 4.21** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub> 20% (6 LPM)



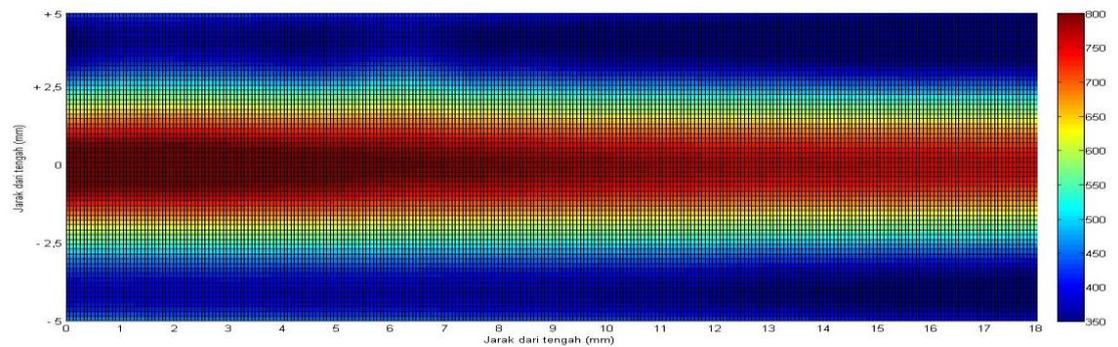
**Gambar 4.22** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub> 10% (6 LPM)



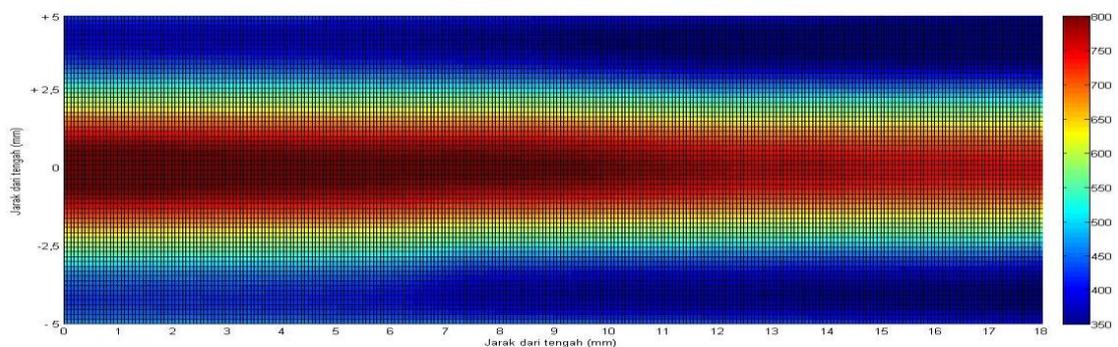
**Gambar 4.23** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub> 0% (6 LPM)



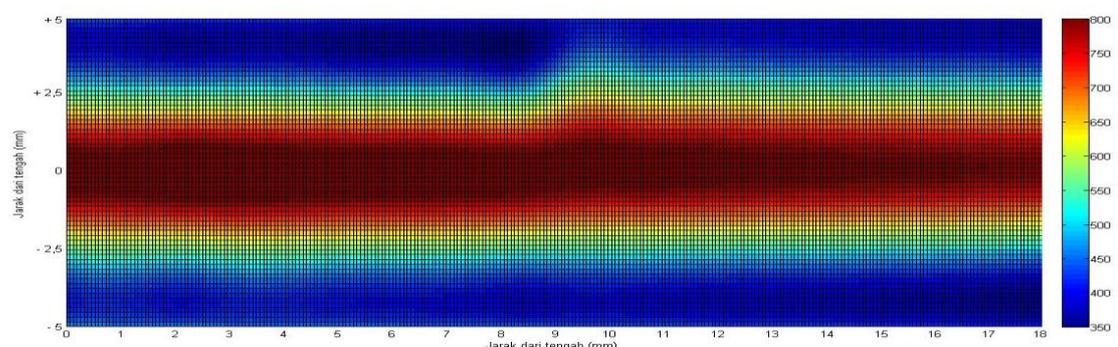
**Gambar 4.24** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.17$ , CO<sub>2</sub> 40% (6 LPM)



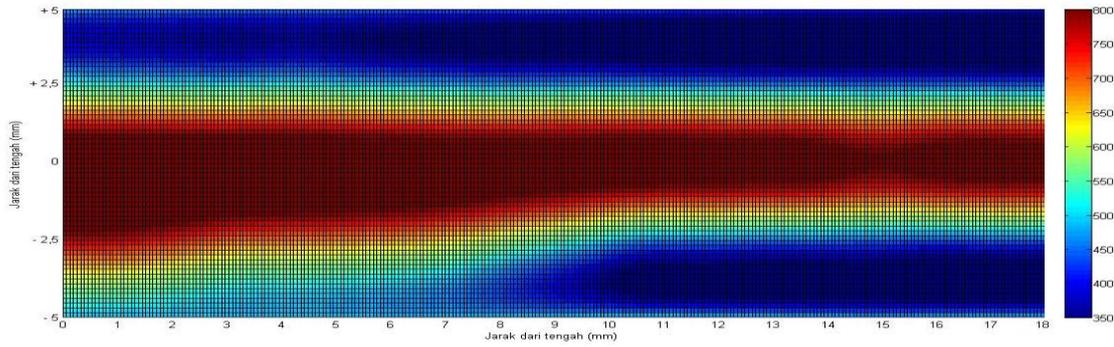
**Gambar 4.25** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.17$ , CO<sub>2</sub> 30% (6 LPM)



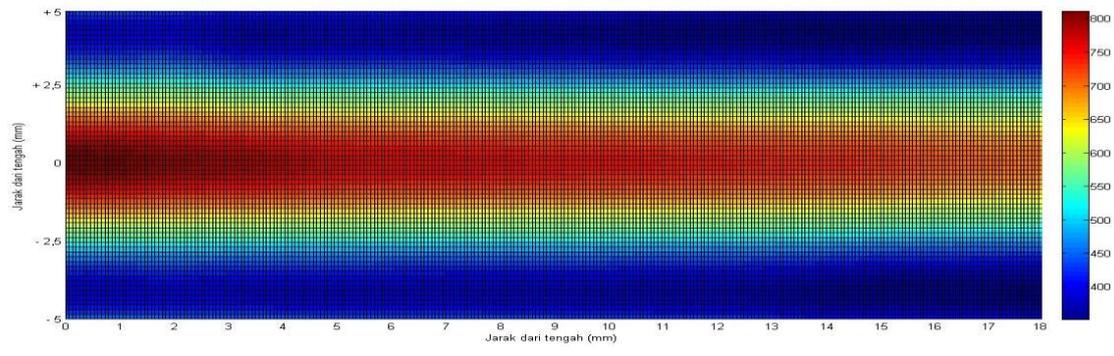
**Gambar 4.26** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.17$ , CO<sub>2</sub> 20% (6 LPM)



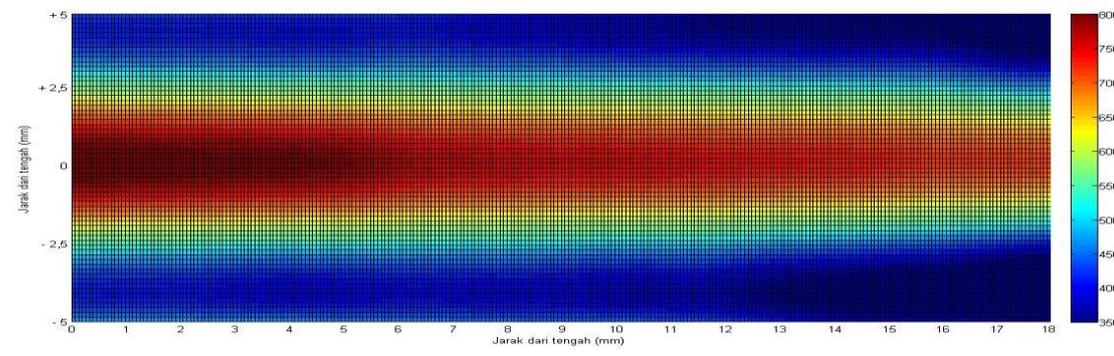
**Gambar 4.27** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.17$ , CO<sub>2</sub> 10% (6 LPM)



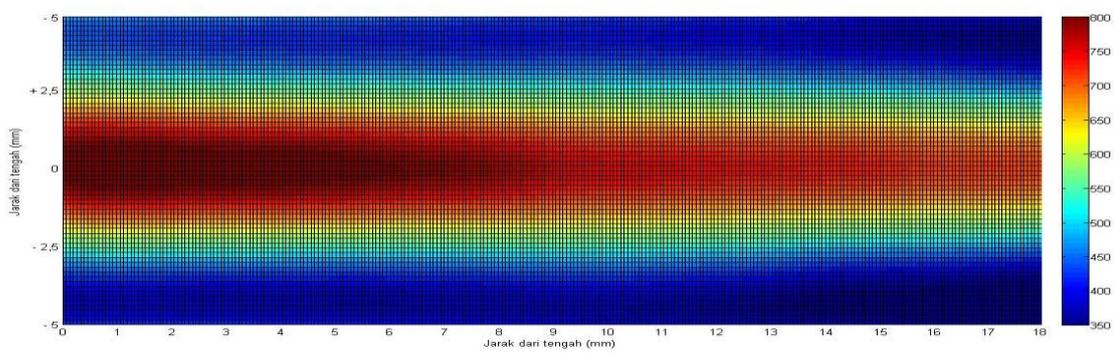
**Gambar 4.28** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.17$ , CO<sub>2</sub> 0% (6 LPM)



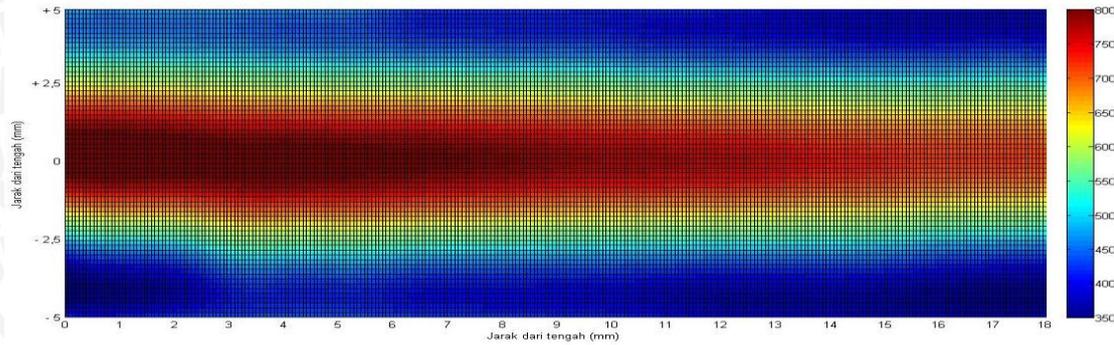
**Gambar 4.29** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 40% (6 LPM)



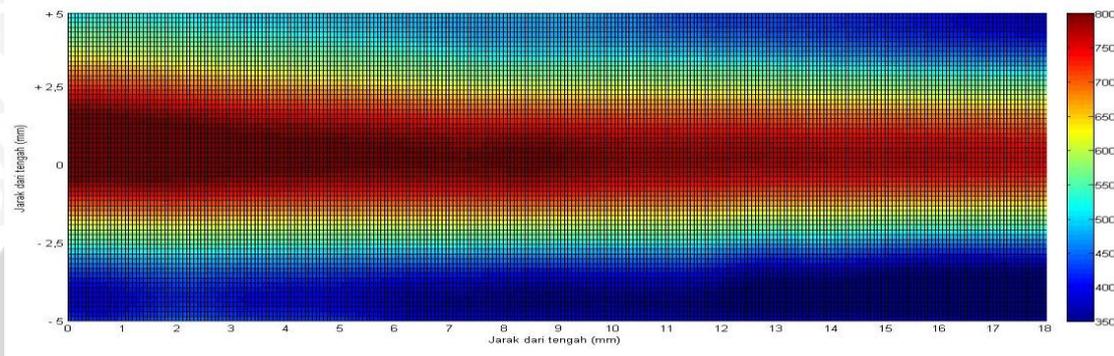
**Gambar 4.30** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 30% (6 LPM)



**Gambar 4.31** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 20% (6 LPM)



**Gambar 4.32** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.40$ ,  $\text{CO}_2$  10% (6 LPM)



**Gambar 4.33** Plot distribusi suhu pada variasi  $\Phi = 1.40$ ,  $\text{CO}_2$  0% (6 LPM)

## 4.2 Pembahasan Data Hasil Penelitian

### 4.2.1. Data Karakteristik Pembakaran

Pada karakteristik nyala api yang akan dibahas mencakup warna api serta lebar api. Pada **gambar 4.1** **Gambar 4.2** **Gambar 4.3** merupakan hasil foto dari api pada presentase  $\text{CH}_4$  40% ,50%, 60% pada pembakaran premiks *counterflow configuration*.

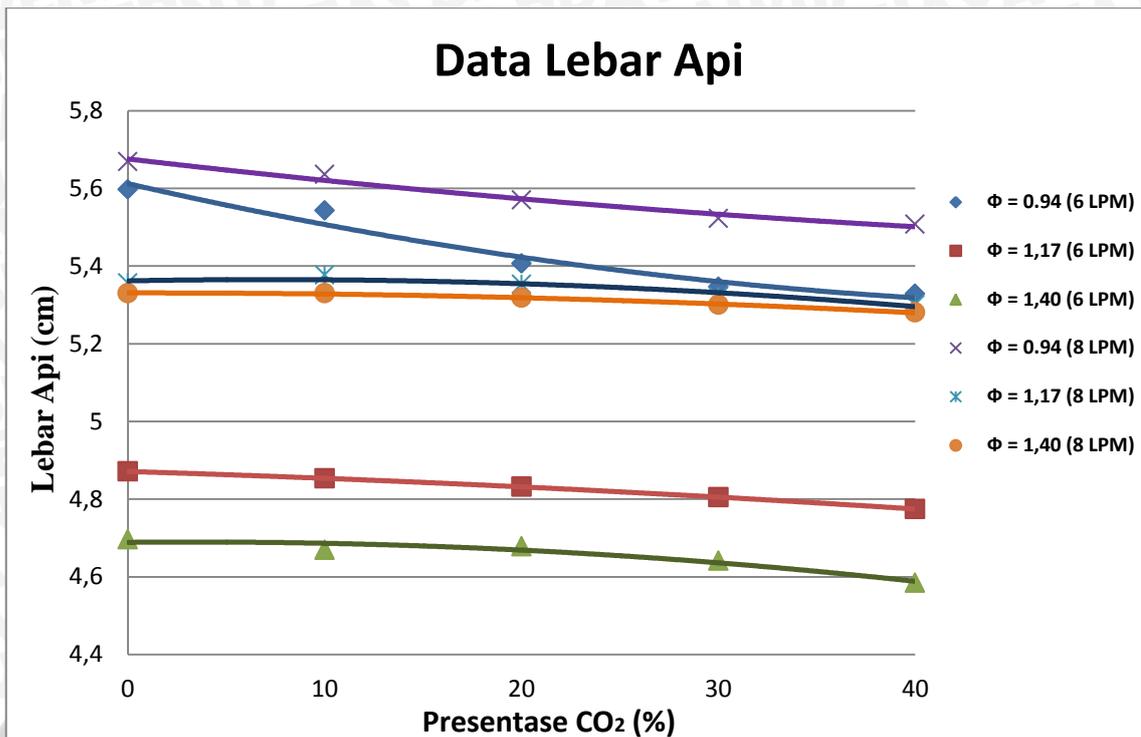
Perbedaan yang mendasar dari gambar menunjukkan perbedaan yang jelas antara komposisi variasi 6 liter/menit dengan 8 liter/menit dengan seluruh konsentrasi variasi  $\text{CO}_2$  dan  $\text{CH}_4$ . Pada variasi 8 liter/menit warna lebih terang dibandingkan dengan 6 liter/menit dengan lebar api lebih besar. Pada 8 liter/menit kondisi api yang terjadi menunjukkan terdapat dua lapisan api. Namun pada 6 liter/menit tidak menunjukkan dua lapisan api yang jelas. Hal ini dikarenakan pada debit aliran yang besar aliran cenderung akan saling mendorong dan bertabrakan antara bahan bakar serta oksidator yang mengalir dari pipa bagian bawah dengan nitrogen dari pipa bagian atas. Sehingga menghasilkan dua lapisan nyala api yang saling berdekatan.

Jika pada pembakaran dengan bahan bakar padat maupun cair sering kali dijumpai asap serta jelaga namun pada pembakaran dengan bahan bakar gas tidak menghasilkan asap serta jelaga. Dapat dilihat pada semua nyala api pembakaran yang terjadi, tidak menghasilkan asap serta jelaga. Hal ini karena reaksi yang terjadi saat pembakaran tidak menghasilkan senyawa berupa cairan maupun padatan (*solid & liquid*) (Wardana, ING, 2008)

Dapat dilihat warna api pada 8 liter/menit cenderung berwarna biru keputih putihan pada bagian tengah api dan berwarna biru pada sekelilingnya. Warna biru keputih putihan terjadi pada api dengan 8 liter/menit. Ini menunjukkan bahwa suhu dari api pada debit aliran 8 liter/menit lebih besar dibandingkan pada debit aliran 6 liter/menit. Pada debit aliran 8 liter/menit bahan bakar serta oksidator mengalir lebih banyak sehingga pembakaran yang dihasilkan dalam satuan waktu melibatkan bahan bakar dan oksidator yang semakin besar pula. Sehingga nilai kalori bahan bakar yang dibakar semakin besar dan menghasilkan pembakaran yang nilai kalorinya pun semakin besar. Hal ini menyebabkan suhu dari pembakaran akan lebih besar.

Dapat diketahui bahwa api dengan warna biru memiliki suhu yang lebih tinggi dibandingkan merah. Karena pada saat api bersuhu tinggi pancaran gelombang yang dihasilkan memiliki panjang gelombang yang lebih pendek. Sehingga menghasilkan spektrum warna biru.

Selain itu pada pembakaran premiks dengan instalasi *counterflow burner* memiliki warna api yang kekuningan pada bagian bawah dari api tersebut. Dengan aliran bahan bakar serta oksidator yang mengalir dari pipa bagian bawah api akan berwarna kekuningan pada bagian bawah. Api yang memiliki warna kekuningan pada bagian bawah ini disebabkan aliran unsur karbon yang berasal dari  $\text{CO}_2$  serta gas  $\text{CH}_4$ . Pada bagian bawah suplai dari gas  $\text{CO}_2$  serta gas  $\text{CH}_4$  masih belum terbakar semua sehingga presentase gas ini cenderung menyerap kalor yang dihasilkan dari pembakaran pada bagian *flame front* sehingga suhu akan semakin menurun jika dibandingkan pada daerah lain dan menyebabkan warna kekuningan. Dapat dilihat dengan jelas pada foto api premiks selurunya memiliki warna api yang kekuningan pada bagian bawahnya. Akan tetapi perbedaan yang sangat jelas dapat dilihat pada debit aliran bahan bakar dan oksidator sebesar 8 liter/menit. Dikarenakan pada debit aliran yang tinggi bahan bakar dan oksidator akan semakin banyak yang terbakar pada beberapa waktu menyebabkan perbedaan warna akan semakin mencolok serta perbedaan warna yang semakin tajam.



**Gambar 4.34** Grafik lebar api pada berbagai variasi

Dari data yang didapatkan, data lebar api dapat dilihat pada tabel 4.2. Terlihat bahwa semakin besar presentase CO<sub>2</sub> maka lebar api akan semakin kecil seperti yang ditunjukkan pada **gambar 4.34**. Hal ini dikarenakan saat pembakaran terjadi gas CO<sub>2</sub> yang bersifat inhibitor menyerap kalor serta cenderung menghambat terjadinya pembakaran. Sehingga saat presentase CO<sub>2</sub> besar maka api akan semakin kecil, dan pada saat presentase CO<sub>2</sub> kecil maka api akan semakin besar. Penurunan lebar api tidak terlalu signifikan. Penurunan berkisar 0,2cm pada presentase presentase CO<sub>2</sub> yang tertinggi yakni 40% sampai dengan presentase CO<sub>2</sub> yang terendah yakni 0% pada ekuivalen rasio yang sama.

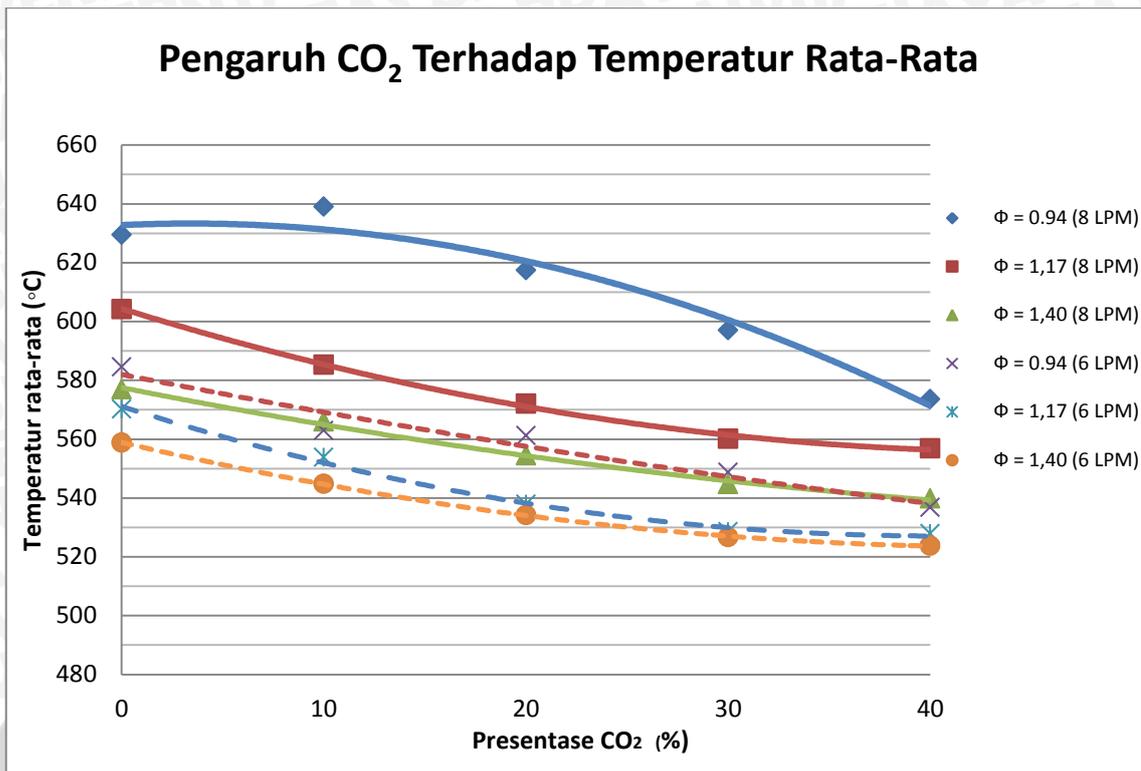
Api dengan debit aliran tinggi juga akan lebih besar lebarnya dikarenakan aliran bahan bakar dan oksidator sangat besar sehingga membuat api lebih besar. Hal ini dapat dilihat pada tabel 4.2 pada api dengan laju aliran 6 Liter per menit dengan *equivalent ratio* 0,94 memiliki lebar api sebesar 5,328cm, 5,346 cm, 5,407 cm, 5,543 cm, 5,597 cm, pada presentase 40%,30%,20%,10%,0% dan dengan laju aliran 8 liter per menit dengan *equivalent* yang sama memiliki lebar api yang lebih besar yakni 5,507cm, 5,522cm, 5,570 cm, 5,636cm, 5,669 cm, pada presentase 40%, 30%, 20%, 10%, 0%.

Selain itu, kecenderungan pembakaran dengan *equivalent ratio* mendekati stokiometri memiliki api yang lebih lebar jika dibandingkan dengan *equivalent ratio*

yang lebih jauh dari stoikiometri. Hal ini sesuai teori bahwa pembakaran dengan *equivalent ratio* mendekati stoikiometri akan lebih sempurna pembakarannya karena perbandingan bahan bakar dengan oksidatornya yang sesuai sehingga menghasilkan pembakaran yang lebih sempurna serta lebar api yang lebih besar. Pada pembakaran ini, pembakaran stoikiometri menghasilkan bahan bakar dan oksidator yang akan terbakar seluruhnya sehingga senyawa yang tersisa jika tidak ikut terbakar tidak akan menurunkan nilai kalor pembakaran dan mengganggu proses pembakaran. Akan tetapi, pembakaran stoikiometri sangat sulit untuk dihasilkan, sehingga pembakaran yang mendekati pembakaran stoikiometrilah yang lebih sempurna pembakarannya menghasilkan lebar api yang semakin besar.

#### 4.2.2. Distribusi Temperatur

Dari hasil pengambilan data suhu yang dilakukan menggunakan *motor stepper* serta mikro kontroller yang menggerakkan *thermocouple* tipe K didapatkan data distribusi suhu yang terjadi pada nyala api premiks *counterflow burner* pada 18 titik horizontal masing masing berjarak 1mm sebanyak 5 baris yang melintang pada bagian atas tengah dan bawah dari api. Suhu tersebut kemudian di plotting dan ditampilkan pada gambar yang menunjukkan perbedaan warna sehingga dapat diketahui masing masing suhu pada tiap titik. Selain itu suhu tersebut di rata-rata pada setiap komposisi campuran presentase  $\text{CH}_4, \text{CO}_2, \text{O}_2$  dan kemudian ditampilkan dalam bentuk grafik. Pada **gambar 4.35** menunjukkan grafik pengaruh gas  $\text{CO}_2$  terhadap temperatur rata-rata pada pembakaran api *premix counterflow burner* dalam berbagai variasi.



**Gambar 4.35** Grafik pengaruh CO<sub>2</sub> terhadap temperatur rata-rata

Pada komposisi CH<sub>4</sub> 40%  $\Phi$  0,94 memiliki suhu rata-rata tertinggi 639<sup>0</sup>C dan terendah pada suhu rata-rata 573,6<sup>0</sup>C pada masa alir 8 LPM serta memiliki suhu rata-rata tertinggi 584,511<sup>0</sup>C dan terendah 536,811<sup>0</sup>C pada masa alir 6 LPM.

Pada komposisi Pada komposisi CH<sub>4</sub> 50%  $\Phi$  1,17 memiliki suhu rata-rata tertinggi 604,233<sup>0</sup>C dan terendah pada suhu rata-rata 556,866<sup>0</sup>C pada masa alir 8 LPM serta memiliki suhu rata-rata tertinggi 570,244<sup>0</sup>C dan terendah 527,866<sup>0</sup>C pada masa alir 6 LPM.

Pada komposisi CH<sub>4</sub> 60%  $\Phi$  1,40 memiliki suhu rata-rata tertinggi 576,988<sup>0</sup>C dan terendah pada suhu rata-rata 539,866<sup>0</sup>C pada masa alir 8 LPM serta memiliki suhu rata-rata tertinggi 558,788<sup>0</sup>C dan terendah 523,788<sup>0</sup>C pada masa alir 6 LPM.

Pada **gambar 4.35** dapat dilihat bahwa nyala api memiliki suhu yang cenderung menurun saat komposisi CO<sub>2</sub> semakin semakin besar. Hal ini dikarenakan gas CO<sub>2</sub> yang memiliki sifat inhibitor. Gas ini pada proses pembakaran akan menyerap sejumlah energi kalor dari hasil pembakaran. Oleh karena itu saat presentasenya yang semakin besar maka energi yang diserap akan semakin besar, sehingga menyebabkan rata-rata suhu menurun.

Saat laju aliran 8 liter/menit rata-rata suhu yang dihasilkan akan lebih besar dibandingkan dengan 6 liter/ menit. Hal ini dikarenakan tumbukan yang terjadi pada saat laju aliran 8 liter/menit lebih besar dibandingkan dengan 6 liter/menit sehingga proses pembakaran akan terjadi lebih cepat dan lebih banyak bahan bakar yang terbakar dalam satuan waktu tertentu yang menyebabkan suhu rata-rata hasil pembakaran akan semakin naik.

Pada grafik dengan ekuivalen rasio 0,94 memiliki rata rata suhu yang lebih tinggi dibandingkan dengan rata rata suhu pada pembakaran dengan ekuivalen rasio 1,14. Pembakaran dengan ekuivalen rasio 1,40 memiliki rata-rata suhu yang paling rendah dibandingkan dengan ekuivalen 0,94 dan 1,14. Hal ini dikarenakan ekuivalen rasio 0,94 lebih mendekati sempurna (pembakaran stoikiometri dengan ekuivalen 1) dibandingkan dengan ekuivalen 1,14. Begitu pula pada ekuivalen rasio 1,40 memiliki suhu rata-rata paling rendah dibandingkan dengan ekuivalen rasio 0,94 dan 1,14. Hal ini dikarenakan pada pembakaran dengan ekuivalen rasio tersebut lebih jauh dengan komposisi pembakaran sempurna atau stoikiometri.

Pada plot warna panas api cenderung memanjang dari tengah menuju ujung dari api dengan ketebalan berkisar 1,75 cm sampai 3 cm dari titik tengah api. Pada gambar 4.4 – 4.18 dapat dilihat ketebalan api (plotting berwarna merah) memiliki ketebalan kurang dari 2,5cm dari titik tengah. Hal ini dikarenakan pada saat pembakaran tersebut memiliki debit aliran yang rendah yakni 6 liter/menit maka tumbukan dari gas yang berasal dari pipa bagian bawah dengan pipa bagian atas tidak begitu besar sehingga lebar api kecil jika dibandingkan dengan plotting pada gambar 4.19 - 4.33 yang memiliki ketebalan api 1,75- 2,75 pada masa alir 8 liter/menit.

Pada plotting tersebut juga dapat diketahui saat komposisi  $\text{CO}_2$  semakin berkurang maka distribusi suhu akan meningkat sehingga menyebabkan daerah disekitar pusat api akan semakin panas dan api semakin tebal. Panjang api juga bertambah seiring dengan berkurangnya presentase  $\text{CO}_2$  dengan ditunjukkannya plot berwarna merah pekat. Seperti yang ditunjukkan pada **gambar 4.4 – 4.33** daerah api yang ditunjukkan dengan suhu yang tinggi semakin bertambah lebar jika presentase gas  $\text{CO}_2$  semakin kecil. Dikarenakan pada saat terjadinya proses pembakaran api tidak akan kehilangan kalor yang disebabkan oleh adanya gas  $\text{CO}_2$  yang ikut bercampur saat proses pembakaran. Adanya gas ini juga berdampak pada terhambatnya proses reaksi oksidasi yang terjadi saat pembakaran berlangsung. Pada bagian mendatar didominasi oleh warna merah dan menjadi biru pada atas serta bawah api. Ini dikarenakan pada saat api

menyala dan aliran dari kedua pipa bertemu, akan menghantarkan panas dalam bentuk radiasi serta aliran bahan bakar dan oksidator yang telah terbakar akan mengalir keluar melewati tengah tengah dari pipa tersebut. Aliran tersebut masih bersuhu tinggi dikarenakan terlebih dahulu mengalami reaksi pembakaran yang menghasilkan sejumlah kalor.

Selain itu besar gas selubung (yakni  $N_2$ ) juga berpengaruh besar terhadap lebar api. Dikarenakan pada bagian ujung api akan terkena kontak langsung dengan selubung sehingga saat selubung tersebut kecil alirannya maka lebar api akan besar dan saat selubung memiliki masa alir yang besar akan menyebabkan leba api akan semakin kecil karena desakan aliran dari selubung tersebut yang mengenai api.



## BAB V

### PENUTUP

#### 5.1 Kesimpulan

Dari hasil penelitian didapat mengenai pengaruh *equivalent ratio* terhadap karakteristik pembakaran premiks  $\text{CH}_4\text{-CO}_2\text{-O}_2$  pada *counterflow flame burner*, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada *equivalent ratio* yang paling mendekati stoikiometri yakni 0,94 memiliki nyala api yang paling lebar serta memiliki suhu rata-rata tertinggi. Suhu rata-rata akan semakin menurun seiring semakin menjauhnya *equivalent ratio* dengan pembakaran stoikiometri.
2. Presentase  $\text{CO}_2$  yang semakin besar akan semakin menurunkan kalor hasil pembakaran ditandai dengan menurunnya temperatur rata-rata hasil pembakaran. Hal ini ditandai dengan warna api yang dihasilkan, semakin besar suhu yang dihasilkan maka api akan berwarna semakin biru. Selain itu pada kandungan  $\text{CO}_2$  yang semakin besar menyebabkan lebar api yang semakin kecil.

#### 5.2 Saran

Adapun saran dari penulis untuk penelitian lanjutan adalah:

1. Meneliti lebih lanjut pengaruh pembakaran biogas terhadap unsur-unsur lain yang terkandung.
2. Menggunakan berbagai macam gas lain dalam penelitian.



## DAFTAR PUSTAKA

- Cengel, Yunus, A., Cimbula, John M., "Fluid Mechanic Fundamental and Application". Table A-10 Page 895-896.
- Chaineaux Jacques., Marlair G., 2011. *Experimental Study Of CH<sub>4</sub>/O<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub> Mixtures Flammability. Journal of institut National De L'environnement Industriel Et Des Risques (Ineris) France*
- 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, page 15403-15413.*
- Farizkara, Mika, 2014. *Pengaruh Konsentrasi CO<sub>2</sub> Terhadap Karakteristik Api Pembakaran Difusi CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> Pada Counterflow Burner. Teknik Mesin. Universitas Brawijaya: Malang.*
- Guo, Hongsheng. 1998. *Radiation Extinction Limit of Counterflow Premixed Lean Methane-Air Flames, Journal institute of fluid science, Tohoku university Japan.*
- 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, page 127.*
- Putranto, Andi, 2014. *Pengaruh Massa Alir Reaktan Terhadap Karakteristik Pembakaran Difusi CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> Pada Counterflow Burner. Teknik Mesin. Universitas Brawijaya: Malang.*
- 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, page 2555-2562.*
- Tsuji, H., 1982. "Counterflow Diffusion Flames", *Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 8, page 93-119.*
- Ukisu Yuji, Kitajima Akio, Hatanaka Takeshi, Takeuchi Masao, 2004. "Experimental Study of Extinction and its Quantification in Laminar and Turbulent Counterflow CH<sub>4</sub>-N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>-N<sub>2</sub> 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.*

Wicaksono, Hangga, 2014. *Pengaruh Prosentase CO<sub>2</sub> Terhadap Distribusi temperatur Pembakaran Premiks CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> Pada Counterflow Burner*. Teknik Mesin Universitas Brawijaya: Malang.

Kemenristek. 2012. energi terbarukan. [http://www.ristek.go.id/file/upload/hakteknas/hakteknas2012/Talkshow%20Hakteknas%2017/Energi%20baru%20terbarukan/Sahrul%20Seminar%20%20Energi%20Terbarukan%20HAKTEKNAS%202012%20\(PRESENTASI\).pdf](http://www.ristek.go.id/file/upload/hakteknas/hakteknas2012/Talkshow%20Hakteknas%2017/Energi%20baru%20terbarukan/Sahrul%20Seminar%20%20Energi%20Terbarukan%20HAKTEKNAS%202012%20(PRESENTASI).pdf) (diakses 02 Januari 2015)

Liputan 6. 2013. *Cadangan Minyak Menipis, Mau Tak Mau RI Pakai Energi Alternatif* <http://bisnis.liputan6.com/read/671123/cadangan-minyak-menipis-mau-tak-mau-ri-pakai-energi-alternatif> (diakses 02 Januari 2015)



### Lampiran

#### Data Distribusi Temperatur Api

515	510	513	510	494	495	490	487	484	482	481	470	478	475	474	466	463	460
648	636	638	636	637	639	640	643	654	659	657	649	648	647	644	642	642	632
905	902	893	887	879	867	859	844	836	822	806	795	781	766	758	754	752	774
538	505	498	489	485	476	475	473	476	481	485	494	502	491	470	467	461	456
444	445	446	440	437	435	434	431	430	427	424	422	421	418	416	409	403	402

**Data Temperatur  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub>40% (8 LPM)**

546	544	539	539	537	530	528	524	521	518	511	509	506	501	497	483	481	475
637	636	634	629	623	620	607	596	604	609	613	620	625	630	637	639	641	642
893	888	879	867	855	840	823	813	794	774	757	748	733	722	716	708	699	690
554	528	531	513	504	491	485	481	483	489	490	498	515	522	539	555	576	575
564	560	558	554	550	550	549	543	539	537	534	531	527	523	519	516	513	506

**Data Temperatur  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub>30% (8 LPM)**

571	570	569	568	568	560	555	551	540	541	543	540	538	537	536	531	529	526
596	592	582	577	567	555	544	540	532	528	520	516	511	505	501	498	492	494
901	898	895	899	887	885	880	877	874	871	844	829	805	781	776	757	723	741
605	598	589	571	561	563	569	581	579	615	635	655	674	682	702	720	733	733
588	570	562	553	549	543	539	538	535	539	536	520	520	506	501	494	486	479

**Data Temperatur  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub>20% (8 LPM)**

589	586	573	571	568	562	548	543	544	539	538	537	529	525	521	513	409	518
634	628	619	601	596	597	587	584	582	582	579	577	574	589	586	550	549	543
950	955	948	942	937	933	931	920	899	893	852	858	846	837	829	810	803	794
640	620	635	610	612	627	636	655	658	662	651	630	599	594	588	586	583	581
592	590	587	586	584	579	575	573	570	567	561	552	547	540	539	535	531	528

**Data Temperatur  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub>10% (8 LPM)**

532	530	528	526	522	518	515	509	504	502	497	491	489	486	477	472	467	463
588	584	588	583	577	573	568	565	561	558	554	550	547	542	540	538	533	527
946	944	950	949	943	938	933	925	916	911	908	905	901	897	896	885	882	874
673	670	673	672	671	666	664	658	653	650	648	645	635	630	627	623	619	616
559	554	547	544	540	538	534	532	529	527	525	520	515	506	502	495	494	489

**Data Temperatur  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub> 0% (8 LPM)**

510	506	501	499	497	495	491	493	487	485	482	480	479	476	474	473	469	465
679	677	681	672	651	640	625	612	600	593	594	580	576	566	563	553	557	555
793	794	788	786	783	789	784	781	779	776	774	769	766	763	761	758	752	755
617	606	579	564	577	589	559	537	529	519	511	497	494	483	474	467	453	443
402	400	398	398	396	394	391	389	387	384	381	378	376	377	376	372	369	365

**Data Temperatur  $\Phi = 1,14$ , CO<sub>2</sub>40% (8 LPM)**

538	538	537	537	534	529	518	502	496	489	494	473	463	461	457	450	448	443
592	604	607	607	605	602	599	586	586	587	588	586	583	581	579	576	567	570
864	865	859	845	836	814	795	789	777	764	750	733	717	705	705	706	707	714
676	572	563	526	510	483	462	446	438	424	420	416	412	418	420	431	455	440
515	510	501	499	495	478	475	471	468	466	458	453	447	445	443	441	440	438

**Data Temperatur  $\Phi = 1.14$ , CO<sub>2</sub>30% (8 LPM)**

479	503	507	519	527	522	517	510	509	504	500	497	493	486	489	482	481	478
517	528	532	535	535	536	534	531	529	526	526	527	526	523	522	519	517	518
873	853	842	822	818	801	789	779	765	759	749	742	745	754	758	763	741	730
638	643	640	631	620	614	573	518	510	507	506	511	521	527	523	553	572	572
502	500	498	497	498	495	493	490	487	483	481	479	476	479	474	472	470	468

**Data Temperatur  $\Phi = 1.14$ , CO<sub>2</sub>20% (8 LPM)**

498	490	487	488	485	483	484	479	478	474	474	469	471	472	467	464	461	456
530	530	528	526	523	521	520	516	513	511	509	510	506	503	498	483	477	474
839	833	824	839	889	875	861	850	846	847	849	848	847	843	844	837	832	825
641	649	654	637	623	603	682	669	639	627	610	597	585	579	571	564	558	555
505	499	497	494	492	489	487	485	481	479	477	475	474	472	465	463	459	457

**Data Temperatur  $\Phi = 1.14$ , CO<sub>2</sub>10% (8 LPM)**

572	577	571	568	556	543	540	538	532	531	527	522	524	521	518	517	514	504
634	631	628	621	614	612	609	606	605	601	597	596	592	577	573	569	563	557
856	846	828	824	820	803	811	804	793	796	799	793	791	785	774	772	767	759
703	700	693	652	634	625	619	618	611	606	604	593	577	587	575	566	562	564
489	487	487	486	482	480	478	475	473	470	468	462	458	451	447	442	439	437

**Data Temperatur  $\Phi = 1.14$ , CO<sub>2</sub> 0% (8 LPM)**

498	495	494	496	493	489	487	485	483	481	478	475	473	472	470	467	464	463
608	594	599	594	592	590	580	572	571	567	544	534	521	511	500	489	453	450
751	768	771	781	787	780	762	759	758	747	746	726	710	691	694	683	678	672
621	618	608	577	545	512	490	474	466	464	465	466	466	466	468	470	472	489
459	452	448	446	442	438	434	431	428	426	423	419	415	407	400	398	396	393

**Data Temperatur  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 40% (8 LPM)**

427	426	422	419	417	414	413	407	405	400	398	396	394	392	389	387	385	384
632	633	630	628	626	623	619	616	614	604	599	594	592	591	589	587	415	584
757	767	778	775	772	765	764	754	749	743	749	737	732	725	716	712	704	698
624	623	619	595	556	536	508	490	478	474	472	474	476	483	492	499	539	586
467	466	462	460	459	456	453	450	449	446	441	438	436	432	432	433	434	434

**Data Temperatur  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 30% (8 LPM)**

426	420	419	416	411	406	401	397	394	391	390	389	388	388	380	378	370	363
625	622	623	620	610	604	599	597	594	591	590	590	587	585	588	583	570	561
756	755	750	748	746	743	741	738	736	735	732	728	726	725	718	716	714	706
591	605	595	594	590	589	586	584	583	578	576	573	569	565	564	563	554	551
486	480	488	482	476	473	472	470	468	465	463	460	459	456	455	455	452	451

**Data Temperatur  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 20% (8 LPM)**

457	457	454	452	449	447	445	443	439	437	435	431	427	424	422	419	417	414
605	613	604	600	598	597	596	594	592	589	587	586	582	578	575	572	567	569
821	820	819	818	812	807	805	806	776	772	759	741	742	730	717	692	698	701
601	601	598	593	594	591	589	586	584	578	575	573	571	568	567	566	564	562
471	467	466	464	462	460	458	457	452	455	455	451	450	446	444	443	439	431

**Data Temperatur  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 10% (8 LPM)**

468	466	461	461	463	462	457	455	457	449	446	441	438	434	433	430	427	426
566	565	570	573	571	568	575	572	568	583	585	590	594	597	577	591	594	590
853	851	848	846	843	841	838	837	834	827	825	823	821	817	815	809	803	797
643	639	634	608	572	515	492	481	478	471	466	464	464	465	468	477	480	480
534	533	530	528	526	525	522	521	518	513	508	500	498	496	493	487	488	481

**Data Temperatur  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 0% (8 LPM)**

449	443	440	428	425	422	419	417	412	407	404	402	400	398	393	392	389	386
567	564	560	557	554	550	547	542	541	538	531	522	519	517	516	505	504	502
698	693	694	691	687	685	682	678	675	673	669	666	664	660	658	653	650	648
645	636	632	627	624	620	624	620	618	614	613	612	607	604	600	592	596	593
469	466	463	461	458	456	453	452	448	446	443	440	439	437	435	432	427	425

**Data Temperatur  $\Phi = 1.94$ , CO<sub>2</sub> 40% (6 LPM)**

472	477	474	471	468	464	463	460	457	453	450	448	444	440	438	435	432	430
593	590	597	590	580	579	576	573	570	567	563	561	559	557	552	548	543	542
698	702	701	703	693	687	685	682	679	673	670	668	665	662	660	657	654	655
633	624	680	688	672	643	629	609	594	582	566	556	551	554	567	588	567	593
454	452	450	448	446	444	442	439	436	434	432	433	430	431	428	428	425	424

**Data Temperatur  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub> 30% (6 LPM)**

574	473	476	470	469	466	462	460	457	454	452	449	446	442	438	436	433	429
601	597	593	593	591	590	587	585	583	580	579	576	573	569	564	560	558	554
729	726	724	716	701	700	697	693	691	690	689	684	682	688	679	672	669	665
648	644	645	640	639	637	634	631	629	627	625	626	620	619	617	618	616	610
463	467	460	459	456	453	451	448	446	444	439	432	430	427	426	429	422	418

**Data Temperatur  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub> 20% (6 LPM)**

489	486	480	473	471	467	464	463	460	453	447	446	445	444	392	385	372	367
594	590	604	602	600	594	589	586	583	579	574	564	557	544	536	524	518	504
820	820	820	817	814	809	808	795	789	784	776	772	768	763	759	752	743	736
632	628	640	638	635	631	629	625	623	618	616	613	597	586	588	582	578	564
473	468	463	457	452	438	431	424	398	387	382	378	367	357	352	347	342	334

**Data Temperatur  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub> 10% (6 LPM)**

493	499	493	490	489	487	485	480	478	476	473	469	465	463	461	458	455	454
626	648	643	627	629	607	598	595	592	590	587	589	582	573	571	567	566	562
759	760	756	753	750	749	748	746	743	739	737	734	732	730	729	725	702	698
658	657	652	650	648	646	643	638	637	632	629	623	629	617	614	609	606	605
503	496	493	492	493	486	483	481	478	476	473	470	468	464	463	462	463	459

**Data Temperatur  $\Phi = 0.94$ , CO<sub>2</sub> 0% (6 LPM)**

432	447	442	439	437	435	432	431	428	424	418	413	412	417	409	406	404	403
589	587	582	581	587	574	572	572	568	567	562	558	554	552	549	546	543	541
719	716	729	720	713	707	698	697	695	689	685	684	681	679	675	672	668	664
546	544	537	530	525	521	518	517	513	512	509	505	502	498	493	492	489	487
469	463	458	456	453	451	447	448	443	440	437	434	432	430	428	426	422	429

**DataTemperatur  $\Phi = 1.14$ , CO<sub>2</sub> 40% (6 LPM)**

459	457	453	452	448	445	443	440	438	430	427	423	418	413	406	402	399	394
549	546	546	546	541	539	532	530	526	524	518	516	504	502	498	493	491	483
827	820	824	816	812	805	795	792	785	778	773	768	763	761	758	757	752	749
498	523	524	517	505	514	528	499	496	483	481	478	475	471	467	464	466	459
452	453	450	446	443	441	438	432	427	423	417	413	406	402	400	397	392	384

**DataTemperatur  $\Phi = 1.14$ , CO<sub>2</sub> 30% (8 LPM)**

467	469	465	462	460	458	456	453	452	447	445	442	440	438	436	434	432	430
587	584	588	580	579	574	572	568	566	563	562	558	554	553	558	548	544	543
776	775	771	770	762	764	761	759	754	752	749	746	744	743	739	736	732	731
536	531	527	522	513	510	505	498	495	492	489	486	484	482	479	476	474	473
437	433	444	441	440	438	436	432	428	425	423	418	416	414	400	398	393	389

**DataTemperatur  $\Phi = 1.14$ , CO<sub>2</sub> 20% (6 LPM)**

459	454	450	448	446	443	441	439	436	432	431	428	426	424	419	417	410	408
564	578	573	589	583	474	572	567	554	551	548	543	538	536	531	527	521	511
828	825	846	840	835	832	833	827	823	818	816	813	809	806	801	799	793	793
547	540	537	538	533	523	523	518	517	606	586	583	574	569	564	561	559	555
446	447	438	340	437	431	428	425	423	421	419	417	415	412	404	407	403	394

**DataTemperatur  $\Phi = 1.14$ , CO<sub>2</sub> 10% (6 LPM)**

396	428	419	404	398	396	387	384	382	380	378	375	374	372	367	364	362	357
489	493	504	500	538	542	537	526	529	510	478	483	479	473	470	469	467	462
885	882	878	874	872	867	864	856	851	847	846	842	837	832	827	821	875	863
478	489	502	503	514	498	487	478	474	468	465	462	459	453	450	447	443	441
415	414	410	409	406	402	398	403	399	394	387	384	383	378	376	374	372	370

**DataTemperatur  $\Phi = 1.14$ , CO<sub>2</sub> 0% (6 LPM)**

436	439	432	433	428	425	423	421	419	417	415	413	414	409	407	402	398	395
567	565	564	563	559	557	556	553	547	546	542	538	536	532	527	526	521	520
716	702	698	694	692	686	683	681	678	674	672	670	667	664	663	661	659	657
585	587	583	578	576	573	571	569	564	563	561	558	554	550	548	543	542	538
447	449	437	430	427	425	423	420	417	413	406	402	397	393	392	389	385	384

**DataTemperatur  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 40% (6 LPM)**

446	447	443	439	436	434	432	436	428	426	421	418	403	396	387	381	375	365
558	559	564	563	554	553	549	546	542	538	536	534	532	527	504	496	692	491
726	724	723	720	703	695	692	675	671	668	664	659	654	648	640	637	632	631
617	627	622	616	604	597	590	587	584	582	578	573	565	558	551	547	540	537
463	461	456	450	447	442	438	431	429	423	420	416	403	397	392	387	383	378

**DataTemperatur  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 30% (6 LPM)**

420	421	419	417	415	414	405	403	398	395	392	389	387	388	384	382	385	378
544	558	559	554	552	550	548	546	543	541	540	528	521	507	497	499	485	473
764	760	758	750	748	743	742	738	732	706	700	698	694	693	689	684	674	672
612	615	607	606	595	593	592	589	580	576	573	567	562	554	551	549	543	538
479	477	476	474	471	468	462	455	449	442	436	431	427	422	417	411	403	395

**DataTemperatur ,  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 20% (6 LPM)**

312	408	424	433	438	436	427	424	421	418	410	395	387	388	382	379	376	379
499	525	535	578	575	577	563	557	552	546	543	537	536	531	527	510	502	493
794	793	791	789	786	774	772	768	762	754	743	741	733	727	720	713	704	694
625	623	622	619	617	614	612	596	594	592	599	585	584	581	572	563	554	543
487	481	488	483	478	475	437	433	430	427	426	424	416	403	398	394	389	384

**DataTemperatur  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 10% (6 LPM)**

426	424	446	430	427	417	392	389	386	384	382	378	377	375	373	372	367	368
540	548	557	547	543	538	534	532	527	524	521	518	489	492	478	468	467	469
821	822	818	806	801	798	795	792	799	784	775	772	769	763	761	758	752	743
728	716	697	678	664	653	638	621	617	614	613	609	604	591	586	579	574	567
505	513	508	498	499	495	493	491	498	490	463	441	440	437	425	416	402	394

**DataTemperatur  $\Phi = 1.40$ , CO<sub>2</sub> 0% (6 LPM)**

