

repository.ub.ac.id

**PENGARUH PENAMBAHAN KADAR CO₂ TERHADAP
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN CAMPURAN STOIKIOMETRI
METANA-UDARA**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :

**MUHAMMAD SAIFUL ANWAR
NIM. 0810620017-62**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN DAN KEBUDAYAAN
UNIVERSITAS BRAWIJAYA
FAKULTAS TEKNIK
MALANG
2012**



LEMBAR PERSETUJUAN

PENGARUH PENAMBAHAN KADAR CO₂ TERHADAP KARAKTERISTIK PEMBAKARAN CAMPURAN STOIKIOMETRI METANA-UDARA

SKRIPSI KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik



Disusun oleh :
MUHAMMAD SAIFUL ANWAR
NIM. 0810620017-62

Telah diperiksa dan disetujui oleh :

Dosen Pembimbing I

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M.Eng. Dr. Eng. Denny Widhiyanuriawan, ST., MT.
NIP. 19740121 199903 1 001 NIP. 19750113 200012 1 001

repository.ub.ac.id

LEMBAR PENGESAHAN

**PENGARUH PENAMBAHAN KADAR CO₂ TERHADAP
KARAKTERISTIK PEMBAKARAN CAMPURAN STOIKIOMETRI
METANA-UDARA**

**SKRIPSI
KONSENTRASI TEKNIK KONVERSI ENERGI**

Diajukan untuk memenuhi persyaratan
memperoleh gelar Sarjana Teknik

Disusun Oleh :

**MUHAMMAD SAIFUL ANWAR
NIM. 0810620017-62**

Skripsi ini telah diuji dan dinyatakan lulus pada
Tanggal 14 Juni 2012

Skripsi 1

Skripsi 2

**Sugiarto, ST., MT.
NIP. 19690417 199512 1 001**

**Ir. Hastono Wijaya, MT.
NIP. 19601204 198601 1 002**

Komprehensif

**Ir. Handono Sasmito, M.Eng.Sc.
NIP. 19480216 198003 1 001**

**Mengetahui
Ketua Jurusan Teknik Mesin**

**Dr. Slamet Wahyudi, ST., MT.
NIP. 19720903 199702 1 001**

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT, atas segala limpahan rahmat-Nya, sehingga penulis mampu menyelesaikan skripsi yang berjudul “Pengaruh Penambahan Kadar CO₂ Terhadap Karakteristik Pembakaran Campuran Stoikiometri Metana-Udara”. Dalam pembuatan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

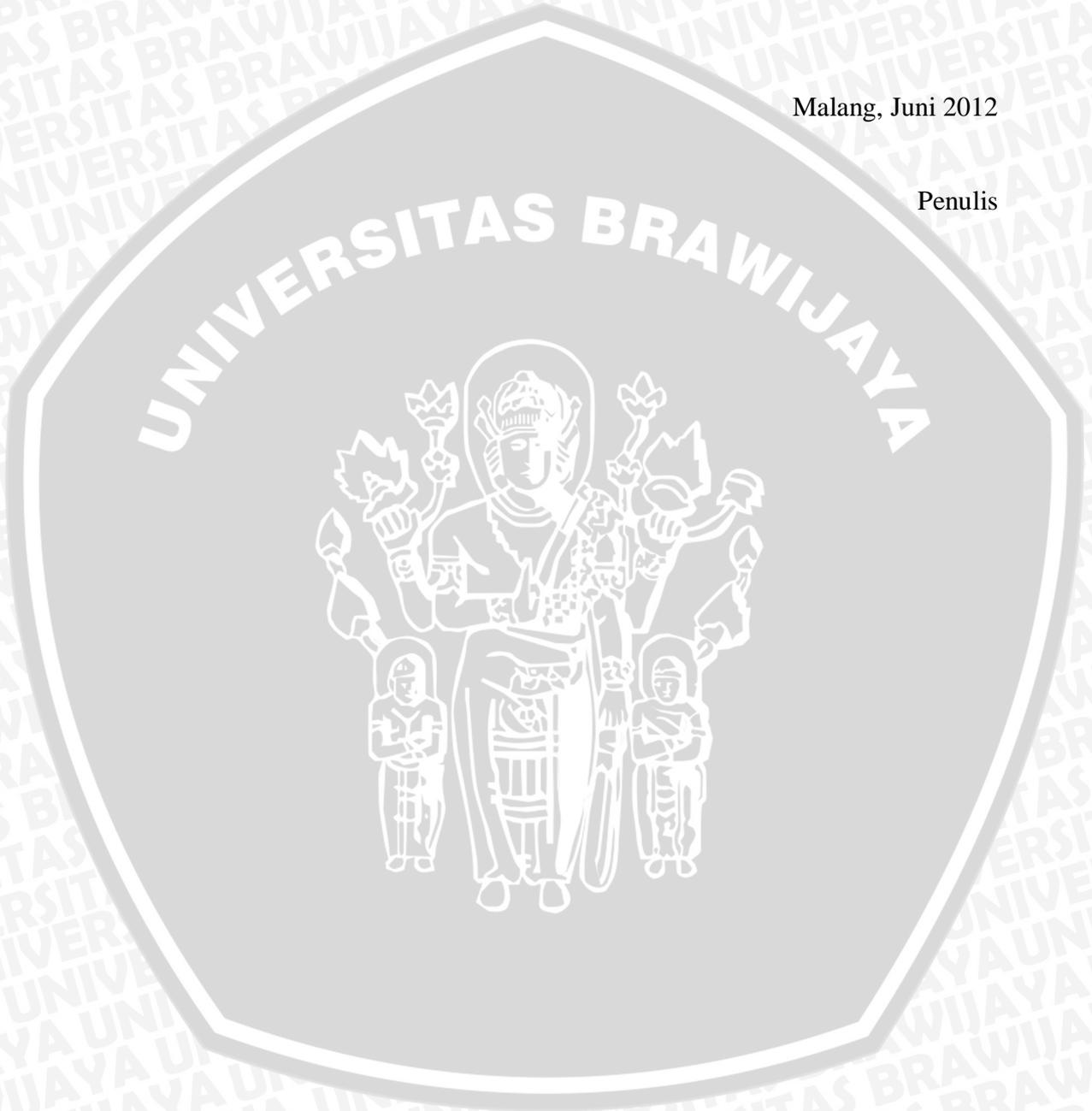
1. Bapak Dr. Slamet Wahyudi, ST., M.T., selaku Ketua Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya Malang.
2. Bapak Dr. Eng. Anindito Purnowidodo, ST., M. Eng., selaku Sekretaris Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya Malang.
3. Bapak Dr. Eng. Nurkholis Hamidi, ST., M. Eng., selaku Dosen Pembimbing I yang telah banyak memberikan bimbingan menyusun skripsi ini.
4. Bapak Dr. Eng. Denny Widhiyanuriyawan, ST., MT., selaku Dosen Pembimbing II yang telah banyak memberikan bimbingan menyusun skripsi ini.
5. Ibu Dr. Eng. Lilis Yulianti, ST., MT. selaku Ketua Kelompok Konsentrasi Teknik Konversi Energi, Jurusan Mesin, Universitas Brawijaya.
6. Bapak Erwin Sulisty, Ir., MT., selaku Dosen Wali.
7. Seluruh Dosen Pengajar Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan yang sangat mendukung selama penyusunan skripsi.
8. Seluruh Staf Pengajar yang saya hormati.
9. Seluruh Staf Administrasi Jurusan Mesin dan Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.
10. Kedua orang tua, kakak dan adik saya yang telah memberikan dorongan, semangat dan mendo'akan saya.
11. Seluruh sahabat KBMM Universitas Brawijaya khususnya Keluarga Besar EMPEROR.
12. Seluruh asisten *COMBUSTION ENGINE LABORATORY*: Bayu Pranoto, Swastika Praba Ardi P, Anggara Dharma dan Duta Kristianto yang telah memberikan semangat, do'a dan motivasi serta dukungan dalam menyelesaikan skripsi.
13. Serta semua pihak yang telah membantu terselesaikannya skripsi ini, yang tidak bisa penulis sebutkan satu-persatu.

repository.ub.ac.id

Tiada gading yang tak retak, begitu juga halnya dengan skripsi ini yang masih banyak ditemukan kekurangan-kekurangan. Oleh sebab itu, penulis menerima masukan, saran, ataupun kritik yang sifatnya membangun dari semua pihak untuk penyempurnaan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi masyarakat khususnya para akademisi.

Malang, Juni 2012

Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	v
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR LAMPIRAN	vii
RINGKASAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah	2
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian Sebelumnya	4
2.2 Biogas	6
2.3 Prinsip Pembakaran dan Proses Pembakaran	7
2.4 Pembakaran Stoikiometri	8
2.5 Pembakaran Premixed	8
2.6 Tebal Api dan Kecepatan Pembakaran	10
2.7 Gaya Apung	11
2.8 <i>Inhibitor</i>	12
2.9 Batas Mampu Nyala	13
2.10 Gas Metana (CH ₄)	14
2.11 Gas Karbondioksida (CO ₂)	15
2.12 <i>Hele Shaw Cell Tipe Lateral</i>	16
2.13 Hipotesis.....	17
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	18
3.1 Metode Penelitian.....	18
3.2 Variabel Penelitian	18
3.3 Tempat dan Waktu Pelaksanaan	18

3.4	Material dan Instalasi Penelitian.....	19
3.4.1	Material.....	19
3.4.2	Instalasi Penelitian	20
3.4.3	Prosedur Penelitian.....	20
3.4.4	Peralatan Penelitian.....	22
3.7	Diagram Alir Penelitian.....	24
BAB IV DATA DAN PEMBAHASAN.....		25
4.1	Pengolahan Data	25
4.2	Pembahasan	25
4.2.1	Gambar Rambatan Api.....	26
4.2.2	Hubungan antara Cepat Rambat Api dengan Berbagai Variasi Kadar CO ₂ pada Pembakaran Campuran Stoikiometri Metana-Udara	29
4.2.3	Hubungan antara Besar Nyala Api dengan Berbagai Variasi Kadar CO ₂ pada Pembakaran Campuran Stoikiometri Metana-Udara	32
BAB V PENUTUP.....		35
5.1	Kesimpulan.....	35
5.2	Saran.....	36
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		

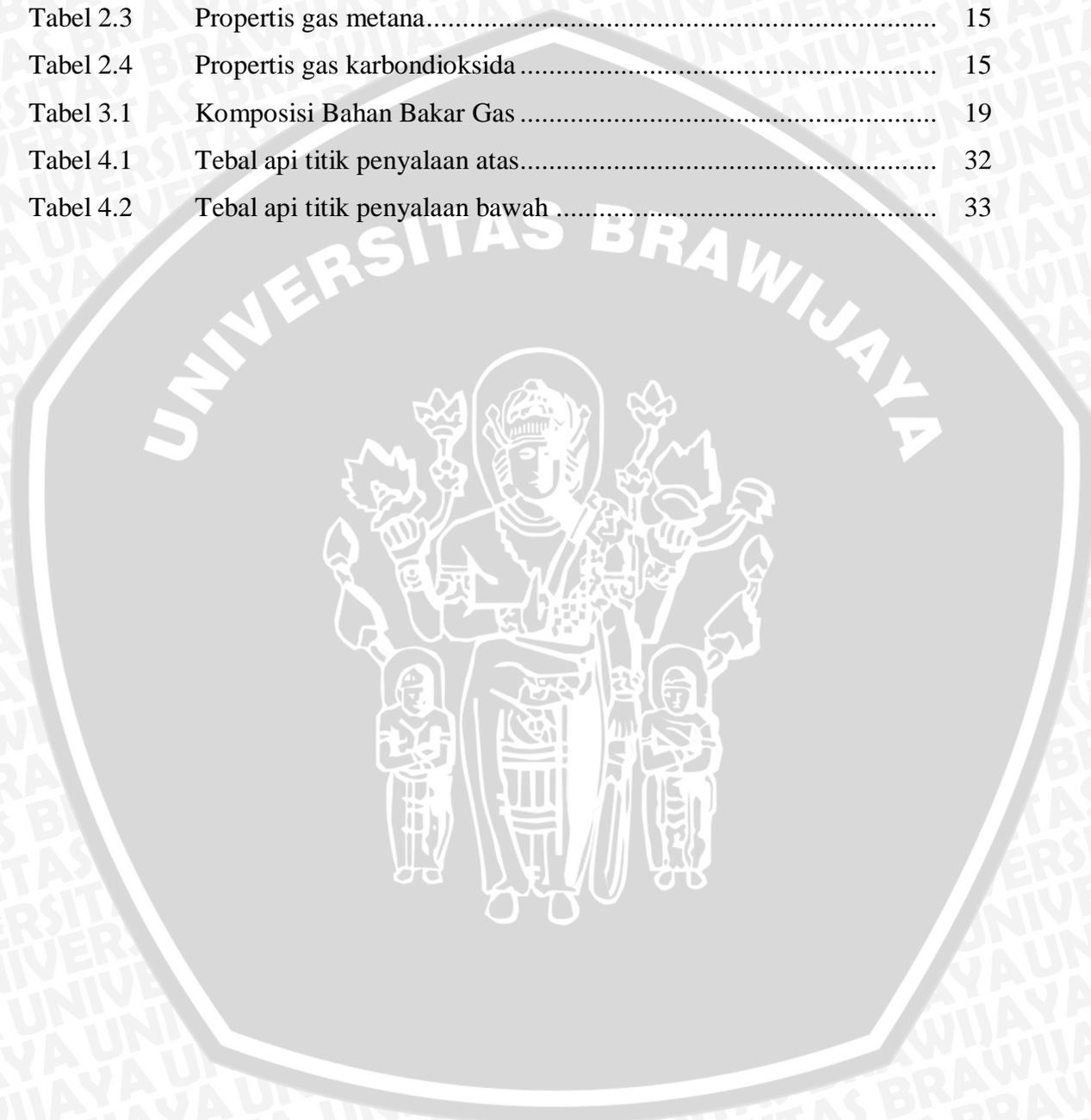


DAFTAR GAMBAR

No.	Judul	Hal.
Gambar 2.1	Pembakaran campuran LPG dan udara dengan 20% CO ₂	4
Gambar 2.2	Ilustrasi proses pembakaran.....	8
Gambar 2.3	Cara reaktan terbakar pada pembakaran premixed	9
Gambar 2.4	Detail struktur di dalam api premixed	10
Gambar 2.5	Pergerakan api vertikal	12
Gambar 2.6	Batas <i>flammability</i> LPG tanpa dan dengan berbagai <i>inhibitor</i>	14
Gambar 2.7	Pengaruh gas <i>inert</i> pada <i>range</i> pembakaran campuran gas propana-udara	16
Gambar 2.8	<i>Hele-shaw cell</i> tipe lateral.....	16
Gambar 3.1	Skema instalasi: a) tampak depan, b) tampak samping.....	20
Gambar 3.2	Ruang bakar bentuk lempeng kotak segi empat transparan dengan menggunakan model <i>helle -shaw cell</i>	23
Gambar 3.3	Pemantik	23
Gambar 3.4	Kamera.....	23
Gambar 3.5	Diagram alir penelitian	24
Gambar 4.1	Rambatan api pembakaran campuran stoikiometri metana-udara dengan berbagai tambahan CO ₂ pada penyalaan atas: a) 0%, b) 10%, c) 20%, d) 30%, e) 40%, f) 50%, g) 60%, h) 62.5%.	27
Gambar 4.2	Rambatan api pembakaran campuran stoikiometri metana-udara dengan berbagai tambahan CO ₂ pada penyalaan bawah: a) 0%, b) 10%, c) 20%, d) 30%, e) 40%, f) 50%, g) 60%.	28
Gambar 4.3	Grafik hubungan antara kecepatan rata-rata dengan kadar CO ₂ pada penyalaan atas dan bawah.	29
Gambar 4.4	Grafik gabungan hubungan kecepatan sesaat dengan waktu pada penyalaan atas dengan penambahan kadar CO ₂ 10% sampai pembakaran mati..	30
Gambar 4.5	Grafik gabungan hubungan kecepatan sesaat dengan waktu pada penyalaan bawah dengan penambahan kadar CO ₂ 10% sampai pembakaran mati.	31

DAFTAR TABEL

No.	Judul	Hal.
Tabel 2.1	Pengaruh penambahan CO ₂ terhadap kecepatan pembakaran.....	6
Tabel 2.2	Komposisi Biogas	7
Tabel 2.3	Propertis gas metana.....	15
Tabel 2.4	Propertis gas karbondioksida	15
Tabel 3.1	Komposisi Bahan Bakar Gas	19
Tabel 4.1	Tebal api titik penyalaan atas.....	32
Tabel 4.2	Tebal api titik penyalaan bawah	33



DAFTAR LAMPIRAN

No.	Judul
Lampiran 1	Tabel kecepatan sesaat api penyalaan bawah dengan berbagai tambahan CO ₂
Lampiran 2	Tabel kecepatan sesaat api penyalaan atas dengan berbagai tambahan CO ₂
Lampiran 3	Gambar contoh perhitungan jarak rambatan api; a) untuk kecepatan sesaat, b) untuk kecepatan rata-rata
Lampiran 4	Gambar contoh penentuan dan perhitungan tebal api
Lampiran 5	Gambar rambatan api
Lampiran 6	Kandungan O ₂ dalam udara di lingkungan sekitar pengujian



RINGKASAN

Muhammad Saiful Anwar, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Brawijaya, Juni 2012, Pengaruh Penambahan Kadar CO₂ Terhadap Karakteristik Pembakaran Campuran Stoikiometri Metana-Udara, Dosen Pembimbing: Nurkholis Hamidi dan Denny Widhiyanuriawan.

Semakin menipisnya cadangan energi di bumi ini khususnya bahan bakar mendorong manusia untuk menemukan energi alternatif. Biogas adalah energi terbarukan yang memiliki potensi yang besar sebagai energi alternatif. Kandungan gas biogas CH₄ sebagai bahan bakar sekitar 50-70%, CO₂ sebagai *inhibitor* sekitar 30-40%. Dengan adanya *inhibitor* CO₂ tersebut mempengaruhi karakteristik cepat rambat dan besar nyala api pembakaran biogas, oleh karena itu perlu diketahui pengaruh dari *inhibitor* tersebut terhadap karakteristik pembakaran metana-udara. Penelitian ini dilakukan dengan membakar campuran stoikiometri metana dan udara dengan berbagai tambahan kadar CO₂ pada penyalaan titik atas sebesar: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 62.5%, dan titik penyalaan bawah sebesar: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60% pada ruang bakar dengan dimensi tinggi 50cm panjang 20cm lebar 1cm. Hasil penelitian menunjukkan bahwa semakin besar kadar CO₂ cepat rambat pembakaran menurun dan besar nyala api mengecil terlihat dengan tebal api semakin kecil dan warna api yang memudar .. Batas mampu nyala untuk titik penyalaan atas menunjukkan bahwa akhir api menyala dengan tambahan CO₂ sebesar 62.5% dan titik penyalaan bawah sebesar 60%. Dengan penambahan CO₂ 0%-30% menunjukkan bahwa kecepatan api titik penyalaan atas lebih tinggi dibanding dengan titik penyalaan bawah, sedangkan penambahan 40%-*flammability limits* menunjukkan sebaliknya.

Kata Kunci: kadar, karakteristik pembakaran, campuran stoikiometri, metana udara.

BAB I PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Ketergantungan manusia terhadap bahan bakar fosil menyebabkan cadangan sumber energi tersebut semakin berkurang. Hal ini membuat banyak kalangan sadar bahwa ketergantungan terhadap bahan bakar fosil harus segera dikurangi. Untuk mengatasi masalah tersebut diperlukan adanya bahan bakar alternatif yang dapat diperbarui, murah dan mudah didapatkan. Salah satu bahan bakar alternatif tersebut adalah biogas.

Biogas dihasilkan melalui proses fermentasi limbah organik seperti sampah, sisa-sisa makanan, kotoran hewan dan limbah industri makanan. Biogas ini bisa menjadi solusi pengganti energi bahan bakar minyak yang murah dan ramah lingkungan. Biogas adalah campuran dari gas yang dihasilkan oleh bakteri metanogen dalam satu kondisi *anaerob*. Energi gas bio didominasi gas metana (50% - 70%), CO₂(30% - 40%), N₂ (1-2 %), H₂O (0,3%), H₂ (5-10%) dan H₂S (0-3%) (Subowo, 2010).

Berbagai kajian mengenai pemanfaatan dan penggunaan biogas secara efisien masih perlu dilaksanakan, salah satu dengan melihat karakteristik pembakaran, baik itu besar nyala api dan kecepatan rambat api masih perlu diteliti. Kita tahu bahwa dalam kandungan biogas yang terbesar adalah metana sebagai bahan bakar dan karbondioksida (CO₂) sebagai *inhibitor*. Metana adalah hidrokarbon yang memiliki rantai terpendek dan teringan. Metana merupakan gas yang terbentuk oleh adanya ikatan kovalen antara empat atom hidrogen dengan satu atom karbon.

Inhibitor merupakan zat yang menghambat atau menurunkan laju reaksi kimia pembakaran. Molekul – molekul inhibitor akan terurai dan bekerja dengan mengganggu rantai reaksi kimia pembakaran, sehingga reaksi kimia pembakaran terhambat. Tingkat penguraian molekul inhibitor pada campuran pembakaran akan mempengaruhi laju kecepatan reaksi pembakaran. Oleh karena itu perlu adanya penelitian sejauh mana pengaruh dari CO₂ sebagai *inhibitor* di dalam biogas terhadap tingkat penurunan sifat *flammability* metana.

Beberapa kajian dari penelitian terdahulu tentang fenomena pembakaran adalah Ilminnafik (2010) dalam penelitiannya menggunakan penambahan *inhibitor* berupa CO₂ dengan bahan bakar LPG pada campuran stoikiometri, hasil pengamatan menunjukkan bahwa dengan penambahan CO₂ menunjukkan pembakaran semakin tidak sempurna. Nurhadi (2011) juga melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan *inhibitor* CO₂ terhadap batas mampu nyala refrigeran hidrokarbon pada berbagai perbandingan AFR. Hasil pengamatan juga menunjukkan bahwa dengan penambahan CO₂ menunjukkan pembakaran terjadi semakin tidak sempurna.

Berdasarkan penelitian-penelitian di atas maka dalam studi eksperimen ini akan diteliti lebih lanjut tentang pengaruh penambahan kadar CO₂ sebagai *inhibitor* terhadap karakteristik besar nyala api dan cepat rambat api pada pembakaran campuran metana sebagai bahan bakar dan udara pada keadaan stoikiometri, dimana campuran antara CO₂ dan metana diasumsikan sebagai biogas.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, dirumuskan sebuah permasalahan yaitu: bagaimana pengaruh kadar CO₂ sebagai *inhibitor* terhadap karakteristik besar nyala api dan cepat rambat api pada pembakaran campuran stoikiometri metana-udara.

1.3. Batasan Masalah

Untuk menjadikan penelitian ini lebih terarah maka penulis akan memberikan batasan-batasan masalah yang meliputi hal-hal berikut ini:

1. Temperatur ruangan pengujian diasumsikan 27 °C.
2. Pengamatan kecepatan dan jarak api dilakukan secara dua dimensi, pada ruang bakar dengan bentuk *helle-shaw cell* persegi panjang dengan ukuran tinggi 50 cm panjang 20 cm dan lebar 1 cm.
3. Gas metana CH₄ yang digunakan adalah dengan kandungan gas metana sebesar 98,4%.

4. Kadar gas karbondioksida CO₂ yang divariasikan adalah penambahan 10% sampai nyala api pembakaran mati (*flammability limits*) pada titik penyalaaan bawah dan atas.

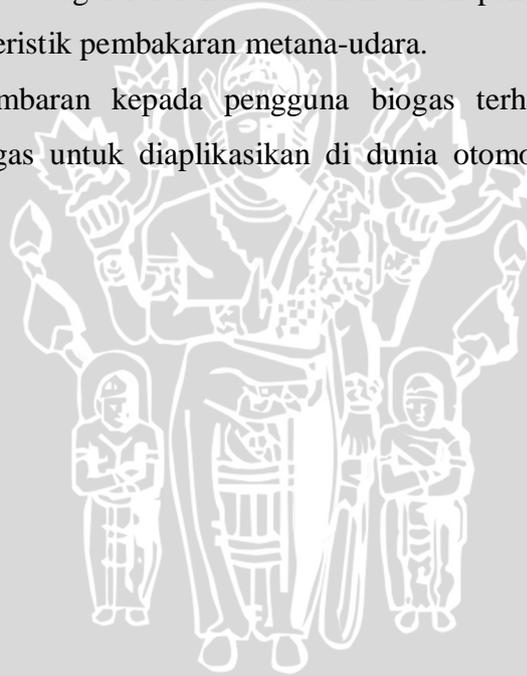
1.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini yaitu untuk mengetahui pengaruh variasi kadar senyawa CO₂ terhadap karakteristik besar nyala api dan cepat rambat api pada pembakaran campuran stoikiometri metana-udara.

1.5. Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Dapat digunakan sebagai referensi tambahan untuk penelitian lebih lanjut mengenai karakteristik pembakaran metana-udara.
2. Memberikan gambaran kepada pengguna biogas terhadap karakteristik pembakaran biogas untuk diaplikasikan di dunia otomotif sebagai bahan bakar.

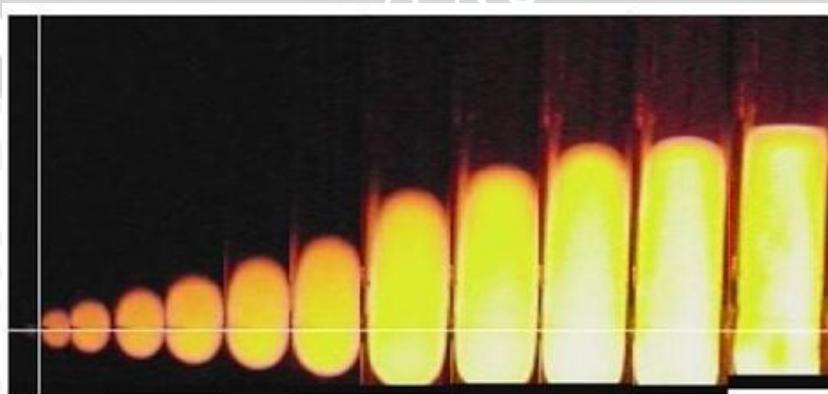


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Sebelumnya

Dari permasalahan yang menyatakan bahwa energi fosil saat ini sudah menipis, membuat para ilmuwan mencari solusi tentang bagaimana mengatasi masalah ini. Solusinya adalah mencari energi alternatif terutama energi yang dapat diperbarui, energi yang berasal dari bahan bakar gas sangat potensial terutama biogas. Hal itu membuat para ilmuwan saat ini banyak meneliti tentang biogas, mulai dari pembuatan biogas sampai pemurnian biogas. Tetapi untuk penelitian tentang karakteristik pembakaran pada pembakaran campuran biogas dan udara sampai saat ini belum dilakukan. Oleh karena itu perlu adanya penelitian tentang karakteristik pembakaran biogas. Sebelum melakukan penelitian ini, perlu mencari referensi tentang penelitian yang mencakup tentang pembakaran bahan bakar gas dan melihat penelitian yang menunjukkan CO_2 sebagai *inhibitor*. Yang pertama adalah Ilminnafik (2010) meneliti tentang pengaruh karbondioksida terhadap pembakaran dari refrigeran hidrokarbon, hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penambahan karbondioksida 20 % dan 50 % nyala api cenderung berwarna kekuningan yang menunjukkan pembakaran tidak sempurna yaitu sebageian karbon tidak terbakar. Sedangkan tanpa menggunakan karbondioksida nyala api berwarna biru ini menunjukkan bahwa pembakaran terjadi lebih sempurna.



Gambar 2.1. Pembakaran campuran LPG dan udara dengan 20% CO_2
Sumber : Ilminnafik (2010:6)

Nurhadi (2011) juga melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan *inhibitor* CO₂ terhadap batas mampu nyala refrigeran hidrokarbon dengan kandungan propana 99,5 %, hasil pengamatan secara visual dengan melihat warna api, pada campuran refrigeran dan udara tanpa *inhibitor* CO₂ pada AFR perbandingan AFR kaya (14:1), AFR stoikiometri (24:1) dan AFR miskin (28:1), nyala api berwarna biru menunjukkan pembakaran terjadi lebih sempurna. Pada pembakaran dengan penambahan karbondioksida 2 %, 3%, 4% dan 5% warna api juga berubah kekuningan yang menunjukkan pembakaran lebih tidak sempurna dimana sebagian karbon tidak terbakar.

Selain penelitian di atas sangat perlu untuk mencari tahu tentang karakteristik cepat rambat pembakaran bahan bakar gas dengan tambahan *inhibitor*. Sebelum lebih lanjut untuk mengetahui pengaruh *inhibitor* terhadap cepat rambat pembakaran lebih baiknya harus mengetahui kecepatan maksimum yang bisa dicapai oleh sebuah campuran kimia antara bahan bakar gas dan udara. Oleh karena itu perlu adanya referensi yang berhubungan dengan hal itu. Winarta (2007) yang melakukan penelitian tentang pengaruh perbandingan campuran udara dengan bahan bakar terhadap cepat rambat api menggunakan bahan bakar gas (BBG), hasil penelitian menunjukkan bahwa campuran *stoichiometry* untuk pembakaran BBG adalah pada (AFR) 8 : 1 dan kecepatan rambat api maksimum dicapai pada campuran *stoichiometry*.

Setelah mengetahui cepat rambat pembakaran antara bahan bakar gas dan udara tanpa *inhibitor*, perlu adanya referensi tentang pengaruh cepat rambat pembakaran dengan adanya tambahan *inhibitor*. Munteanu, dkk (2002) melakukan penelitian tentang pengaruh penambahan CO₂ pada pembakaran campuran stoikiometri propana-udara. Dari penelitian tersebut bahwa semakin besar penambahan CO₂ pada campuran propana-udara akan menyebabkan kecepatan pembakaran menurun sampai campuran CO₂ sebesar 32% pembakaran tidak menyala, seperti terlihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Pengaruh penambahan CO₂ terhadap kecepatan pembakaran

No	Penambahan kadar CO ₂ (%)	Kecepatan Pembakaran (cm/s)
1	0	294,52
2	4	138,71
3	8	49,8
4	12	18,87
5	16	15,73
6	20	8,33
7	32	Tidak terjadi pembakaran

Sumber : Munteanu, dkk (2002:2)

2.2. Biogas

Biogas merupakan sumber energi alternatif yang dapat dihasilkan dengan menggunakan teknologi sederhana. Biogas diperoleh dengan mengolah limbah bio atau biomassa di dalam alat kedap udara yang disebut digester. Biomassa dapat berupa kotoran ternak bahkan tinja manusia, dan sisa-sisa panen seperti jerami, sekam, dan lain-lain. Namun sebagian besar berasal dari kotoran ternak.

Biogas berasal dari bakteri dalam proses bio-degradasi bahan organik di bawah kondisi anaerobik (tanpa udara). Generasi alami biogas merupakan bagian penting dari siklus biogeokimia karbon. Metanogen (bakteri penghasil metana) adalah ikatan terakhir dalam rantai mikro-organisme yang menurunkan bahan organik dan mengembalikan produk dekomposisi terhadap lingkungan. Dalam proses ini dihasilkan biogas, sumber energi terbarukan.

Unsur utama yang terkandung dalam biogas sebagian besar berupa metana dan karbondioksida. Biogas dengan unsur metana lebih dari 45% bersifat mudah terbakar. Untuk lebih lengkapnya kandungan yang terdapat dalam biogas dapat dilihat pada Tabel 2.2

Tabel 2.2 Komposisi Biogas

Substansi	Simbol	Prosentase
Metana	CH ₄	50 - 70
Karbon dioksida	CO ₂	30 – 40
Hidrogen	H ₂	5 - 10
Nitrogen	N ₂	1 - 2
Uap air	H ₂ O	0,3
Hidrogen Sulfida	H ₂ S	sisia

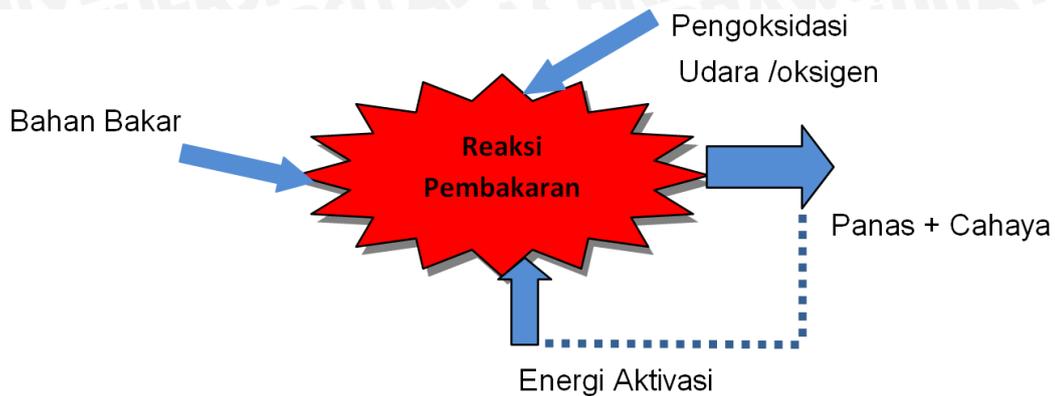
Sumber : Subowo (2010:1)

2.3 Prinsip Pembakaran dan Proses Pembakaran

Pembakaran adalah proses lepasnya ikatan-ikatan kimia lemah bahan bakar akibat pemberian energi tertentu dari luar menjadi atom-atom yang bermuatan dan aktif sehingga mampu bereaksi dengan oksigen sehingga membentuk ikatan molekul-molekul yang kuat yang mampu menghasilkan cahaya dan panas dalam jumlah yang besar. (Wardana, 2008:7). Telah dijelaskan di atas bahwa pembakaran adalah reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidasi oksigen (oksigen dan udara) yang menghasilkan panas, maka proses pembakaran bisa berlangsung jika adanya :

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

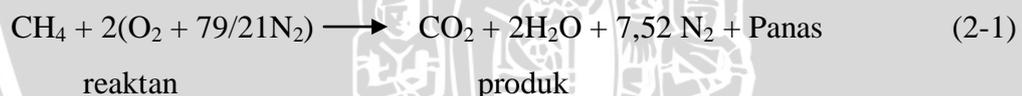
Panas atau energi yang dipakai untuk mengaktifkan molekul-molekul bahan bakar disebut sebagai energi aktivasi. Energi aktivasi diambil dari proses pembakaran kontinyu. Pada proses pembakaran kontinyu, umumnya energi di ambil dari panas hasil pembakaran lewat cara radiasi atau cara konveksi (sirkulasi balik) seperti terlihat pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2. Ilustrasi proses pembakaran
Sumber : Wardana (2008:3)

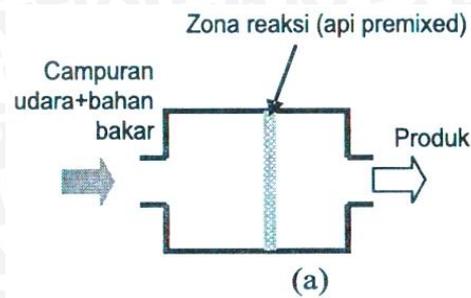
2.4 Pembakaran Stoikiometri

Pembakaran stoikiometri adalah pembakaran dimana semua atom dari pengoksidasian beraksi secara kimia dengan bahan bakar untuk menjadi produk, pengoksidasian yang paling lazim adalah campuran 21% oksigen dan 79 % nitrogen (fraksi mol atau volume). Jadi persamaan kimia dari pembakaran stoikiometri dari metana (CH_4) dengan udara adalah (Wardana 2008:55).



2.5 Pembakaran Premixed

Pada pembakaran premixed terjadi perambatan gelombang pembakaran yang disebut dengan *flame front*. Gelombang pembakaran merambat ke arah reaktan dibelakang gelombang pembakaran terbentuk produk pembakaran. Pada Gambar 2.3 reaktan (bahan bakar dan udara) bercampur sebelum masuk ke zona reaksi. Proses reaksinya berlangsung sangat cepat biasanya pada tekanan tetap. Setelah melewati zona reaksi reaktan menjadi produk. Zona reaksi sangat tipis yang disebut api premixed. Api premixed akan merambat menuju kearah reaktan dengan kecepatan unik. Jika kecepatan reaktan sama dengan kecepatan rambatan api maka api (zona reaksi) akan stasioner (Wardana, 2008:149)



Gambar 2.3. Cara reaktan terbakar pada pembakaran premixed
Sumber: Wardana (2008:149)

Dalam gelombang pembakaran terdapat dua zona yaitu :

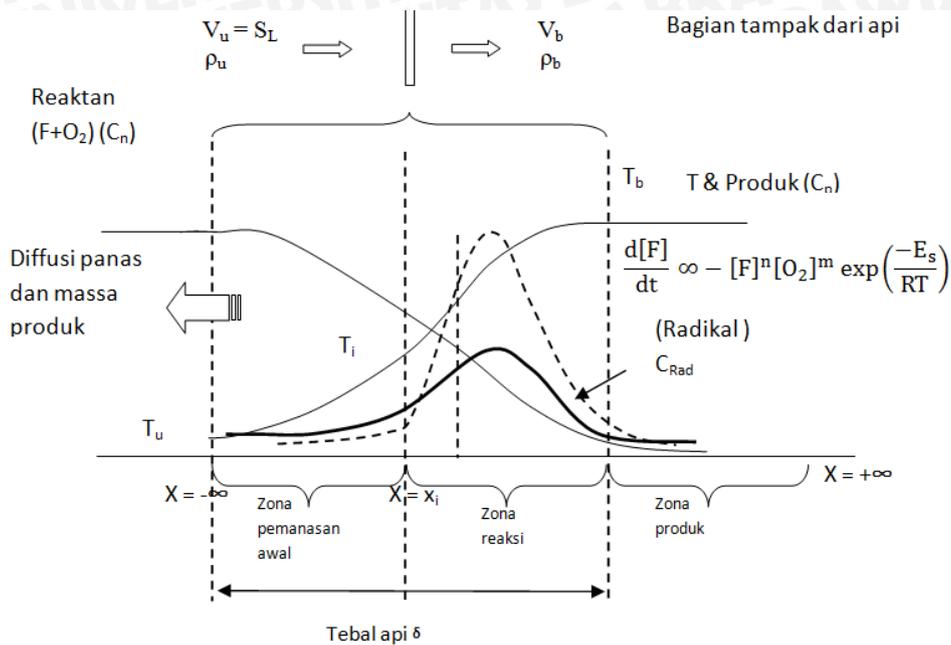
1. Zona pemanasan awal (*preheat zone*).

Daerah dimana sedikit panas dilupakan dan masih banyak bahan bakar yang belum terbakar (*unburn fuel*).

2. Dan zona reaksi (*reaction zone*)

Daerah dimana sebagian besar energi kimia dilepaskan. seperti terlihat pada gambar 2.4

Distribusi konsentrasi reaktan, konsentrasi produk, konsentarsi radikal, temperatur dan kecepatan gas seperti terlihat pada Gambar 2.4. Radikal akan selalu muncul pada zona reaksi sebagai konsekuensi dari reaksi tersebut.



Keterangan gambar pemanasan awal :

- C_R : konsentrasi reaktan
- C_P : konsentrasi produk
- T : distribusi temperatur
- T_u : temperatur reaktan
- U : distribusi kecepatan gas
- T_i : temperatur penyalaan
- T_b : temperatur produk

Gambar 2.4. Detail struktur di dalam api premixed
Sumber : Wardana (2008:155)

2.6 Tebal Api dan Kecepatan Pembakaran

Tebal api pada pembakaran dapat dihitung berdasarkan kesetimbangan energi dengan membuat daerah reaksi secara imajiner kemudian kesetimbangan energi dianalisis pada masing-masing zona imajiner tersebut. Gradien temperatur akibat kesetimbangan energi pada kedua zona tersebut disamakan. Tebal api dalam pembakaran premixed biasanya di beri notasi δ . Adapun kesetimbangan energi tersebut adalah sebagai berikut :

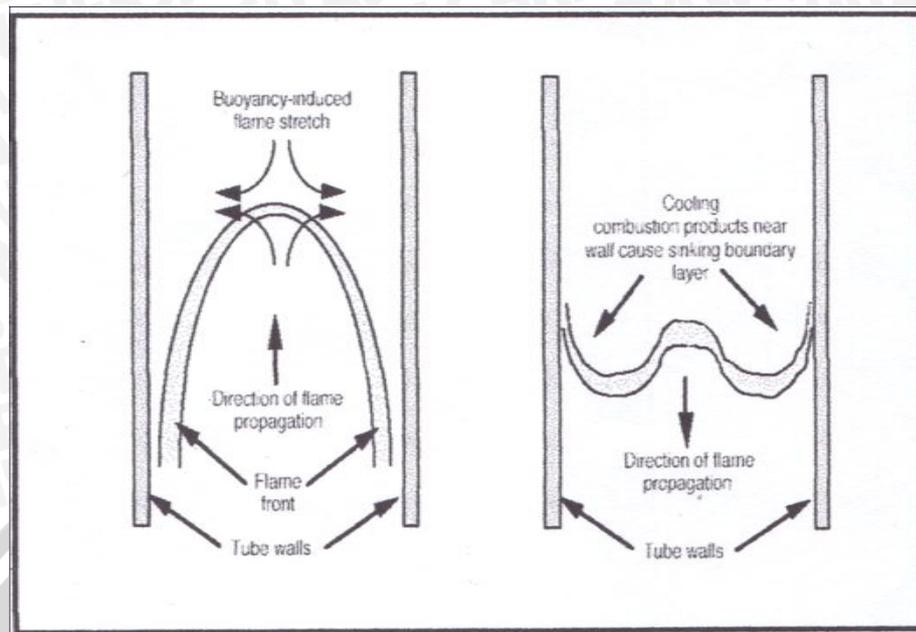
(panas reaksi) + (panas konveksi) = (panas yang didifusikan oleh api ke sekitarnya)

Dalam api terjadi gradien temperatur, dimana temperatur produk lebih tinggi dari temperatur reaktan. Oleh karena itu berdasarkan hukum termodinamika maka akan terjadi transfer panas dari produk ke reaktan. Transfer panas yang terus menerus tersebut akan meningkatkan temperatur reaktan. Jika temperatur reaktan meningkat maka daerah pemanasan awal akan bergeser ke kiri, sedangkan zona yang terjadi menjadi zona pemanasan awal temperaturnya akan lebih tinggi sehingga terjadi pembakaran. Peristiwa ini terjadi secara kontinyu sehingga api merambat ke arah reaktan. Kecepatan rambatan api tersebut disebut kecepatan pembakaran. Kecepatan pembakaran dalam pembakaran premixed biasanya di beri notasi S_L (Wardana, 2008:157).

2.7 Gaya Apung

Gaya apung timbul akibat adanya perbedaan massa jenis gas yang sangat tinggi antara gas pembakaran dan udara di sekitarnya. Temperatur adiabatik api berkisar antara 2000 K sampai 3000 K, hal ini menunjukkan gas hasil pembakaran 10 kali lebih tinggi dari suhu udara. Dengan demikian densitas gas hasil pembakaran 10 kali lebih kecil dibandingkan densitas udara. Perbedaan yang sangat besar tersebut menyebabkan gravitasi bumi menciptakan gaya apung yang sangat kuat yang mendorong api selalu ke arah atas (Wardana 2008:147).

Efek gaya apung dapat ditunjukkan hasil dari pengamatan Buchmaster dan Mikolaistis pada Gambar 2.5. Pada percobaan tersebut menunjukkan pergerakan api vertikal, pergerakan api dari atas ke bawah menunjukkan ketidakstabilan api akibat pengaruh gaya tolak dari gaya apung. Dan pada penelitian tersebut menunjukkan bahwa api yang dekat dengan dinding mengalami pelambatan akibat efek pendinginan dari dinding.



Gambar 2.5. Pergerakan api vertikal

Sumber : Skema hasil pengamatan Buchmaster dan Mikolaistis (1982:115)

2.8 *Inhibitor*

Inhibitor adalah zat yang menghambat atau menurunkan laju reaksi kimia, dalam hal ini reaksi kimia pembakaran. Molekul-molekul *inhibitor* akan terurai dan bekerja dengan mengganggu rantai reaksi kimia pembakaran, sehingga reaksi kimia pembakaran akan terhambat.

Tingkat penguraian molekul *inhibitor* dan konsentrasi *inhibitor* pada campuran pembakaran akan mempengaruhi laju kecepatan reaksi pembakaran. Makin tinggi tingkat penguraian molekul *inhibitor* dan konsentrasi *inhibitor* akan makin memperlambat laju reaksi pembakaran (Chakraborty dkk, 1975)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Chakraborty, dkk (1975) yang menggunakan halogen-metana sebagai *inhibitor* menyatakan bahwa pengaruh yang utama dari penambahan halogen-metana menyebabkan pengurangan konsentrasi radikal bebas pada batas api. Metana-halogen dapat mengurai dalam api, dan halogen itu sendiri berperan sebagai *inhibitor*.

2.9 Batas Mampu Nyala

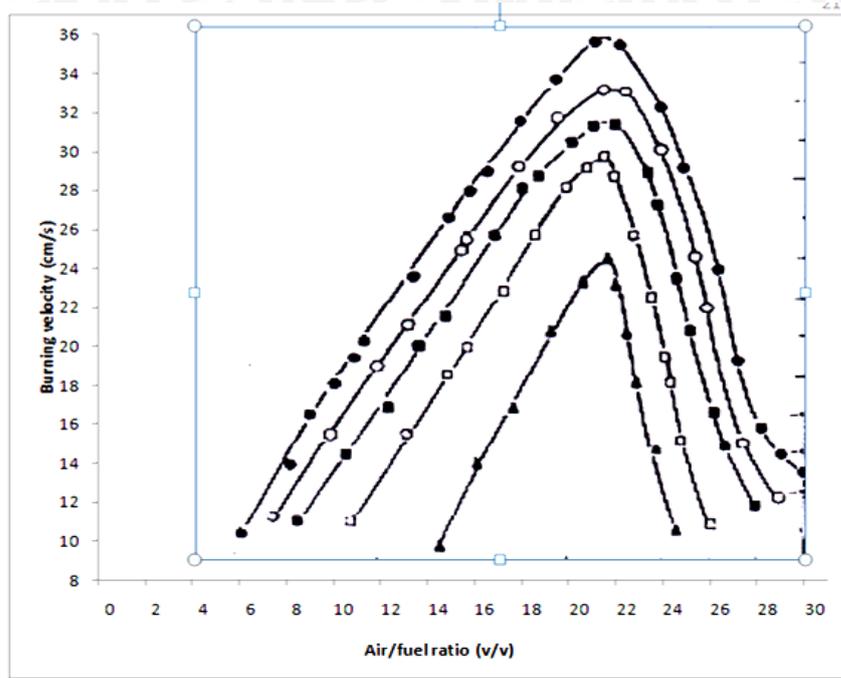
Secara teoritis api akan merambat hanya di dalam rentang konsentrasi campuran antara batas lebih rendah dan batas lebih tinggi dari mampu nyala. Batas-batas campuran ini juga disebut campuran termiskin dan campuran terkaya bagi api untuk mampu menyala.

Secara praktis, dalam eksperimen, batas mampu nyala juga berhubungan dengan kehilangan panas dari sistem. Akibat radiasi dari produk pembakaran bertemperatur tinggi ke lingkungan bertemperatur rendah, api menjadi lebih dingin. Pendinginan menciptakan gradien temperatur negatif di zona api. Akibat gradien temperatur negatif tersebut, panas dibuang oleh proses konduksi dari api. Ketika panas yang dibuang dari api cukup banyak, api berhenti merambat dan mati (Wardana 2008:168).

Hasil penelitian tentang batas mampu nyala dari LPG murni dan LPG dengan *inhibitor* methylene dichloride, chloroform dan carbon tetrachloride yang dilakukan oleh Chakraborty dkk dapat dilihat pada Gambar 2.6.

Kecepatan pembakaran tidak akan nol bila perbandingan udara dan bahan bakar tepat, maka kurva kecepatan pembakarannya adalah v . perbandingan udara dan bahan bakar kemungkinan akan menyebabkan kecepatan pembakaran nol, untuk mendapatkan batas bawah dan atas nyala api.

Penambahan *inhibitor* akan mengurangi radikal bebas seperti H, OH, dan O pada batas api, kecepatan reaksi eksotermik berkurang dan kecepatan pembakaran yang menurun akan menyebabkan penurunan temperatur.



Keterangan gambar :

- Tanpa *inhibitor*
- Dengan *inhibitor* CHCl_3
- ▲ Dengan *inhibitor* CCl_4
- Dengan *inhibitor* CH_2Cl_2
- Dengan *inhibitor* CCl_4

Gambar 2.6. Batas *flammability* LPG tanpa dan dengan berbagai *inhibitor*
Sumber : Chakraborty, dkk (1975:13)

2.10 Gas Metana (CH_4)

Metana yang merupakan molekul hidrokarbon rantai terpendek dan teringan. Metana merupakan gas yang terbentuk oleh adanya ikatan kovalen antara empat atom hidrogen dengan satu atom karbon. metana adalah sumber bahan bakar utama. Pembakaran satu molekul metana dengan oksigen akan melepaskan satu molekul CO_2 (karbondioksida) dan dua molekul H_2O (air).

Metana adalah gas yang tidak berwarna, tidak berbau dengan distribusi yang luas di alam. Gas metana berada di sekitar kita. Metana dapat ditemukan di rawa-rawa, di lahan gambut, di ladang minyak, ladang gas bumi dan juga tambang batu bara maka gas metana ini disebut proses alam. Ketika gas yang kaya dengan

metana diproduksi melalui pembusukan oleh bakteri anaerobik dari bahan-bahan organik selain dari fosil, maka itu disebut biogas. *Property* dari gas metana dapat dilihat pada Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Propertis gas metana

No	Gas Metana	Keterangan
1	Rumus kimia	CH ₄
2	Konstanta gas R (KJ/Kg.K)	0.5128
3	C_{p0}	2.2537
4	C_{v0}	1.7354
5	k	1.299
6	Entalpi (ΔH_f^0) ₂₉₈ (KJ/mol)	-74.87

Sumber : Cengel dan Boles (1994:598)

2.11 Gas Karbondioksida (CO₂)

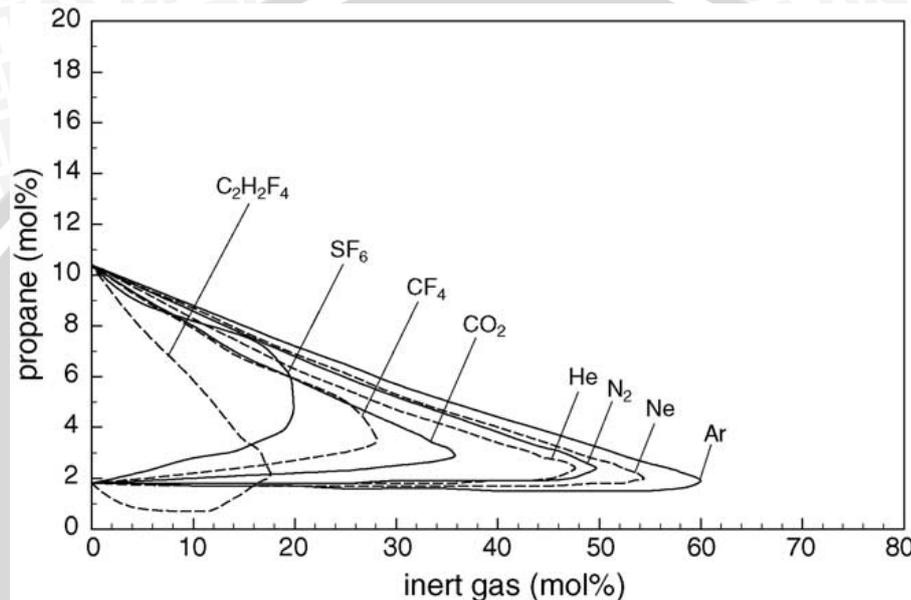
Gas karbondioksida adalah gas *inert* pada pembakaran campuran bahan bakar dan udara. Zat gas karbondioksida (CO₂) dapat mempengaruhi cepat rambat api melalui reaksi kimia dan *heat transfer* secara radiasi saat pembakaran. Penambahan prosentase gas karbondioksida (CO₂) pada campuran bahan bakar dan udara akan menyebabkan perubahan pada cepat rambat api saat pembakaran, hal ini diakibatkan gas CO₂ akan mengabsorpsi energi panas dari produk gas pembakaran. *Properties* dari gas karbondioksida (CO₂) dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Propertis gas karbondioksida

No	Gas karbondioksida	Keterangan
1	Rumus kimia	CO ₂
2	Konstanta gas R (KJ/Kg.K)	0.1889
3	C_{p0}	0.846
4	C_{v0}	0.657
5	k	1.289
6	Entalpi (ΔH_f^0) ₂₉₈ (KJ/mol)	-393.52

Sumber : Cengel & Boles (1994:598)

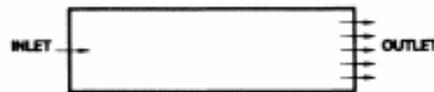
Gas karbondioksida (CO_2) merupakan zat *inhibitor* dengan sifat *inhibitor* yang cukup baik, hal ini dapat diketahui dari penelitian Maria Molnarne dkk (2005). Penelitian tersebut menghasilkan bahwa gas karbondioksida (CO_2) memiliki sifat *inhibitor* yang lebih baik dibandingkan dengan He, N_2 , Ne, Ar. Hal tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7. Pengaruh gas *inert* pada *range* pembakaran campuran gas propana-udara
 Sumber : Molnarne, dkk (2005:47)

2.12 Hele Shaw Cell Tipe Lateral

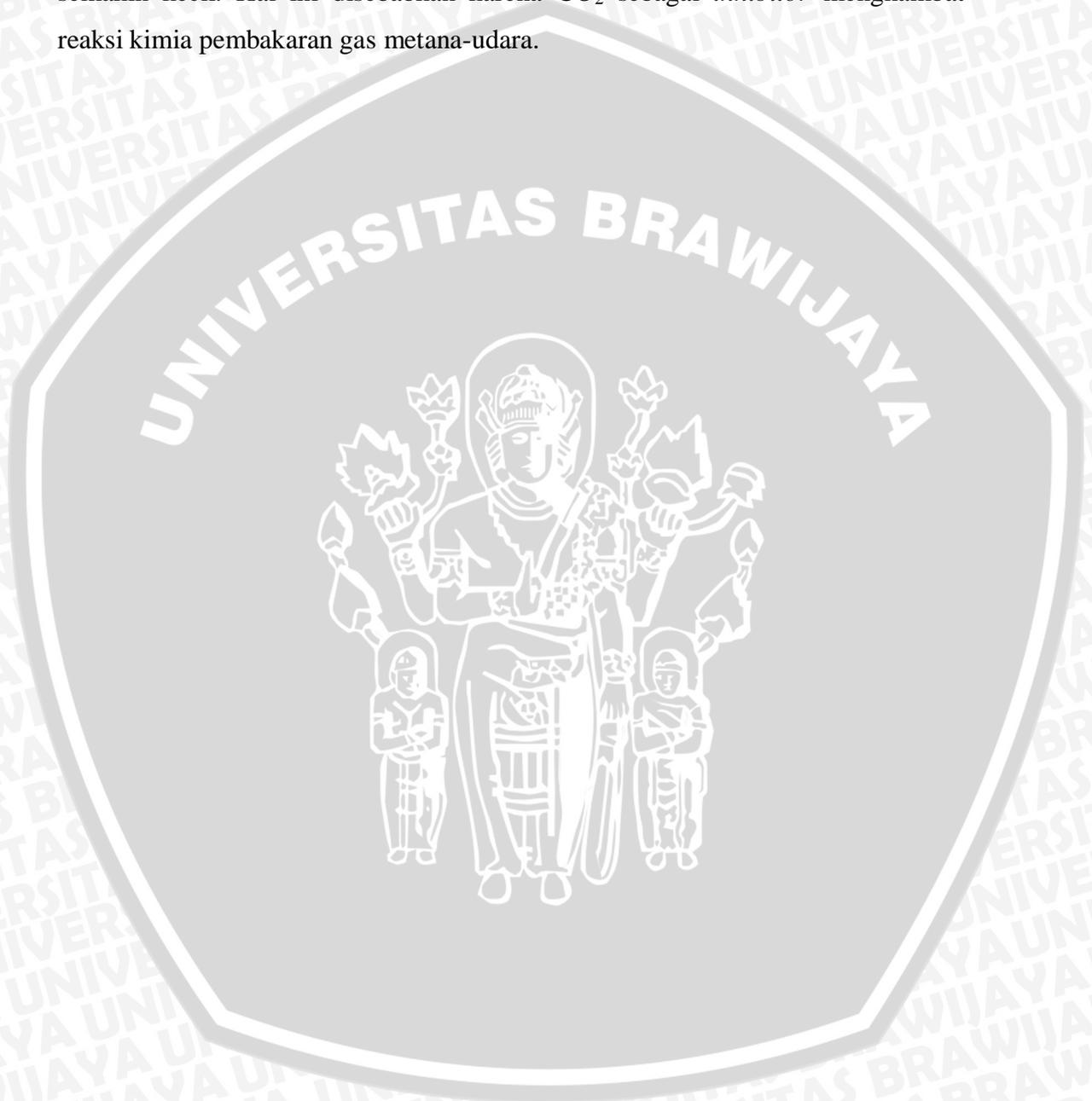
Hele shaw cell (oleh Henry Selby Hele Shaw) didefinisikan sebagai aliran *stokes* antara dua pelat paralel datar dipisahkan oleh celah yang sangat kecil. Tipe Lateral memiliki ciri *finger* yang dihasilkan menuju hanya satu arah dan bentuknya persegi panjang.



Gambar 2.8 *Hele-shaw cell* tipe lateral
 Sumber: Daccord, dkk (1986:337)

2.13 Hipotesis

Semakin besar kadar CO₂ sebagai *inhibitor* pada pembakaran gas metana-udara, menyebabkan kecepatan pembakaran akan menurun dan besar nyala api semakin kecil. Hal ini disebabkan karena CO₂ sebagai *inhibitor* menghambat reaksi kimia pembakaran gas metana-udara.



BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan menggunakan metode penelitian eksperimental (*experimental research*), yaitu dengan melakukan pengamatan secara langsung pada objek yang diteliti untuk mencari data dalam suatu kejadian melalui proses eksperimen sehingga dapat mengetahui pengaruh variasi kadar CO₂ terhadap karakteristik besar nyala api dan cepat rambat api pada pembakaran campuran stoikiometri metana-udara.

3.2 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Variabel bebas

Adalah variabel yang besarnya bebas dan tidak dipengaruhi oleh variabel yang lain. Variabel bebas dalam penelitian adalah penambahan kadar CO₂ pada titik penyalan atas sebesar: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 62.5% dan titik penyalan bawah sebesar: 0%, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%.

2. Variabel terikat

Adalah variabel yang besarnya tergantung dari nilai variabel bebas. Variabel terikat dalam penelitian ini adalah karakteristik besar nyala api dan cepat rambat api pada pembakaran metana-udara.

3. Variabel terkontrol

Adalah variabel yang nilainya telah ditentukan pada saat penelitian dan nilainya dibuat konstan. Variabel terkontrol dalam penelitian ini adalah *air fuel ratio* (AFR) dari campuran metana dan udara dalam keadaan stoikiometri.

3.3 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini dilakukan pada bulan Desember 2011 sampai dengan selesai di Laboratorium Riset Jurusan Mesin Fakultas Teknik Universitas Brawijaya.

3.4 Material dan Instalasi Penelitian

Material dan skema instalasi mencakup bahan, peralatan, rancangan instalasi dan prosedur pengambilan data.

3.4.1 Material

Material yang digunakan pada penelitian ini adalah

1. Gas metana

Gas metana yang digunakan pada penelitian ini adalah gas metana dengan kandungan komposisi seperti pada Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Komposisi Bahan Bakar Gas

Komposisi	Satuan Unit	Hasil Uji <i>Analisis Report</i>
Nitrogen (N ₂)	% mole	1.401
Karbondioksida (CO ₂)	% mole	0.130
Metana (CH ₄)	% mole	98.412
Etana (C ₂ H ₆)	% mole	0.057
Total		100.000

Sumber: Laporan Hasil Uji Biro Jasa Teknik PT. Petrokimia Gresik.

2. Gas CO₂

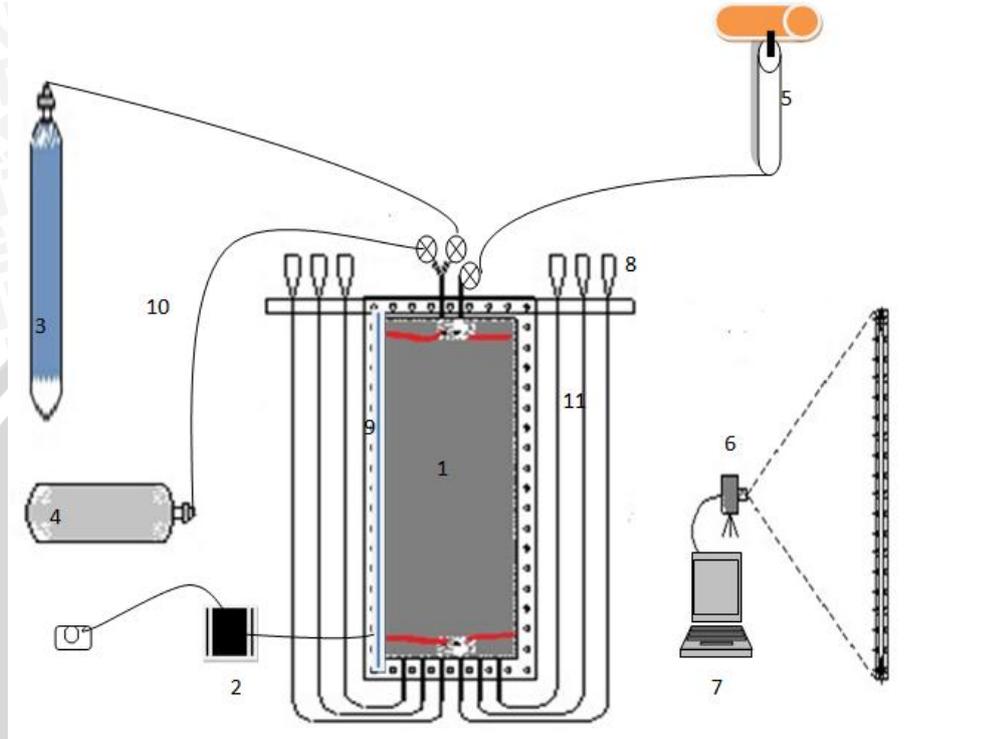
Gas CO₂ pada penelitian ini digunakan sebagai inhibitor pada proses pembakaran.

3. Udara

Pada penelitian ini udara digunakan sebagai oksidator, dengan kandungan O₂ di udara pada lingkungan pengujian sebesar 20.98%. (Laporan Hasil Uji Gas Analyzer Laboratorium Motor Bakar Jurusan Mesin FT-UB)

3.4.2 Instalasi Penelitian

Instalasi penelitian yang digunakan pada penelitian ini terlihat seperti skema berikut ini:



Keterangan gambar:

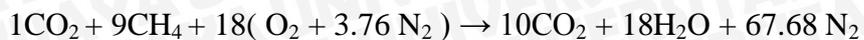
- | | |
|---|--------------------|
| 1. Ruang bakar model <i>helle-shaw cell</i> | 6. Kamera Video |
| 2. Pemantik | 7. Komputer |
| 3. Tabung CO ₂ | 8. Tabung pelimpah |
| 4. Tabung BBG | 9. Penggaris |
| 5. Pompa manual | 10. Selang gas |
| | 11. Selang air |

Gambar 3.1 Skema instalasi: a) tampak depan, b) tampak samping

3.4.3 Prosedur Penelitian

Sebelum pengambilan data kita perlu menghitung perbandingan volume metana, CO₂, dan udara. Pertama dihitung secara teoritis dengan rumus reaksi

kimia, misal campuran metana dengan 10% CO₂ pada keadaan campuran bahan bakar dan udara stokiometri.



Setelah menghitung perbandingan gas-gas tersebut, hitung perbandingan volume yang akan dimasukkan kedalam tabung. Dengan cara membandingkan perbandingan teoritis reaksi kimia dengan volume tabung dengan tinggi 50cm, panjang 20cm, lebar 1cm.

$$\frac{\text{volume keseluruhan pada reaksi kimia}}{1 \text{ satuan volume pada reaksi kimia}} = \frac{\text{volume keseluruhan pada tabung}}{\text{volume yang ditanyakan}}$$

$$\frac{1 + 9 + 18(1 + 3.76)}{1} = \frac{50 \times 20 \times 1}{x \times 20 \times 1}$$

$$x = \frac{50}{95.68}$$

$$x = 0.52$$

Jadi, dari rumusan tersebut kita mendapatkan nilai dari tiap volume gas, untuk kasus ini yang diambil hanya tinggi dari volume tabung.

$$\text{CO}_2 = 0.52$$

$$\text{CH}_4 = 0.52 \times 9 = 4.68$$

$$\text{Udara} = (18 \times (1 + 3.76)) \times 0.52 = 44.55$$

Urutan pelaksanaan pengambilan data adalah sebagai berikut :

1. Mempersiapkan semua peralatan yang diperlukan dan disusun sesuai dengan gambar instalasi yang direncanakan.
 - a. Mengisi air pada ruang bakar *helle shaw cell* sampai penuh.
 - b. Menyambung semua selang pada instalasi dan semua kran dalam keadaan tertutup.
 - c. Kamera video diatur dudukannya dan fokusnya agar tepat saat pengambilan data.
 - d. Penyala dihubungkan pada terminal.
2. Pemasukan gas ke dalam ruang bakar, urutannya sebagai berikut :

- Kran tabung gas metana dibuka dengan diikuti pembukaan kran pada selang penghubung tabung gas metana dan ruang bakar. Gas metana dimasukan sesuai volume yang telah dihitung. Setelah selesai kran pada tabung gas metana dan kran pada selang penghubung tabung gas metana dan ruang bakar ditutup.
 - Membuka kran tabung gas CO₂ diikuti dengan membuka kran pada selang penghubung tabung gas CO₂ dengan ruang bakar. Setelah gas CO₂ masuk kedalam ruang bakar dengan volume yang telah dihitung, kemudian tutup kembali kran antara tabung gas CO₂ dan ruang bakar.
 - Dan yang terakhir memasukan udara kedalam ruang bakar dengan cara memompa udara luar dengan pompa manual diikuti dengan membuka kran antara pompa manual dengan ruang bakar. Setelah ruang bakar terisi penuh dengan campuran gas metana, karbondioksida dan udara, tutup kembali kran antara pompa manual dan ruang bakar.
3. Setelah ruang bakar terisi campuran bahan bakar metan dan udara, kamera dihidupkan.
 4. Tombol pemantik ditekan sampai api menyala. Gambar perambatan api ruang bakar diambil.
 5. Setelah gambar rambatan api terekam kamera kemudian dimatikan dan gas hasil pembakaran yang tersisa dalam ruang bakar dibuang dengan membuka kran yang terhubung dengan udara bebas.
 6. Kemudian dilakukan langkah-langkah seperti diatas untuk tiap-tiap variasi perbandingan campuran bahan bakar metan, gas karbondioksida, dan udara.

3.4.4 Peralatan Penelitian

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

1. Ruang bakar model *helle shaw cell*

Ruang bakar model hell shaw cell berfungsi sebagai proses terjadinya pembakaran. Ruang bakar ini menggunakan bahan dari *acrylic* dengan ukuran tinggi 50cm, panjang 20cm, lebar 1cm yang ditempatkan pada *frame* yang terbuat dari plat besi. (Gambar 2.3)



Gambar 3.2 Ruang bakar bentuk lempeng kotak segi empat transparan dengan menggunakan model *helle -shaw cell*

2. Pemantik

Alat ini digunakan untuk menyalakan campuran metana, udara dan karbondioksida di dalam ruang bakar. Dengan *voltage output* dari pemantik 12.000 V. (Gambar 3.3)



Gambar 3.3 Pemantik

3. Kamera video

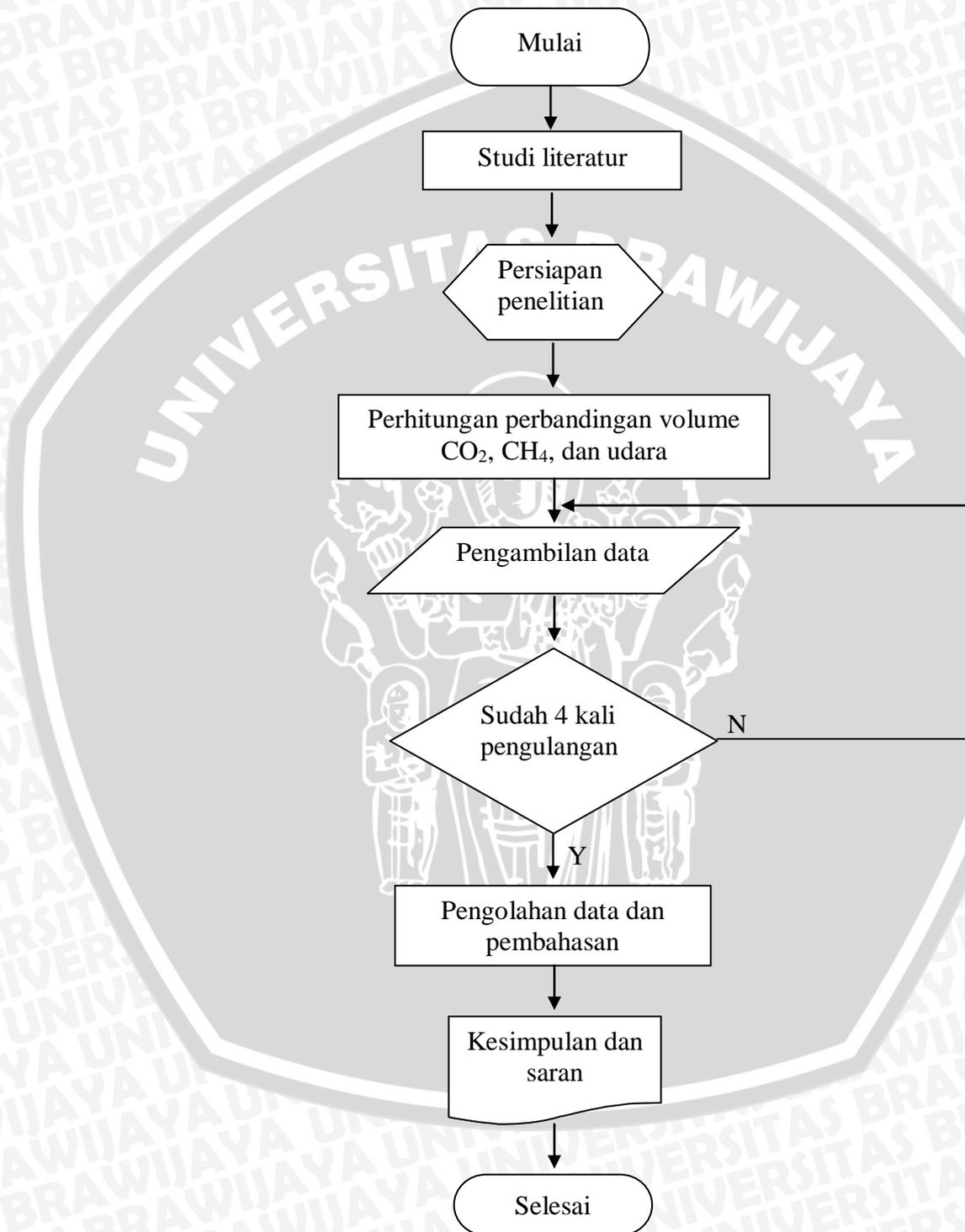
Digunakan untuk merekam gambar perambatan api, dengan spesifikasi rekaman video dapat dipotong maksimal dengan kecepatan 30 fps. (Gambar 3.4)



Gambar 3.4 Kamera

3.5 Diagram Alir Penelitian

Alur pemikiran yang dilakukan dalam penelitian kali ini dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Gambar 3.5 Diagram alir penelitian

BAB IV

DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengolahan Data

Hasil rekaman dari kamera diedit menggunakan *software Ulead 8* untuk menghasilkan rekaman video hanya pada proses pembakaran. Video proses pembakaran tersebut diolah dengan *software Free Video to JPG Converter* untuk menjadikan video menjadi gambar diam dengan kecepatan 30fps atau dalam satu detik menghasilkan 30 gambar diam. Gambar tersebut dipotong hanya pada bagian ruang bakar dengan ukuran 50cm x 20 cm sesuai dengan ukuran aslinya dengan menggunakan *software Adobe Photoshop*. Gambar potongan-potongan dalam satu kali pembakaran tersebut disusun berurutan sehingga menampilkan pergerakan api secara vertikal, ditunjukkan pada Lampiran 5. Gambar potongan-potongan tersebut juga disusun dalam satu *frame* sehingga tampak rambatan api yang ditunjukkan pada Gambar (4.1 dan 4.2).

Perhitungan cepat rambat api dan tebal api (api yang nampak dengan frekwensi cahaya tertentu) menggunakan *software Autocad 2009*. Gambar susunan rambatan api dimasukkan ke dalam *software Autocad 2009* untuk dihitung jarak perpindahan api setiap *fram*nya, dari hasil jarak tersebut dapat diketahui cepat rambat api dengan membagi jarak dengan waktu yang sudah diketahui. Sedangkan untuk menghitung tebal api, dihitung dengan cara diukur dimensi dari tebal api pada tiap potongan gambar, contoh perhitungan tebal api dapat ditunjukkan pada gambar pada Lampiran 4.

4.2 Pembahasan

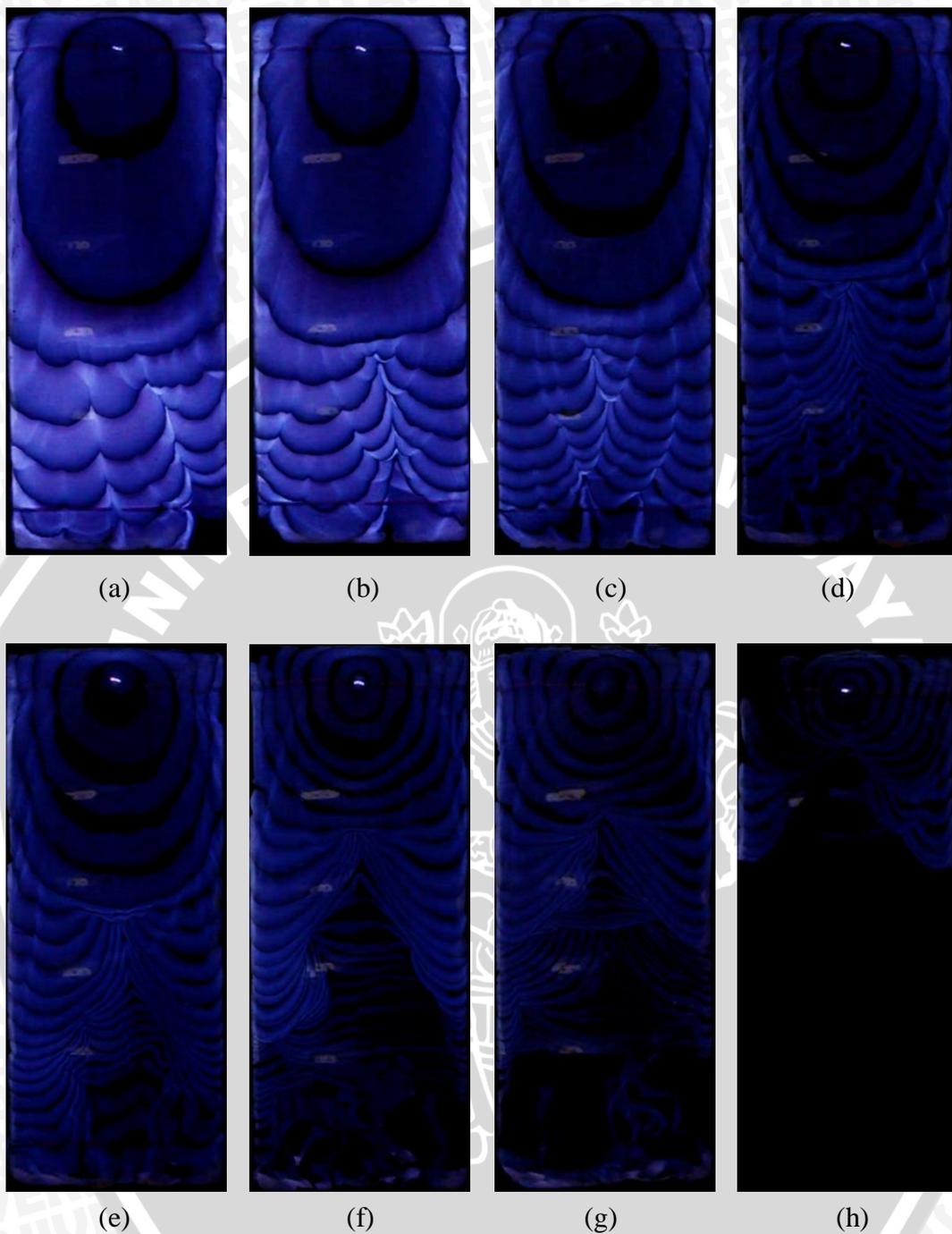
Pembahasan ini dilakukan untuk mendapatkan pola kecenderungan dari data hasil penelitian karakteristik pembakaran metana dan udara pada campuran stoikiometri dengan berbagai variasi kadar CO₂.

4.2.1 Gambar Rambatan Api

Pada Lampiran 5 menunjukkan hasil dari susunan potongan-potongan gambar diam yang disusun secara berurutan pada titik penyalaan atas dan bawah. Untuk setiap data gambar urutan diberi keterangan kecepatan pemotongan di bawah gambar dengan satuan fps (*frame* per sekon) yang menunjukkan waktu untuk setiap perpindahan *frame*. Dan pada Gambar (4.1 dan 4.2) menunjukkan susunan potongan-potongan gambar dalam satu kali pembakaran menjadi satu *frame*. Potongan-potongan gambar tersebut dipotong dengan kecepatan 30 fps untuk semua data. Potongan-potongan gambar dari video dengan kecepatan pemotongan 30 fps tersebut disusun (ditumpuk) dalam satu *frame*, sehingga nampak rambatan api tersebut hanya pada satu *frame*.

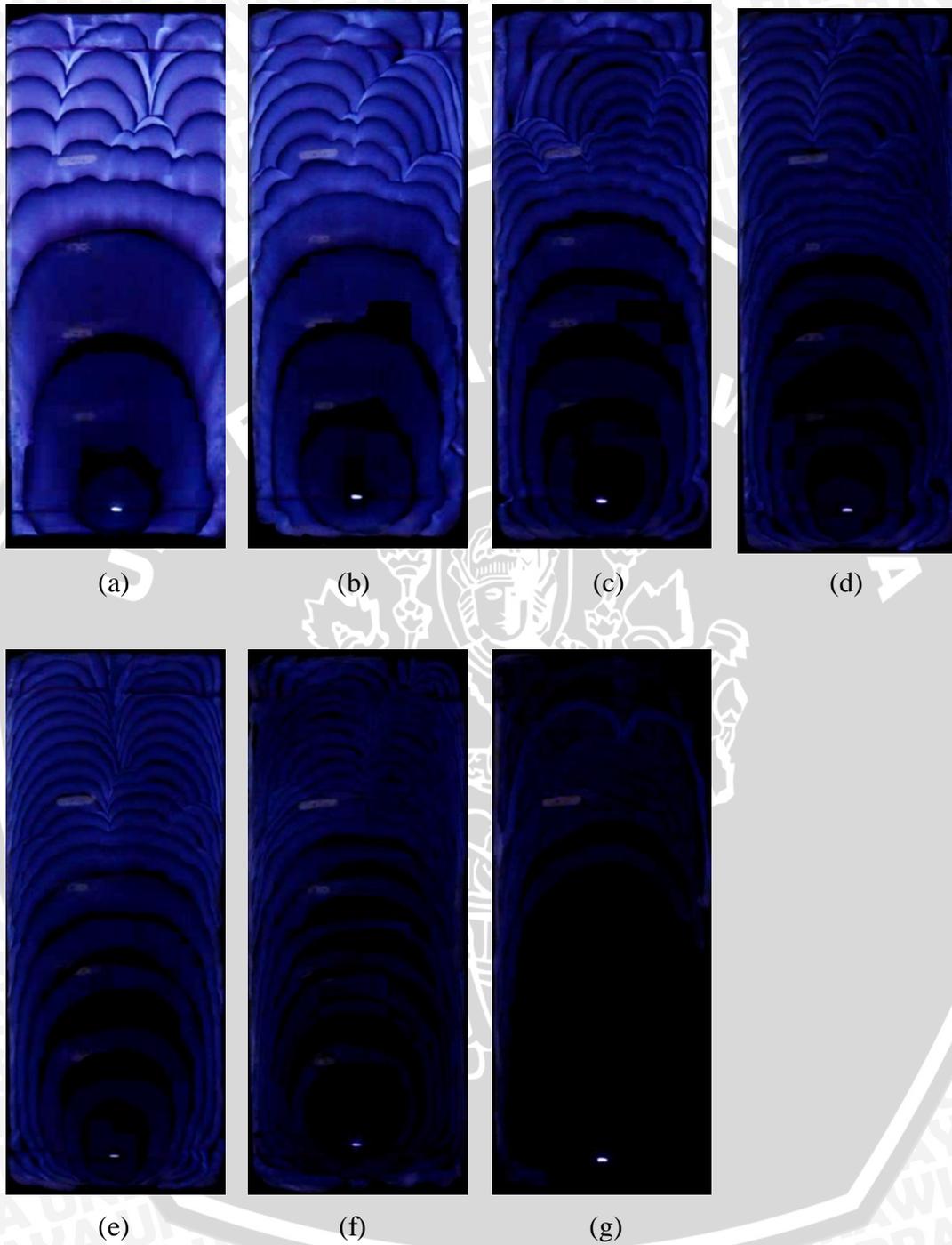
Gambar rambatan api tersebut menunjukkan semakain tinggi kadar CO₂ mengakibatkan warna api semakin memudar. Hal ini menunjukkan panas yang dihasilkan pembakaran semakin kecil diakibatkan semakin tingginya kadar CO₂. CO₂ sebagai *inhibitor* menyerap panas hasil pembakaran campuran metana-udara, sehingga pembakaran cenderung tidak sempurna.

Nyala api pada bagian bawah ruang bakar cenderung warnanya memudar, hal ini dapat mengidentifikasi bahwa CO₂ berkumpul pada bagian bawah ruang bakar. Hal ini disebabkan karena massa relatif CO₂ lebih besar dibandingkan dengan metana. Bahkan pada penyalaan titik atas, penambahan kadar CO₂ sebesar 62,5% mengakibatkan pembakaran tidak sampai pada dinding bawah. Gaya tolak apung terlihat jelas pada penyalaan titik atas dengan penambahan CO₂ 40% sampai *flammability limits*. Hal tersebut terlihat dari pola rambatan api, rambatan api tertahan oleh gaya apung pada bagian tengah rambatan api yang mempengaruhi cepat rambat api.



Speed cut = 30fps

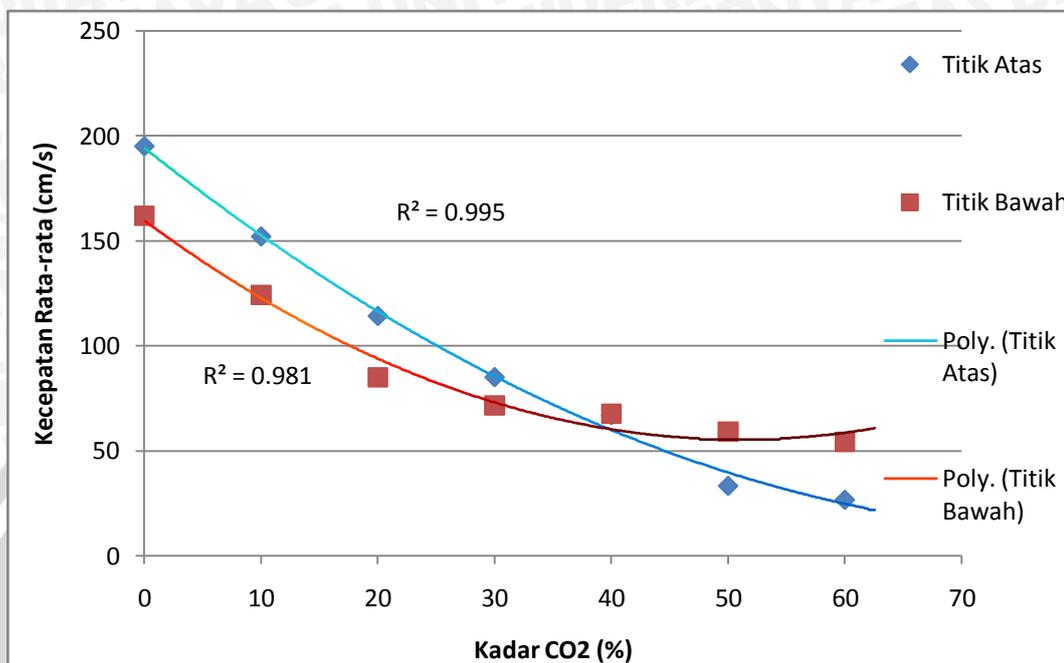
Gambar 4.1 Rambatan api pembakaran campuran stoikiometri metana-udara dengan berbagai tambahan CO_2 pada penyalaan atas: a) 0%, b) 10%, c) 20%, d) 30%, e) 40%, f) 50%, g) 60%, h) 62.5%.



Speed cut = 30fps

Gambar 4.2 Rambatan api pembakaran campuran stoikiometri metana-udara dengan berbagai tambahan CO₂ pada penyalan bawah: a) 0%, b) 10%, c) 20%, d) 30%, e) 40%, f) 50%, g) 60%.

4.2.2 Hubungan antara Cepat Rambat Api dengan Berbagai Variasi Kadar CO₂ pada Pembakaran Campuran Stoikiometri Metana-Udara.



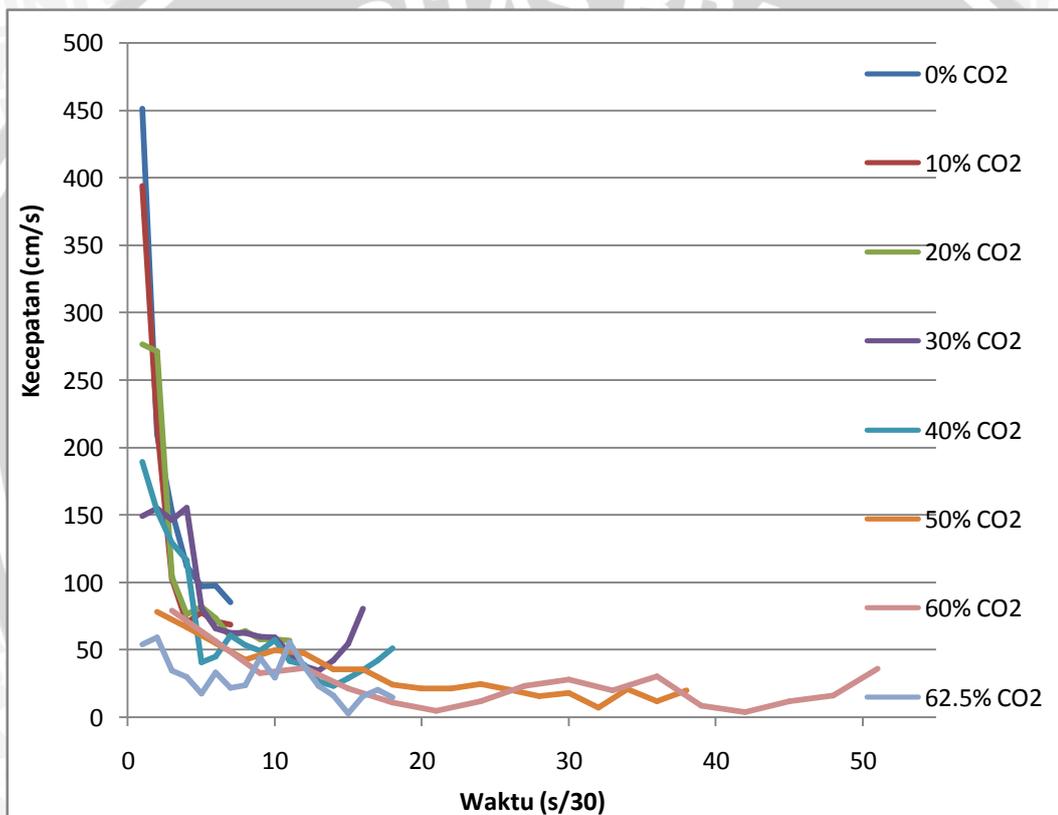
Gambar 4.3 Grafik hubungan antara kecepatan rata-rata dengan kadar CO₂ pada penyalan atas dan bawah.

Dari Gambar 4.3 dapat terlihat bahwa semakin besar kadar CO₂ pada campuran menyebabkan semakin lambat cepat rambat pembakaran metana-udara pada campuran stoikiometri. Hal ini disebabkan karena CO₂ memperlambat reaksi pembakaran dengan cara menyerap panas hasil pembakaran (*heat transfer*) sehingga mengurangi radikal bebas yang menyebabkan reaksi pembakaran melambat.

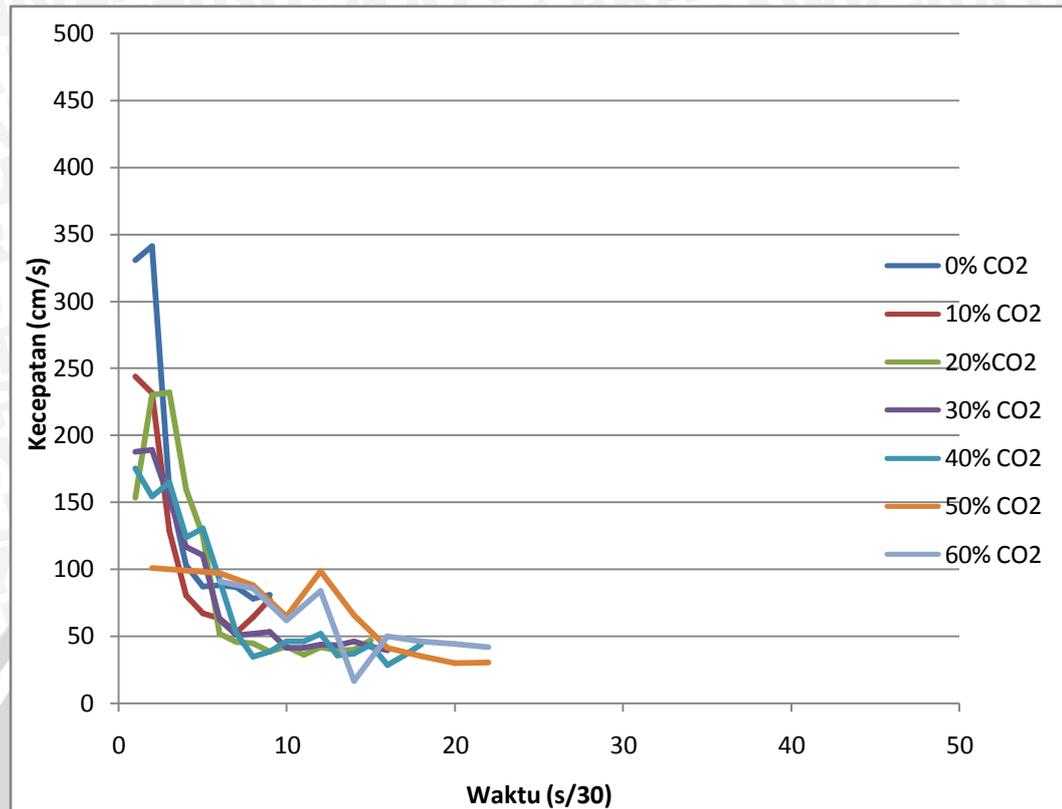
Untuk penambahan kadar CO₂ antara 0% sampai 30% cepat rambat pembakaran titik penyalan atas lebih tinggi dibandingkan dengan titik penyalan bawah. Hal ini disebabkan karena pada titik penyalan bawah saat penyalan awal terhambat oleh adanya penumpukan CO₂ pada bagian bawah ruang bakar dimana massa relatif dari CO₂ lebih besar dibandingkan dengan masa relatif udara dan metana. Hal tersebut dapat mempengaruhi awal pembakaran yang mana saat titik penyalan bawah api yang dihasilkan tidak sebesar titik penyalan atas. Hal ini bisa dibuktikan dengan Gambar (4.1 dan 4.2) dan Gambar (4.4 dan 4.5) yang

mana pada saat awal pembakaran untuk titik penyalaan atas cepat rambat api lebih tinggi dibanding dengan titik penyalaan bawah.

Untuk cepat rambat pembakaran antara kadar CO₂ 40% sampai *flammability limits* titik penyalaan bawah lebih tinggi dibanding dengan titik penyalaan atas. Hal tersebut disebabkan karena gaya apung sangat berpengaruh besar terhadap cepat rambat api. Hal ini dapat dilihat pada Gambar (4.1 dan 4.2) pada penyalaan atas dengan penambahan CO₂ 40% sampai *flammability limits* terlihat rambatan api melambat seiring bertambahnya kadar CO₂ dan dihambat oleh gaya apung.



Gambar 4.4 Grafik gabungan hubungan kecepatan sesaat dengan waktu pada penyalaan atas dengan penambahan kadar CO₂ 10% sampai pembakaran mati.



Gambar 4.5 Grafik gabungan hubungan kecepatan sesaat dengan waktu pada penyalaan bawah dengan penambahan kadar CO₂ 10% sampai pembakaran mati.

Dari gambar 4.4 urutan kecepatan maksimum dari berbagai variasi kadar CO₂ sebagai berikut: 0 %, 10%, 20%, 40%, 30%, 60%, 50%, dan 62.5%. Untuk pembakaran dengan kadar CO₂ 0%, 10%, dan 20% kecenderungan grafik menurun. Dengan kecepatan awal yang tinggi setelah itu turun dengan drastis dan kecenderungan stabil, turunya dan stabilnya kecepatan api tersebut disebabkan tekanan dari dinding. Untuk campuran dengan kadar CO₂ sebesar 30% dan 40% kecepatan awal cukup tinggi setelah itu menurun dan pada akhir pembakaran cepat rambat api membesar. Penurunan tersebut dikibatkan adanya gaya tolak dari gaya apung. Untuk kecepatan sesaat pada penambahan CO₂ 50% dan 60% kecepatannya sudah sangat rendah, hal ini dikarenakan sudah sangat tingginya kadar CO₂ yang memperlambat cepat rambat api dan juga disebabkan gaya tolak dari gaya apung. Untuk kadar CO₂ 62.5% pembakaran tidak terjadi sampai

dinding bawah ruang bakar, hal ini disebabkan karena CO_2 berkumpul pada bagian bawah sehingga sulit untuk terjadi pembakaran.

Dari gambar 4.5 urutan kecepatan maksimum dari berbagai variasi kadar CO_2 sebagai berikut: 0 %, 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, dan 60%. Pada titik penyalaan bawah cepat rambat pada awal pembakaran cenderung konstan dan lebih rendah dibandingkan dengan titik penyalaan atas. Hal ini diakibatkan karena metana dengan massa relatif yang lebih ringan membuat gas metana berada di bagian atas ruang bakar sehingga bagian bawah miskin gas metana atau dengan kata lain kaya akan udara dan CO_2 . Untuk campuran dengan kadar CO_2 60% saat awal pembakaran api tidak dapat terlihat dengan jelas. Oleh karena itu pengukuran kecepatan dapat dilakukan saat di pertengahan proses pembakaran. Hal ini disebabkan karena CO_2 banyak berkumpul pada bagian bawah, sehingga panas hasil pembakaran banyak terserap CO_2 yang menyebabkan api mengecil bahkan hingga tidak nampak.

4.2.3 Hubungan antara Besar Nyala Api dengan Berbagai Variasi Kadar CO_2 pada Pembakaran Campuran Stoikiometri Metana-Udara.

Tabel 4.1 Tebal api titik penyalaan atas

Kadar CO_2 (%)	Tebal api (mm)					
	a	b	c	d	e	f
0	71.1330	88.1737	52.5856	40.4713	37.6383	21.6317
10	62.3794	99.8754	44.5570	33.891	21.7627	18.1702
20	55.3695	59.2486	25.4280	28.5927	18.6275	14.7872
30	43.9126	29.0543	14.6797	15.0813	10.1011	10.3817
40	37.8917	25.4028	15.2111	14.5461	7.9031	5.3403
50	15.2160	12.4161	15.5858	14.0826	4.9888	2.5426
60	11.7404	7.8609	8.6388	9.6201	5.8345	8.8117
62.5	8.1115	9.3754	5.0855	4.7848	9.2855	4.0883

Tabel 4.2 Tebal api titik penyalan bawah

Kadar CO ₂ (%)	Tebal api (mm)					
	a	b	c	d	e	f
0	61.1263	82.8651	44.4633	36.7113	30.7730	32.1389
10	31.9339	55.9461	44.8490	31.4436	23.2481	17.5471
20	10.0932	37.1332	19.8540	18.2993	12.2336	16.2132
30	10.3695	10.4832	14.6956	15.6611	12.7309	12.7554
40	7.7231	13.3242	25.0442	18.8134	13.1642	11.4782
50	5.6832	11.8531	11.3789	14.9527	8.6804	6.6763
60		10.7654	6.1771	9.1435	5.5787	6.9478

Keterangan :

- a : rata-rata tebal api saat awal api sebelum pecah
- b : rata-rata tebal api saat pertengahan api sebelum pecah
- c : rata-rata tebal api saat akhir api sebelum pecah
- d : rata-rata tebal api saat awal api sesudah pecah
- e : rata-rata tebal api saat pertengahan api sesudah pecah
- f : rata-rata tebal api saat akhir api sesudah pecah

Besar nyala api dapat dilihat dari gambar visualisasi yang tertera pada Gambar (4.1 dan 4.2), serta dapat dilihat pada Tabel (4.1 dan 4.2) yang menunjukkan angka ketebalan api (api yang nampak dengan frekwensi cahaya tertentu) untuk masing-masing variasi kadar CO₂ untuk penyalan atas dan bawah. Metode untuk menentukan ukuran atau dimensi dari tebal api, diambil dari panjang api (*flame*) pada *frame* tiap potongan yang ditunjukkan pada gambar lampiran.

Semakin besar kadar CO₂ pada campuran membuat besar nyala api semakin mengecil dan warna api memudar. Hal ini disebabkan karena panas yang dihasilkan dari pembakaran diserap CO₂.

Pada campuran dengan kadar CO₂ 0% sampai 30% besar nyala api titik penyalan atas lebih besar sedikit daripada titik penyalan bawah. Sedangkan dengan kadar CO₂ lebih dari 40% besar nyala api titik penyalan bawah lebih besar dibanding dengan titik penyalan atas. Dan pada campuran kadar CO₂ lebih dari 40% pada titik penyalan atas dan bawah terlihat nyala api memudar bahkan sampai tidak nampak pada bagian bawah ruang bakar. Hal ini diakibatkan CO₂

berada di bagian bawah dalam ruang bakar yang disebabkan massa relatif dari CO_2 yang lebih besar dari gas metana dan udara, yang menyebabkan panas hasil pembakaran diserap oleh CO_2 dalam ruang bakar pada bagian bawah. Bahkan pada penyalaan titik bawah dengan penambahan CO_2 sebesar 60% pada awal pembakaran api tidak nampak.



BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Dari analisa pembahasan pengaruh penambahan kadar CO₂ pada pembakaran campuran stoikiometri metana-udara dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan CO₂ menyebabkan besar nyala api mengecil, hal ini dapat dilihat dengan bertambah tingginya kadar CO₂ di dalam campuran membuat warna api semakin memudar dan tebal api semakin kecil. Hal ini disebabkan karena panas hasil pembakaran diserap oleh CO₂.
2. Penambahan CO₂ juga menyebabkan cepat rambat pembakaran metana-udara semakin turun baik pada penyalaan titik atas maupun penyalaan titik bawah. Hal ini disebabkan karena hasil pembakaran diserap oleh CO₂ sehingga radikal bebas yang terbentuk berkurang yang menyebabkan reaksi pembakaran melambat. Penambahan CO₂ 0% sampai 30% menunjukkan bahwa cepat rambat titik penyalaan atas lebih tinggi dibanding dengan titik penyalaan bawah. Hal ini disebabkan karena cepat rambat api saat awal pembakaran pada titik penyalaan bawah lebih rendah dibanding dengan titik penyalaan atas. Sedangkan penambahan CO₂ sebesar 40% sampai *flammability limits* menunjukkan cepat rambat api pada titik penyalaan bawah lebih tinggi dibanding dengan titik penyalaan atas. hal ini disebabkan karena pada penyalaan titik atas cepat rambatnya berkurang disebabkan adanya gaya tolak dari gaya apung.



5.2 Saran

Adapun saran yang penulis harapkan dari penelitian tentang variasi penambahan kadar CO₂ terhadap karakteristik pembakaran campuran stoikiometri metana-udara adalah sebagai berikut:

1. Dari penelitian ini perlu dilanjutkan untuk diamati secara aplikasi. Yaitu pengaruh kandungan CO₂ di dalam biogas terhadap kinerja motor bakar empat langkah.

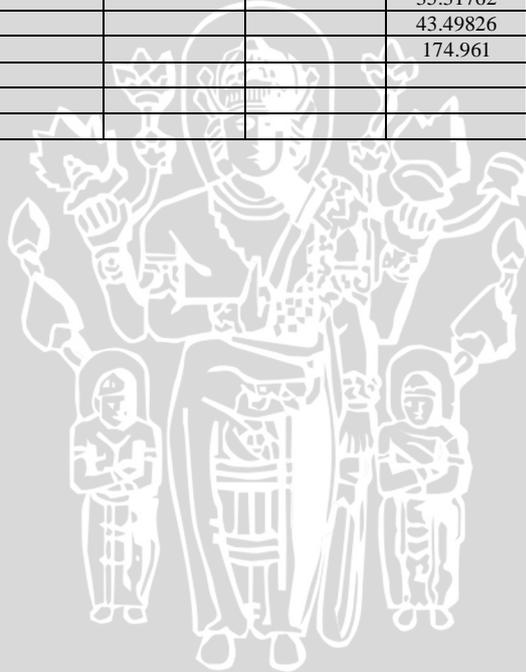


DAFTAR PUSTAKA

- Buckmaster, J. D., Mikolaistis, D. 1982. A Flammability-Limit Model for Upward Propagation Through Lean Methane/Air Mixture in a Standard Flammability Tube. *Combustion Flame*. 45 (II) : 109-119
- Cengel, Yunus A. & Boles, M. A. 1994. *Thermodynamics An Engineering Approach; Second Edition*. New York: McGraw-Hill.
- Chakraborty., Sunil K., Mukhopadhyay., Bholanath N. & Chanda, Bimal C. 1975. Effect of Inhibitor on Flammability Range of Flames Produced from LPG/Air Mixtures. *Fuel*. 54 (I): 10-16
- Daccord G, Nittmann J & Stanley. 1986. Radial Viscous Finger And Diffusion-Limited Aggregation : Fractal Dimension And Growth Sites. *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, VOLUME 56, NUMBER 4.
- Ilminnafik, Nasruk (2010). *Pengaruh Karbondioksida pada Kecepatan Pembakaran dari Refrigeran Hidrokarbon*. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) ke-9. Palembang
- Molnarne M., Mizsey P. & Schroder V. 2005. Flammability of Gas Mixtures Part 2: Influence of Inert Gases. *Journal of Hazardous Materials*. XXIII (3): 45-49.
- Munteanu V., Oancea. & Razus D. 2002. Carbon Dioxide As Inhibitor for Ignition and Flame Propagation of Propane-Air Mixtures. *Journal of Engineering* . XXI (1): 141-146.
- Nurhadi, (2011). *Pengaruh Penambahan Inhibitor CO₂ Terhadap Batas Mampu Nyala Refrigeran Hidrokarbon Dengan Kandungan Propane 99,5 %*. Tesis tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.
- Subowo, H. 2010. *Biogas Energi Murah Yang Ramah Lingkungan*. Tulungagung. SMKN 3 Boyolangu. <http://www.smkn3boy.sch.id>. (diakses 22 Agustus 2011).
- Uji Biro Jasa Teknik PT Petrokimia Gresik. 2012. Gresik-Jawa Timur.
- Wardana ING. 2008. *Bahan Bakar & Teknologi Pembakaran*. Malang: PT Danar Wijaya.
- Winarta, (2007). *Pengaruh perbandingan campuran udara dengan bahan bakar terhadap kecepatan rambat api tetapi menggunakan bahan bakar gas (BBG)*. Tesis tidak dipublikasikan. Malang: Universitas Brawijaya.

Lampiran 1. Tabel kecepatan api penyalaan bawah dengan berbagai tambahan CO₂

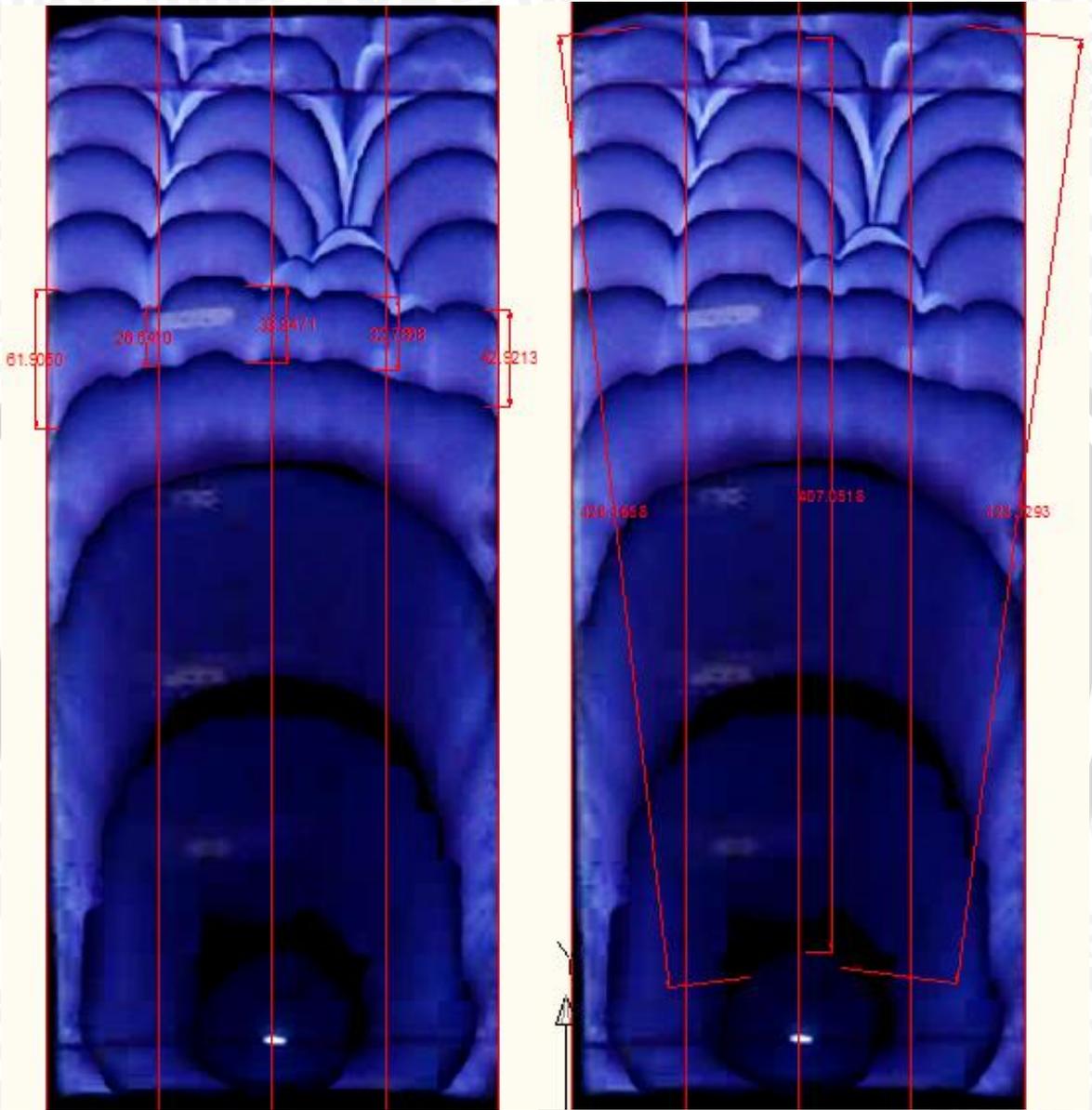
CO ₂ (%)	0	10	20	30	40	50	60
Waktu (s/30)	Kecepatan (cm/s)						
1	330.4905	243.8742	153.0758	187.6231	174.961	102.9012	
2	340.8254	231.2475	229.9723	188.9297	154.4196	100.864	
3	157.8576	128.4274	231.7972	151.3689	164.8272	99.0672	
4	102.6847	80.4711	159.5834	116.4994	123.8314	98.8926	
5	87.14328	67.00566	125.3675	110.1789	130.3471	98.9021	
6	88.15356	63.14712	51.75756	62.15724	91.54686	96.8535	90.8291
7	86.56134	52.48728	45.53976	50.8917	52.20432	88.9012	88.8921
8	77.8707	63.97206	44.55258	51.61404	34.77936	87.8912	85.5641
9	80.97966	77.61348	38.24664	53.33706	38.2011	69.0921	81.8932
10		108.0885	42.36792	41.08872	46.02384	64.5579	61.7631
11			36.13962	41.30598	46.2138	89.0921	60.8932
12			41.58708	43.39662	51.90096	98.4938	83.4966
13			39.52908	43.08414	35.6988	68.9213	82.9016
14			39.59724	45.79866	37.15518	65.38017	16.4065
15			47.0226	42.18858	43.44168	56.9032	17.9810
16				39.18888	28.38636	41.23761	49.6965
17					35.31762	32.9082	46.9012
18					43.49826	35.00367	16.4065
19					174.961	29.9824	16.9021
20						29.7799	49.6965
21						31.9032	46.9021
22						30.1220	41.8492



Lampiran 2. Tabel kecepatan api penyalaaan atas dengan berbagai tambahan CO₂

CO ₂ (%)	0	10	20	30	40	50	60	62.5
Waktu (s/30)	Kecepatan (cm/s)							
1	451.1795	393.8546	276.3543	149.1215	189.6833	79.9812	79.9012	54.2935
2	209.8852	216.1054	271.4966	154.8275	153.1944	78.1926	79.5610	59.1227
3	152.8052	103.0498	104.3301	146.413	129.5733	67.9216	79.0326	34.5439
4	112.1543	70.11828	76.3690	155.5336	116.5951	66.7925	69.0921	29.9656
5	97.32822	77.91282	82.0164	81.2018	40.8354	58.9012	59.0143	17.6479
6	97.70178	71.18232	73.3365	65.8171	45.02508	55.3060	56.5149	33.4701
7		68.76336	59.7697	62.7145	60.87462	45.9012	49.0132	22.0668
8			64.0955	62.7547	53.78256	42.6059	38.0143	23.8879
9			57.936	59.7907	49.59642	44.9012	33.0004	44.0085
10			57.9834	59.1895	57.6663	49.7625	34.8795	29.4032
11			56.8975	47.7502	41.95752	47.0125	35.9086	55.5045
12				38.0931	39.0855	47.7068	36.5837	37.3799
13				34.5988	26.469	39.0127	29.0132	23.3513
14				42.073	23.373	35.8257	24.0912	16.1318
15				54.3941	29.00172	35.9812	21.6284	2.9061
16				80.8362	35.26896	35.8318	16.9032	15.5676
17					42.12852	27.9012	13.0942	20.7236
18					51.39708	24.3899	11.1873	14.8872
19						23.0813	9.0132	
20						21.2465	6.9921	
21						21.2114	4.7342	
22						21.6159	7.0321	
23						23.0912	8.9932	
24						24.7402	11.8708	
25						22.8912	16.0942	
26						20.5132	20.9326	
27						17.0921	23.2808	
28						15.5775	25.0932	
29						16.9012	26.0214	
30						18.2518	27.9841	
31						10.9261	25.0932	
32						7.2663	22.0912	
33						16.0921	19.9017	
34						21.1337	24.0932	
35						15.0932	28.9189	
36						11.8787	30.5747	
37						15.0921	22.0321	
38						19.8829	14.0932	
39							8.91422	
40							6.0932	
41							5.0931	
42							4.03542	
43							6.0921	
44							8.9993	
45							11.7838	
46							13.0932	
47							14.9921	
48							16.2356	
49							20.9431	
50							29.0312	
51							36.265	

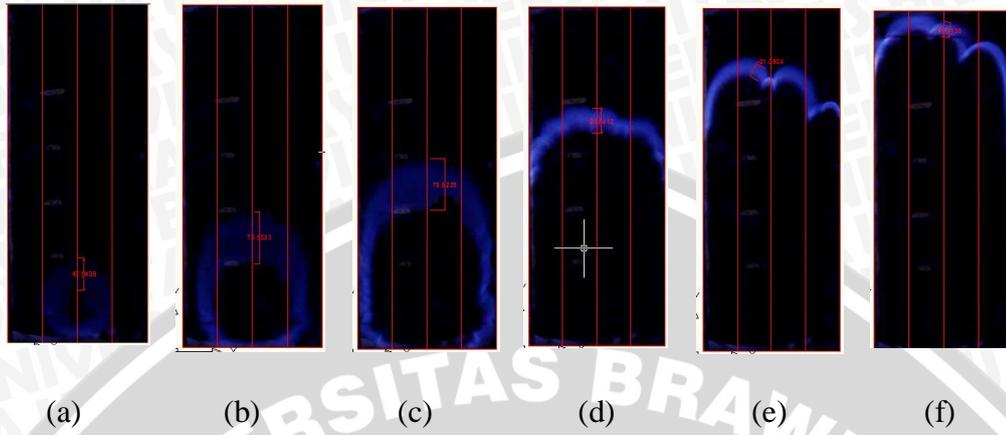
Lampiran 3. Gambar contoh perhitungan jarak rambatan api; a) untuk kecepatan sesaat, b) untuk kecepatan rata-rata



(a)

(b)

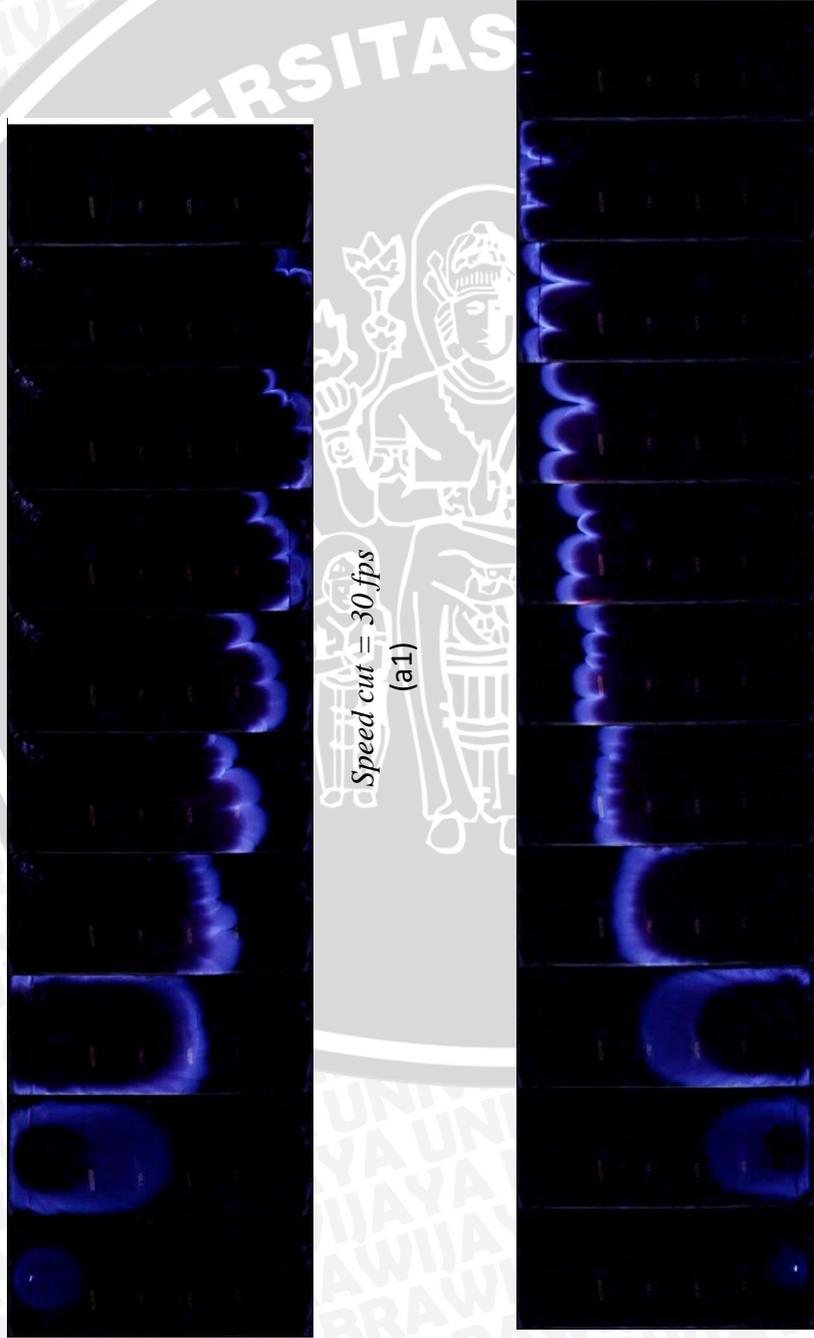
Lampiran 4. Gambar contoh penentuan dan perhitungan tebal api

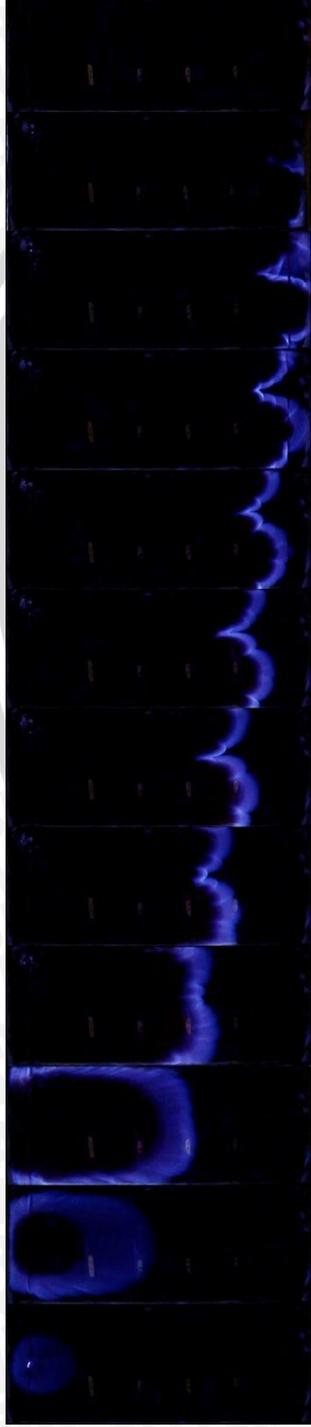


Keterangan gambar :

- a : rata-rata tebal api saat awal api sebelum pecah
- b : rata-rata tebal api saat pertengahan api sebelum pecah
- c : rata-rata tebal api saat akhir api sebelum pecah
- d : rata-rata tebal api saat awal api sesudah pecah
- e : rata-rata tebal api saat pertengahan api sesudah pecah
- f : rata-rata tebal api saat akhir api sesudah pecah

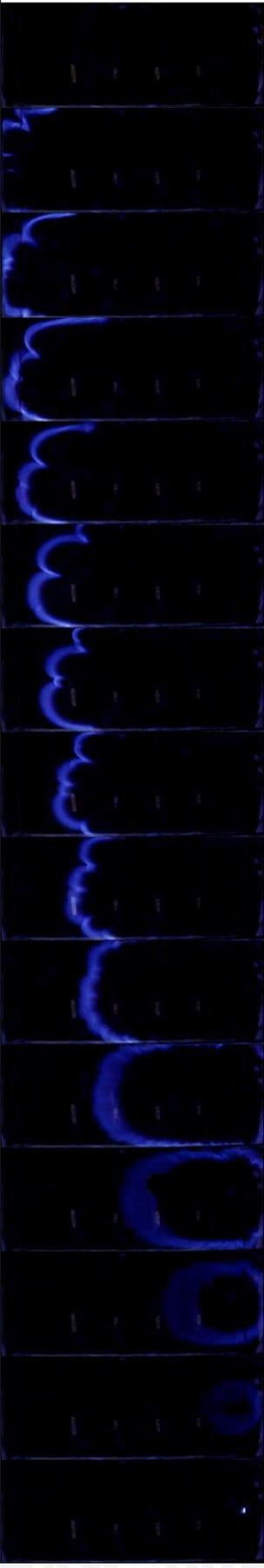
Lampiran 5. Rambatan api





Speed cut = 30 fps

(a2)



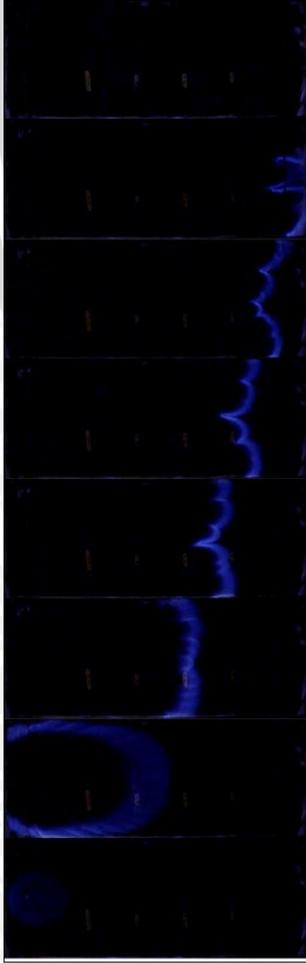
Speed cut = 30 fps

(b2)

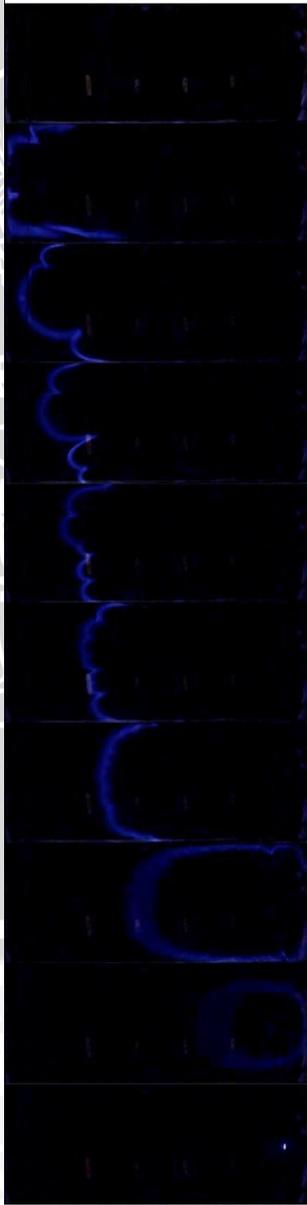




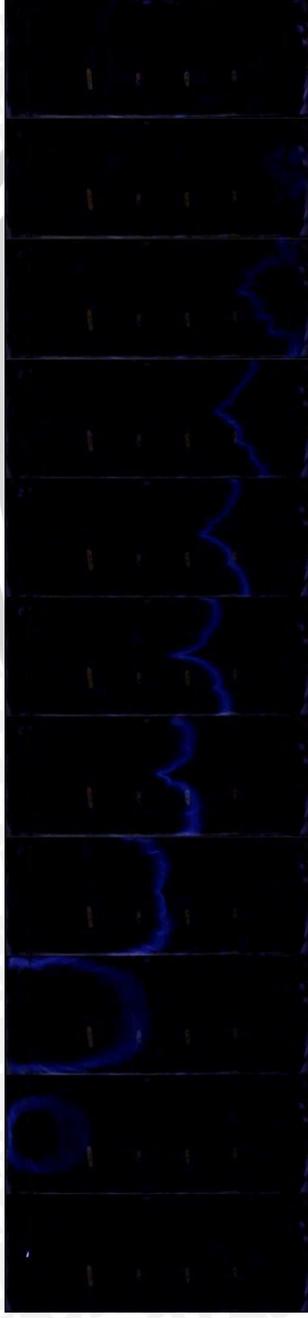
UNIVERSITAS BRAWIJAYA



Speed cut = 15 fps
(a3)

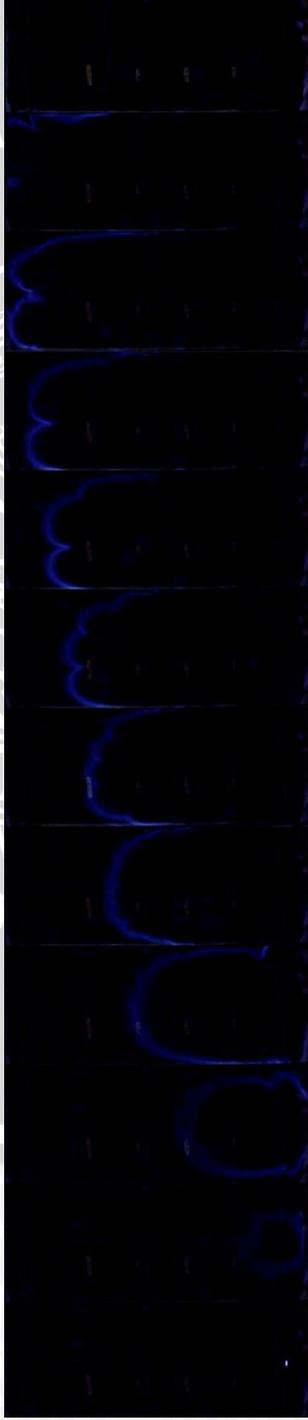


Speed cut = 15fps
(b3)



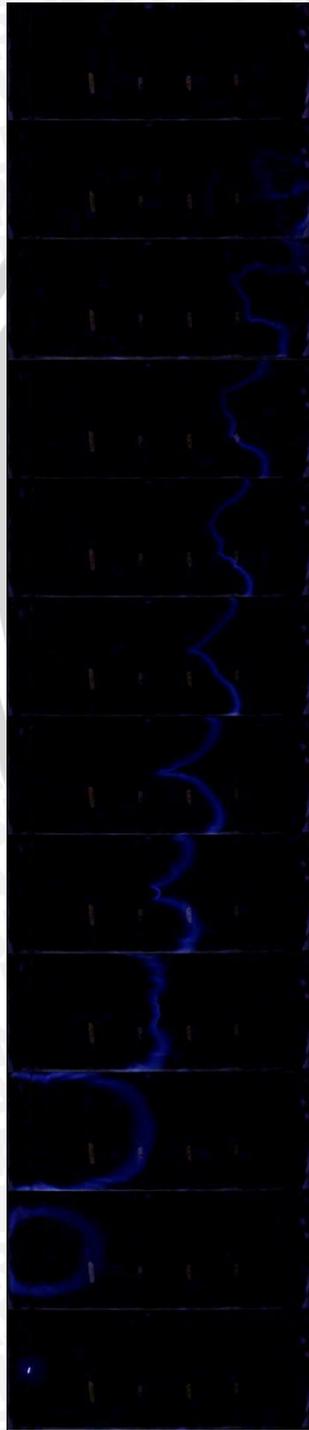
Speed cut = 15 fps

(a4)



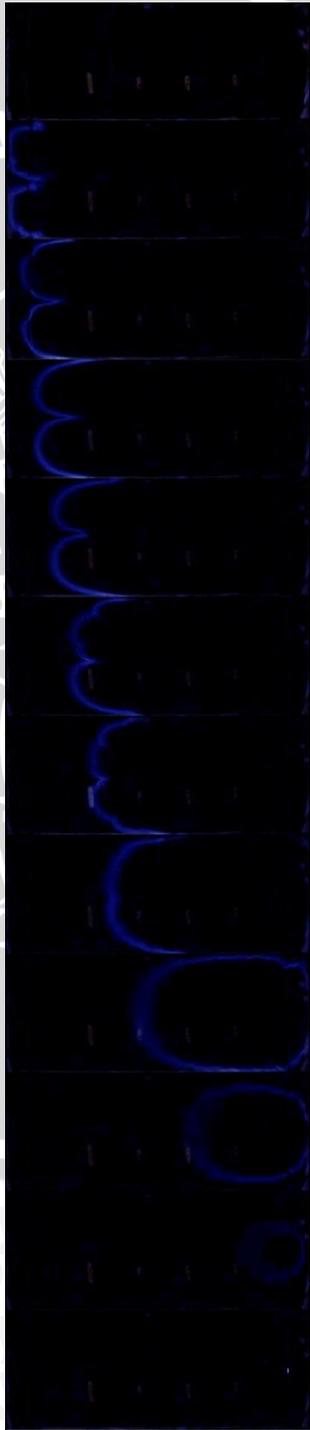
Speed cut = 15 fps

(b4)



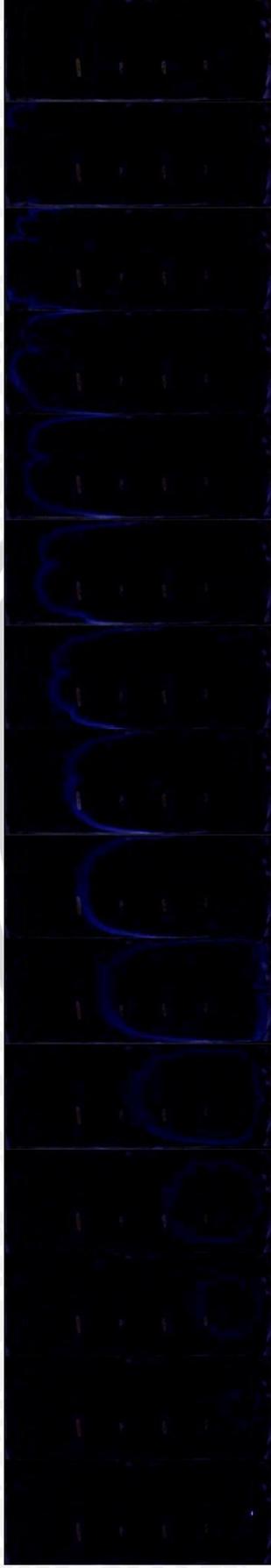
Speed cut = 15 fps

(a5)

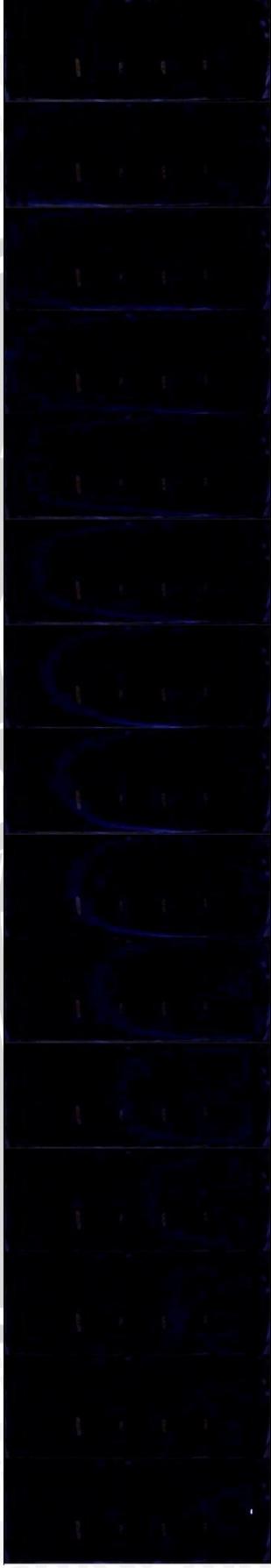


Speed cut = 15 fps

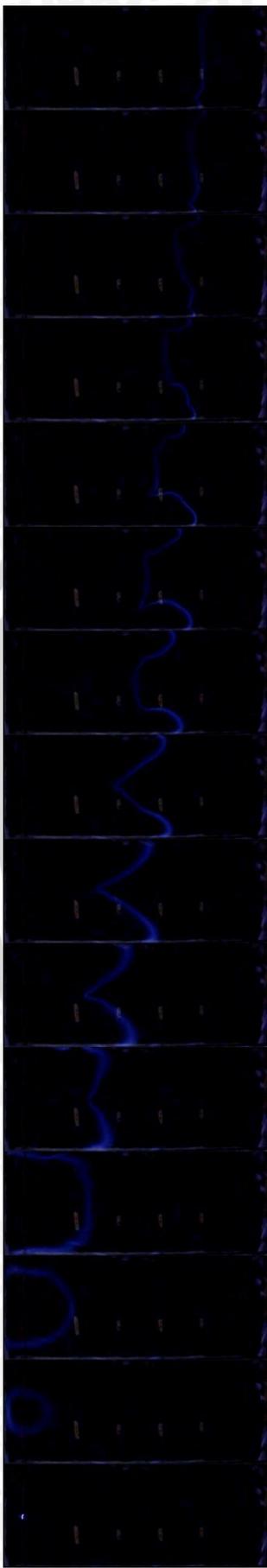
(b5)



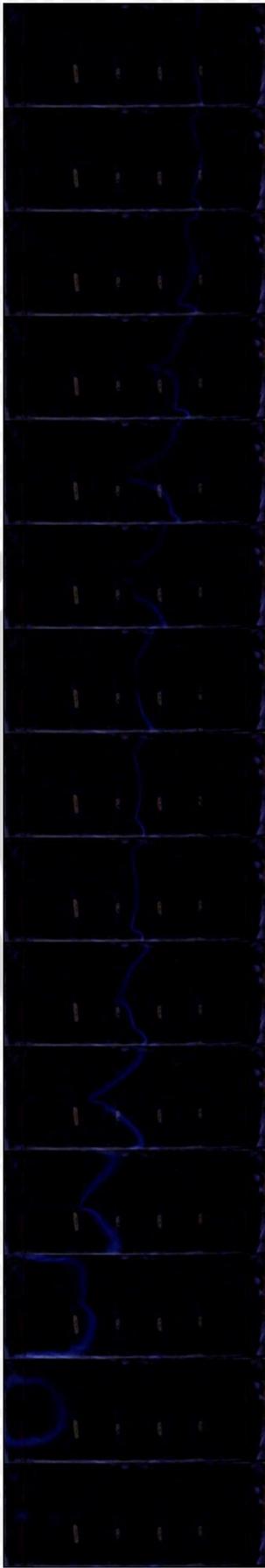
Speed cut = 15 fps
(b6)



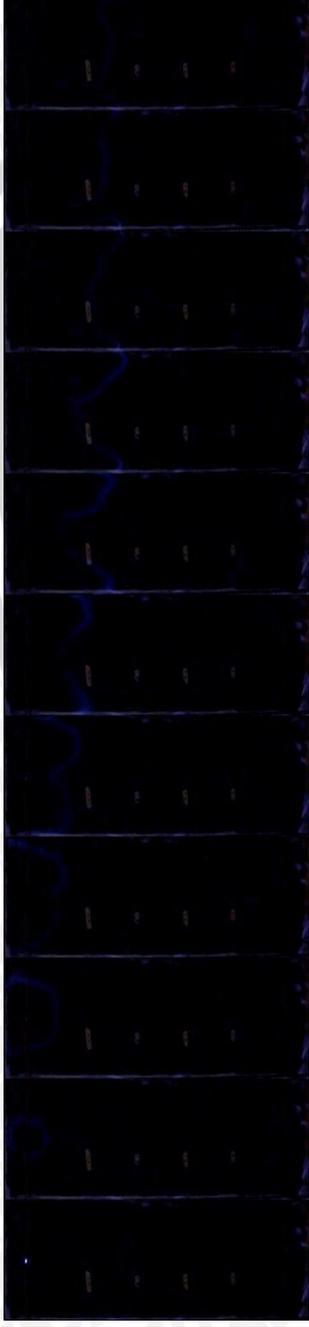
Speed cut = 15 fps
(b7)



Speed cut = 15 fps
(a6)



Speed cut = 10 fps
(a7)



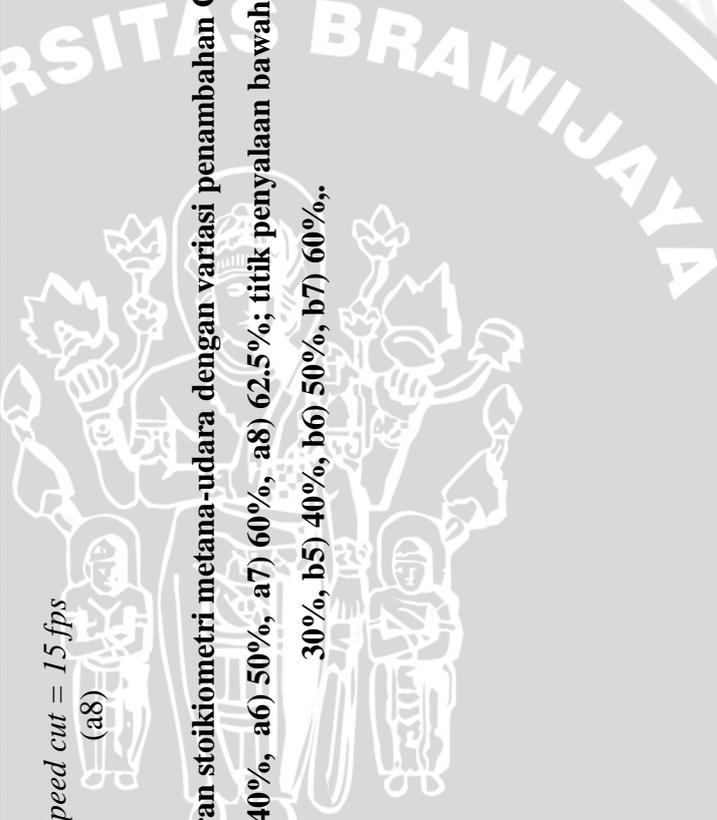
Speed cut = 15 fps

(a8)

Rambatan api pembakaran campuran stoikiometri metana-udara dengan variasi penambahan CO₂; titik penyalaan atas: a1) 0%,

a2) 10%, a3) 20%, a4) 30%, a5) 40%, a6) 50%, a7) 60%, a8) 62.5%; titik penyalaan bawah: b1) 0%, b2) 10%, b3) 20%, b4)

30%, b5) 40%, b6) 50%, b7) 60%.,



Lampiran 6. Kandungan O2 dalam udara di lingkungan sekitar pengujian

EXHAUST GAS ANALYSIS

Serial nr. 09299

OTC
 TYPE STARGAS 898
 DIAL CLASS 0
 REPORT N:
 545/DIAL/04/RM
 10/07/2004

R P M 0 [1/min]
 C O 0.000 [% vol]
 C O 2 0.00 [% vol]
 H C 0 [ppm vol]
 O 2 20.89 [% vol]
 N O ---- [ppm vol]
 CO cor ---- [% vol]
 X ---- [-]
 TEMP. --- [°C]

ENVIRONMENT CONDITIONS

Temperature 22 [°C]
 Pressure 952 [hPa]
 Rel. Humidity 72 [%RH]

DATE: 15/06/2012
 TIME : 10:54

WORKSHOP

BRAWIJAYAUNIVERSITY
 TEKNIK MESIN
 JL. MT HARVONO 167
 MALANG
 0341-587710
 0341-554291
 EXAMINER :

