

KARAKTERISTIK_PEMBAKARAN_ BAHAN_BAKAR.pdf

by

Submission date: 28-Apr-2022 11:18AM (UTC+0700)

Submission ID: 1822531425

File name: KARAKTERISTIK_PEMBAKARAN_BAHAN_BAKAR.pdf (799.23K)

Word count: 14905

Character count: 87226

KARAKTERISTIK PEMBAKARAN
**BAHAN BAKAR
TERBARUKAN**
DENGAN
Rantai Karbon Rendah

Willyanto Anggono, Teng Sutrisno, Fandi D. Suprianto
Gabriel J. Gotama, dan Ivan C. Hernando



RAJAWALI PERS
Divisi Buku Perguruan Tinggi
PT RajaGrafindo Persada
DEPOK

Perpustakaan Nasional: Katalog dalam terbitan (KDT)

Willyanto Anggono, dkk.

Karakteristik Pembakaran Bahan Bakar Terbarukan Dengan Rantai Karbon Rendah/
Willyanto Anggono, Teng Sutrisno, Fandi D. Suprianto, Gabriel J. Gotama, Ivan C. Hernando.

—Ed. 1—Cet. 1.—Depok: Rajawali Pers, 2022.

x, 70 hlm., 23 cm

Bibliografi: hlm. 61

ISBN 978-623-372-325-1

Hak cipta 2022, pada penulis

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh isi buku ini dengan cara apa pun,
termasuk dengan cara penggunaan mesin fotokopi, tanpa izin sah dari penerbit

2022.3406 RAJ

Willyanto Anggono

Teng Sutrisno

Fandi D. Suprianto

Gabriel J. Gotama

Ivan C. Hernando

**KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BAHAN BAKAR TERBARUKAN
DENGAN RANTAI KARBON RENDAH**

1

Cetakan ke-1, Maret 2022

Hak penerbitan pada PT RajaGrafindo Persada, Depok

Copy Editor : Dhea Aprilyani

Setter : Jaenudin

Desain Cover : Tim Kreatif RGP

Dicetak di Rajawali Printing

PT RAJAGRAFINDO PERSADA

Anggota IKAPI

Kantor Pusat:

Jl. Raya Leuwinanggung, No.112, Kel. Leuwinanggung, Kec. Tapos, Kota Depok 16456

Telepon : (021) 84311162

E-mail : rajapers@rajagrafindo.co.id <http://www.rajagrafindo.co.id>

Penwakilan:

Jakarta-16456 Jl. Raya Leuwinanggung No. 112, Kel. Leuwinanggung, Kec. Tapos, Depok, Telp. (021) 84311162. **Bandung**-40243, Jl. H. Kurdi Timur No. 8 Komplek Kurdi, Telp. 022-5206202. **Yogyakarta**-Perum. Pondok Soragan Indah Blok A1, Jl. Soragan, Ngestiharjo, Kasihan, Bantul, Telp. 0274-625093. **Surabaya**-60118, Jl. Rungkut Harapan Blok A No. 09, Telp. 031-8700819. **Palembang**-30137, Jl. Macan Kumbang III No. 10/4459 RT 78 Kel. Demang Lebar Daun, Telp. 0711-445062. **Pekanbaru**-28294, Perum De' Diandra Land Blok C 1 No. 1, Jl. Kartama Marpojan Damai, Telp. 0761-65807. **Medan**-20144, Jl. Eka Rasmi Gg. Eka Rossa No. 3A Blok A Komplek Johor Residence Kec. Medan Johor, Telp. 061-7871546. **Makassar**-90221, Jl. Sultan Alauddin Komp. Bumi Permata Hijau Bumi 14 Blok A14 No. 3, Telp. 0411-861618. **Banjarmasin**-70114, Jl. Bali No. 31 Rt 05, Telp. 0511-3352060. **Bali**, Jl. Imam Bonjol Gg 100/V No. 2, Denpasar Telp. (0361) 8607995. **Bandar Lampung**-35115, Perum. Bilabong Jaya Block B8 No. 3 Susunan Baru, Langkapura, Hp. 081299047094.



KATA PENGANTAR

Segala puji bagi Tuhan Yang Maha Esa, yang senantiasa memberikan kemudahan dalam menyelesaikan segala urusan hingga kami dapat menyelesaikan buku kami yang berjudul *Karakteristik Pembakaran Bahan Bakar Terbarukan dengan Rantai Karbon Rendah*. Terima kasih sedalam-dalamnya kepada seluruh tim yang telah dengan sabar dan ikhlas memberikan dukungan dalam setiap tahapan proses pembuatan buku ini.

Buku yang berada di tangan Anda ini merupakan buku yang berisi mengenai bagaimana memahami pembakaran, terutama pembakaran yang terjadi pada bahan bakar terbarukan dengan rantai karbon rendah (biogas). Buku ini juga berisi pemaparan mengenai penelitian yang telah dilakukan untuk memahami bagaimana karakteristik dari bahan bakar terbarukan dengan rantai karbon rendah. Buku ini juga akan menjadi buku bantuan bahan ajar Teknologi Pembakaran dan Bahan Bakar.

Akhirnya, kami ucapkan selamat membaca buku ini. Kami mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar kami senantiasa bisa berbenah diri.

Surabaya, 2022

Tim Penulis



DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR		v
DAFTAR ISI		vii
BAB 1	ENERGI DAN PEMBAKARAN	1
BAB 2	PROSES PEMBAKARAN DAN <i>BURNING VELOCITY</i>	7
	A. Proses Pembakaran	7
	B. <i>Burning Velocity</i>	9
BAB 3	LAMINAR BURNING VELOCITY DAN <i>FLAMMABILITY LIMIT</i>	13
	A. <i>Laminar Burning Velocity</i>	13
	B. <i>Flammability Limit</i>	18
BAB 4	BAHAN BAKAR RANTAI KARBON RENDAH (BIOGAS)	19
BAB 5	PENGUJIAN KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOGAS	25
	A. Rancangan Pengujian	25
	B. Alat dan Bahan Eksperimen	26
	C. Variabel Penelitian	27

D.	Prosedur Umum Pengambilan Data Eksperimen	28
E.	Prosedur Menentukan Perbandingan Bahan Bakar dan Udara	29
F.	Prosedur Menentukan <i>Laminar Burning Velocity</i> Bahan Bakar	30
BAB 6	KARAKTERISTIK BIOGAS KOTORAN SAPI DI DAERAH JAWA TIMUR	33
A.	Karakteristik <i>Laminar Burning Velocity</i> pada Tekanan Atmosfer	34
1.	Karakteristik Metana Murni pada Tekanan Atmosfer	34
2.	Karakteristik Biogas pada Tekanan Atmosfer	36
3.	Karakteristik Metana dengan 25% CO ₂ pada Tekanan Atmosfer	38
4.	Karakteristik Metana dengan 50% CO ₂ pada Tekanan Atmosfer	40
5.	Karakteristik Metana dengan 5% N ₂ pada Tekanan Atmosfer	42
6.	Karakteristik Metana dengan 10% N ₂ pada Tekanan Atmosfer	44
B.	Karakteristik <i>Laminar Burning Velocity</i> pada Tekanan 0,5 Atm	47
1.	Karakteristik Metana Murni pada Tekanan 0,5 Atm	47
2.	Karakteristik Biogas pada Tekanan 0,5 Atm	49
3.	Karakteristik Metana dengan 25% CO ₂ pada Tekanan 0,5 Atm	51
4.	Karakteristik Metana dengan 50% CO ₂ pada Tekanan 0,5 Atm	53
5.	Karakteristik Metana dengan 5% N ₂ pada Tekanan 0,5 Atm	53

6.	Karakteristik Metana dengan 10%N ₂ pada Tekanan 0,5 Atm	55
C.	Pengaruh <i>Inhibitors</i> (CO ₂ dan N ₂) pada <i>Laminar Burning Velocity</i> dan <i>Flammabilty Limit</i>	58
D.	Pengaruh CO ₂ pada <i>Laminar Burning Velocity</i> dan <i>Flammabilty Limit</i>	59
E.	Pengaruh N ₂ pada <i>Laminar Burning Velocity</i> dan <i>Flammabilty Limit</i>	59
F.	Pengaruh Tekanan pada <i>Laminar Burning Velocity</i> dan <i>Flammabilty Limit</i>	59
DAFTAR PUSTAKA		61
BIODATA PENULIS		67





BAB 1

ENERGI DAN PEMBAKARAN

Dalam melakukan aktivitas sehari-harinya, manusia sangat butuh energi. Energi yang didapatkan manusia biasanya berasal dari makanan yang dikonsumsi. Di era modern ini, aktivitas-aktivitas yang dilakukan oleh manusia ditopang dan dibantu oleh mesin-mesin maupun alat-alat yang juga membutuhkan energi. Energi yang digunakan untuk menggerakkan mesin-mesin ataupun alat-alat ini berasal dari berbagai sumber. Mulai dari yang didapatkan dalam proses reaksi kimia hingga proses fisika, seperti energi kinetik ataupun energi potensial. Energi sejatinya tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, namun energi dapat diubah ke bentuk lainnya. Sebagai contoh, energi potensial dari sebuah benda yang diletakkan pada sebuah bangunan. Ketika dijatuhkan, energi potensial tersebut berubah menjadi energi kinetik dalam bentuk kecepatan dari benda yang jatuh tersebut.

Namun, perlu diingat bahwa tidak setiap energi yang ada dapat secara langsung dimanfaatkan ataupun digunakan oleh manusia. Hal ini memicu terjadinya krisis energi yang merupakan ancaman nyata bagi umat manusia. Untuk itu, banyak peneliti yang mengembangkan energi terbarukan. Energi terbarukan memiliki pengertian, yaitu energi yang didapatkan dari sumber yang melimpah serta dapat terus-menerus diperbaharui. Ada berbagai macam energi terbarukan, contohnya adalah energi angin, energi ombak, energi panas bumi, energi panas matahari,

dan lain sebagainya. Energi-energi ini biasanya ditangkap dalam bentuk energi listrik terlebih dahulu, yang kemudian digunakan sebagai sumber energi bagi beberapa peralatan yang digunakan oleh manusia. Dalam penggunaannya, energi yang bersumber dari energi terbarukan ini biasanya tidak langsung digunakan, melainkan disimpan terlebih dahulu dalam sebuah penyimpanan energi listrik, contohnya adalah baterai.

Contoh dari bahan bakar tidak terbarukan adalah bahan bakar fosil. Bahan bakar ini terbentuk dari endapan fosil yang diakibatkan oleh proses kimiawi dan tekanan yang ada di dalam perut bumi, yang menghasilkan bahan bakar hidrokarbon. Dikarenakan sumber bahan bakar dari fosil inilah, yang jika penggunaannya tidak dibatasi, akan mengakibatkan kelangkaan energi yang memicu terjadinya krisis energi. Hal ini tentunya tidak diinginkan, sehingga penelitian dalam hal sumber energi terbarukan menjadi sangat penting.

Peralatan masa kini yang banyak digunakan oleh manusia memiliki sumber energi dari listrik. Listrik dapat diperoleh dari berbagai sumber, salah satu yang umum digunakan adalah melalui pembangkit listrik tenaga uap. Prinsip kerja dari pembangkit listrik tenaga uap adalah menggunakan uap yang dihasilkan dari uap air yang kemudian digunakan untuk menggerakkan turbin. Turbin tersebut akan terhubung dengan generator yang kemudian akan menggerakkan generator, sehingga generator menghasilkan listrik. Melalui proses ini, hal penting yang perlu untuk diperhatikan adalah proses dalam mengubah air menjadi uap air, yang tentunya memerlukan panas. Panas ini biasanya diperoleh dari hasil pembakaran, terutama pembakaran batu bara.

Pembakaran menyuplai sebagian besar energi dunia. Oleh karena itu, penting untuk memastikan proses pembakaran yang efisien, karena proses pembakaran dilakukan menggunakan bahan bakar yang tidak terbarukan, seperti bahan bakar fosil. Krisis energi yang diakibatkan oleh penggunaan bahan bakar fosil yang terus-menerus, memerlukan penelitian yang mendalam untuk menemukan sumber energi alternatif selain bahan bakar fosil. Salah satu sumber energi terbarukan dan ramah lingkungan yang menarik untuk dikembangkan adalah biogas.

Pembakaran dihasilkan oleh interaksi pada proses fisika dan proses kimia. Panas didapatkan melalui reaksi kimia, sedangkan proses perambatan panas menggunakan bantuan proses perpindahan panas dan dinamika fluida. Sehingga, dapat dikatakan bahwa pembakaran

merupakan turunan dari ilmu kimia, ilmu termo fisika, ilmu matematika terapan, dan ilmu mekanika fluida. Gas, padat, dan cair merupakan jenis-jenis bahan bakar menurut sifat fisiknya. Di samping itu, terdapat dua jenis nyala api yang dihasilkan dari pembakaran. Jenis pertama terjadi jika pencampuran antara oksidator dan bahan bakar pada saat sebelum proses pembakaran terjadi, di mana sering disebut dengan nyala api *premixed*. Jenis kedua adalah, nyala api difusi (*nonpremixed*) jika tidak ada pencampuran antara oksidator dan bahan bakar sebelum proses pembakaran terjadi.

Molekul bermuatan (ion) merupakan molekul aktif yang mudah bereaksi dikarenakan ketidakstabilan muatannya. Untuk mencapai stabilitas, molekul bermuatan mudah tertarik ke molekul dengan muatan berlawanan. Pasokan energi eksternal menyebabkan atom dalam molekul melepaskan satu atau lebih elektron dari kulit terluarnya, atau memutuskan ikatan rantai dalam molekul, menyebabkan atom-atom molekul terdisosiasi dan menjadi bermuatan, serta memicu reaksi pembakaran.

Reaksi dapat terjadi ketika molekul bertabrakan ke arah yang tepat untuk memutuskan dan membentuk ikatan yang tepat. Untuk mencapai stabilitas, molekul bermuatan dengan mudah tertarik ke molekul dengan muatan yang berlawanan, dan menyebabkan reaksi pembakaran yang muncul sebagai nyala api. Gas *inert* adalah gas yang akan mencegah dan menghambat terjadinya reaksi atau tumbukan molekul ke arah yang tepat untuk menghambat reaksi pembakaran, sehingga mencegah pemutusan dan pembentukan ikatan yang tepat.

Karakteristik pembakaran dari suatu bahan bakar dapat diketahui dari *laminar burning velocity* dan *flammability limit*. Nyala api terjadi ketika campuran bahan bakar dan oksidator berada di antara batas komposisi tertentu yang disebut dengan *lower flammability limit* dan *upper flammability limit*. Proses pembakaran dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tempat terjadinya pembakaran. Perlu untuk mempelajari sifat pembakaran dalam kondisi lingkungan yang berbeda, sehingga bisa didapatkan pemahaman yang luas dan komprehensif tentang pembakaran dalam kondisi lingkungan yang berbeda.

Sifat CO_2 yang merupakan komposisi terbesar dan paling dasar dari gas *inert* dalam biogas, adalah membuat efek seperti tekanan tinggi pada pembakaran, yaitu meningkatkan waktu difusi dan mengurangi *resident*

time dari reaktan atau dengan kata lain akan meningkatkan difusivitas termal dan waktu reaksi. Untuk lebih memahami bagaimana gas *inert* dalam biogas bekerja, kita dapat melakukan studi pada tekanan yang lebih rendah ketika campuran memiliki difusivitas termal yang tinggi, sehingga kita dapat mengharapkan reaksi pembakaran yang lebih cepat. Rasio bahan bakar dengan udara sebagai oksidator merupakan salah satu faktor yang harus diperhatikan selama pembakaran. Pembakaran sering gagal atau tidak sempurna karena persyaratan pembakaran tidak terpenuhi (tidak cukup oksigen atau campuran yang kurang sempurna).

Pembakaran yang tidak sempurna mengakibatkan energi yang didapatkan tidak optimal, serta muncul berbagai polutan di dalam gas buang yang berdampak buruk bagi lingkungan. Pembakaran yang merupakan reaksi kimia antara bahan bakar dan zat pengoksidasi (oksigen atau udara) akan menghasilkan panas dan cahaya. Proses pembakaran dapat terjadi ketika ada panas atau energi aktivasi yang dibutuhkan untuk mengaktifkan bahan bakar, oksidan, dan molekul bahan bakar. Pasokan energi eksternal menyebabkan atom dalam molekul melepaskan satu atau lebih elektron dari kulit terluarnya atau memutuskan ikatan rantai dalam molekul, menyebabkan atom-atom molekul terdisosiasi dan menjadi muatan yang akan memicu reaksi pembakaran. Reaksi dapat terjadi ketika molekul bertabrakan ke arah yang benar untuk memutuskan dan membentuk ikatan yang tepat. Salah satu faktor yang dapat menurunkan kecepatan pembakaran adalah CO_2 .

Mengingat bahwa bahan bakar fosil tidak terbarukan dan akhirnya akan habis. Maka, akan ada kebutuhan untuk mengembangkan bahan bakar alternatif yang bersih dan terbarukan. Untuk itu, bahan bakar biogas dari kotoran sapi merupakan kandidat bahan bakar alternatif yang tepat untuk Indonesia, karena Indonesia merupakan negara agraris dengan jumlah ternak yang cukup banyak. Bahan bakar biogas juga merupakan bahan bakar yang murah, terbarukan, dan ramah lingkungan, namun sampai saat ini penggunaan bahan bakar tersebut belum optimal. Dengan kata lain, penggunaannya terbatas sebagai bahan bakar untuk memasak di dapur saja.

Peralatan transportasi di darat, air, maupun udara, sebagian besar masih menggunakan bahan bakar minyak yang berasal dari bahan bakar fosil. Hal ini tentunya perlu untuk menjadi perhatian, mengingat bahwa bahan bakar fosil yang akan terus menipis jika digunakan secara terus-

menerus. Perlu ada komitmen serius dalam memperhatikan penggunaan bahan bakar tidak terbarukan sebagai energi yang digunakan dalam menggerakkan alat transportasi di darat, air, dan udara. Beberapa contoh bahan bakar terbarukan yang telah digunakan untuk menjadi energi penggerak bagi alat transportasi, adalah energi listrik yang bersumber dari energi matahari, minyak sawit yang digunakan sebagai bahan bakar untuk diesel, biogas, dan lain-lain.

Mengganti penggunaan bahan bakar minyak (BBM) untuk mobil dengan bahan bakar gas (BBG), akan mengurangi keluaran daya mesin yang dihasilkan. Namun, jika menggunakan peralatan tambahan berupa *blower* dan injeksi BBG, kepadatan campuran BBG dan udara yang mencapai ruang bakar, bisa lebih tinggi. Sehingga, keluaran daya mesin bisa lebih tinggi jika dibandingkan dengan saat menggunakan BBM. Bahan bakar gas yang digunakan, dapat berupa biogas yang merupakan bahan bakar yang terbarukan, sehingga jumlahnya bisa dikatakan berlimpah dan tidak akan habis.

Menanggapi kebutuhan peningkatan kualitas desain mesin karena bahan bakar fosil perlu diganti serta tantangan untuk mendapatkan kinerja mesin dan efisiensi yang lebih tinggi, dan pengurangan polutan. Maka, pengetahuan dasar tentang pembakaran di ruang bakar perlu diperluas. Hal yang paling penting untuk diketahui adalah kecepatan pembakaran laminar. Kecepatan pembakaran laminar merupakan bagian terpenting dari *flame propagation characteristics* yang secara langsung akan memengaruhi kenaikan tekanan yang terjadi di ruang bakar selama proses pembakaran.

Karbon dioksida dan nitrogen yang merupakan senyawa *inhibitor*, akan memengaruhi sifat perambatan api dalam pembakaran campuran biogas dan udara. Hal ini penting untuk dipelajari, guna mendapatkan pemahaman yang optimal tentang berbagai karakteristik dan sifat selama pembakaran. Pembakaran campuran biogas sangat penting untuk dipelajari dalam upaya untuk mendapatkan hasil efek karbon dioksida dan nitrogen, sebagai senyawa *inhibitor* terhadap sifat perambatan nyala api selama pembakaran pada campuran biogas untuk mendapatkan pembakaran yang lebih sempurna. Di mana sasaran akhir yang diharapkan adalah penggunaan biogas sebagai sumber alternatif dalam industri energi.

Selama pembakaran, berbagai reaksi kimia kompleks terjadi antara bahan bakar dan udara. Keadaan di mana pembakaran sempurna terjadi, disebut stoikiometri, dan produk pembakaran bahan bakar hidrokarbon adalah CO_2 , H_2O , dan N_2 . Oleh karena itu, pembakaran stoikiometri dapat disebut pembakaran yang di mana setiap atom bahan bakar dan oksidan bereaksi sempurna (ideal), dengan pembentukan berbagai produk pembakaran.





BAB 2

PROSES PEMBAKARAN DAN *BURNING VELOCITY*

A. Proses Pembakaran

Dalam pembakaran *premixed*, ada perambatan gelombang pembakaran yang disebut *flame*. Gelombang pembakaran merambat ke reaktan. Produk pembakaran terbentuk di belakang gelombang pembakaran. Sebagai hasil dari reaksi berantai, radikal selalu muncul di zona reaksi. Oleh karena gradien suhu api, gelombang pembakaran dapat merambat. Suhu produk lebih tinggi dari suhu bahan awal. Oleh karena itu, menurut hukum termodinamika, terjadi perpindahan panas dari produk ke reaktan. Perpindahan panas secara terus-menerus menaikkan suhu reaktan. Oleh karena itu, area yang dipanaskan sebelumnya menjadi zona reaksi. Peristiwa ini terjadi terus-menerus, hingga api menyebar ke reaktan.

Profil suhu yang dihasilkan, akan menunjukkan bahwa suhu produk lebih tinggi dari suhu reaktan, sehingga terjadi perpindahan panas. Perpindahan panas terus-menerus ini meningkatkan suhu reaktan, yang meningkatkan suhu zona pemanasan awal (*preheat zone*) dan menyebabkan pembakaran. Peristiwa yang sedang berlangsung ini menyebabkan nyala api menyebar ke arah reaktan. Selain itu, massa reaktan akan berkurang selama reaksi, mengakibatkan perbedaan konsentrasi reaktan, dan menyebabkan difusi terus-menerus pada massa

reaktan menuju zona reaksi (*reaction zone*). Ketika suhu reaktan naik, suhu di daerah zona pemanasan awal meningkat, pembakaran terjadi, dan menjadi zona reaksi. Peristiwa ini terjadi terus-menerus dan api menyebar ke arah reaktan. Kecepatan di mana api merambat ini dikenal sebagai kecepatan pembakaran.

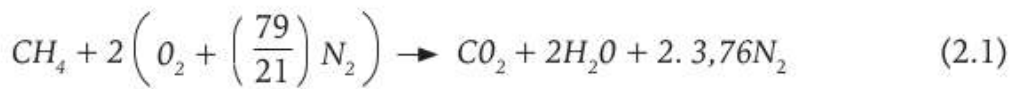
Selama proses pembakaran berlangsung, hubungan antara bahan bakar dan udara yang bertindak sebagai oksidator harus diperhatikan. Pembakaran sering kali gagal atau tidak sempurna, karena tidak memenuhi syarat pembakaran (oksigen yang digunakan tidak mencukupi atau campuran antara udara dan bahan bakar yang tidak sempurna). Pembakaran yang tidak sempurna akan memberikan energi yang diperoleh lebih sedikit, dan bahkan dapat membahayakan lingkungan karena terbentuknya berbagai polutan dalam gas buang.

Dalam reaksi pembakaran sempurna, senyawa bahan bakar akan bereaksi dengan oksidan. Produk menjadi bagian dari bahan bakar dan elemen pengoksidasi. Dalam kondisi umum, udara yang digunakan untuk mengoksidasi bahan bakar sebenarnya mengandung oksigen (O_2), nitrogen (N_2), dan sejumlah kecil gas. Jika bahan bakar bereaksi sempurna dengan oksidator dan hasil pembakarannya adalah karbon dioksida dan air. Maka, proses pembakaran dikatakan sempurna (stoikiometri). Oksidator umum yang digunakan untuk pembakaran adalah udara, yang biasanya terdiri dari 21% oksigen dan 79% nitrogen.



Gambar 2.1 Proses Pembakaran Metana dengan Udara

Gambar 2.1 adalah representasi sebuah sistem pembakaran sempurna dari gas metana dan udara (yang terdiri dari oksigen dan nitrogen). Metana (CH_4) dan udara merupakan reaktan serta karbon dioksida (CO_2), nitrogen (N_2), dan air (H_2O) merupakan produk yang dihasilkan. Berdasar kesetimbangan proses pembakaran stoikiometri antara metana sebagai bahan bakar dan udara (sebagai oksidator) dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut.



Proporsi campuran udara–bahan bakar berperan penting dalam menentukan hasil proses pembakaran, yang secara langsung akan memengaruhi reaksi pembakaran. Untuk menghitung rasio campuran udara–bahan bakar, dapat menggunakan rumus AFR (*air–fuel ratio*) pada persamaan (2.2) atau FAR (*fuel–air ratio*) pada persamaan (2.3).

$$AFR = \frac{N_{air}M_{air}}{N_{fuel}M_{fuel}} \quad (2.2)$$

$$FAR = \frac{N_{fuel}M_{fuel}}{N_{air}M_{air}} \quad (2.3)$$

Rasio ekuivalen (*equivalence ratio*) merupakan perbandingan antara rasio udara–bahan bakar stoikiometri dengan rasio udara–bahan bakar aktual ($AFR_{stoikiometri}$) bakar aktual (AFR_{aktual}). Persamaan rasio ekuivalen dapat dilihat pada persamaan (2.4).

$$\phi = \frac{AFR_{stoikiometri}}{AFR_{aktual}} \quad (2.4)$$

Di mana rasio ekuivalen kurang dari satu mengindikasikan bahwa campuran udara dan bahan bakar adalah campuran miskin (terdapat kekurangan bahan bakar), sedangkan untuk rasio ekuivalen lebih dari satu mengindikasikan bahwa campuran udara dan bahan bakar adalah campuran kaya (terdapat kelebihan bahan bakar). Untuk rasio ekuivalen sama dengan satu, mengindikasikan bahwa jumlah udara dan kebutuhan bahan bakar tepat sama (pembakaran berlangsung secara stoikiometri).

B. *Burning Velocity*

Kecepatan pembakaran (*burning velocity*) didefinisikan sebagai gelombang pembakaran (api) ke reaktan, akibat gradien suhu antara produk panas dan reaktan dingin dan perpindahan panas terjadi dari produk ke reaktan. Menurut penelitian, dasar tentang pembakaran

bahan bakar, kecepatan pembakaran laminar berubah sesuai dengan rasio ekuivalensi. Penelitian lain menunjukkan, bahwa kecepatan pembakaran laminar biogas cenderung berubah sesuai dengan rasio ekuivalen. Sementara itu, kecepatan pembakaran laminar campuran bahan bakar metana yang kaya lebih rendah, daripada kecepatan pembakaran laminar dari campuran bahan bakar metana yang miskin (*lean mixture*). Hal ini dikarenakan gas *inert* (CO_2 dan N_2) yang terdapat dalam biogas mencemari gas yang mudah terbakar, sekaligus menyerap panas dan memperlambat reaksi pembakaran.

Kecepatan pembakaran (*burning velocity*) dipengaruhi oleh beberapa faktor, termasuk di dalamnya adalah jenis gas *inert*. Gas *inert* adalah gas yang digunakan selama reaksi kimia dan bertindak sebagai penghambat reaksi. Kapasitas panas dan konduktivitas termal dari gas *inert* memiliki nilai yang berbeda, tergantung pada jenis gas *inert*. Tabel 2.1 mencantumkan kapasitas panas dari beberapa gas *inert*. Tingkat efisiensi gas *inert* dalam bahan bakar berbeda. Hal ini disebabkan oleh kehilangan panas yang lebih besar karena kapasitas panas yang lebih tinggi. Jika nilai kapasitas panas gas *inert* semakin tinggi, penyerapan panas semakin tinggi dan kehilangan panas semakin besar. Jika nilai kapasitas panas gas *inert* semakin rendah, berlaku sebaliknya terhadap penyerapan dan kehilangan panas.

Tabel 2.1 Nilai Kapasitas dan Konduktivitas Panas Beberapa Gas *Inert*

Gas <i>Inert</i>	Thermal Capacity (Cp) (J/mol K)	Thermal Conductivity (W/m K)
Ar (Argon)	20,786	17,9
He (Helium)	20,786	156,7
N ₂ (Nitrogen)	1,040	26,0
CO ₂ (Karbon Dioksida)	37,100	16,2
Ne (Neon)	20,786	49,8

Huang (2006), menyelidiki sifat-sifat api laminar dari gas alam dan hidrogen, dengan volume udara yang konstan pada suhu dan tekanan kamar. Kecepatan pembakaran laminar dan *markstein lengths* diselidiki untuk campuran berbagai proporsi gas alam, hidrogen dan udara, dan pengaruh kecepatan perpanjangan api juga dianalisis. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kecepatan pembakaran dan radius api meningkat

seiring waktu, dan terdapat korelasi linier antara radius api dan waktu pembakaran. Untuk campuran yang kaya, jari-jari api meningkat perlahan pada tahap akhir dari pengembangan nyala api. Pembakaran campuran stoikiometri menunjukkan hubungan linier dari kecepatan pembakaran yang meningkat, dengan meningkatnya proporsi hidrogen dalam campuran. Ketika *markstein lengths* berkurang, ketidakstabilan nyala api meningkat seiring dengan meningkatnya kandungan fraksi hidrogen dari campuran. Jika rasio ekuivalen terhadap fraksi hidrogen konstan, *markstein number* meningkat dan stabilitas api meningkat seiring dengan meningkatnya rasio ekuivalen.

Dalam penelitian Liao (2006), disebutkan bahwa kinerja pembakaran *methanol* dan udara *premixed* bergantung pada tekanan dan temperatur pada awal proses. Nyala api pembakaran *premixed* mengembang (melakukan pembesaran bertahap berbentuk bola) terlepas dari sumber pengapian pada awal proses ketika metanol dan udara masih tidak bergerak (masih dalam keadaan stabil). Kamera berkecepatan tinggi menganalisis proses pembakaran untuk menarik kesimpulan tentang kecepatan pembakaran.



BAB 3

LAMINAR BURNING VELOCITY DAN FLAMMABILITY LIMIT

A. Laminar Burning Velocity

Laminar burning velocity sangat penting untuk mengetahui karakteristik perambatan api selama pembakaran. *Combustion bomb* telah banyak digunakan oleh para peneliti di seluruh dunia untuk mengukur kecepatan pembakaran laminar. Tidak seperti kecepatan pembakaran turbulen, kecepatan pembakaran laminar dapat ditentukan, jika perambatan nyala api yang merupakan tanda regangan nyala api seragam, dan radius nyala api terlihat jelas.

Kecepatan pembakaran laminar dari api berbentuk bola yang bergerak secara radial, dapat dilihat dalam rekaman yang ditangkap oleh kamera digital berkecepatan tinggi dengan teknik pencitraan *Schlieren*. *File* video yang direkam pada kartu memori diubah menjadi *file* gambar setiap satuan waktu menggunakan *Phantom Movie Viewer*, sehingga gambar penyebaran nyala api dapat diperoleh sekaligus, luas dan jari-jari rambat nyala api ditentukan, sehingga diperoleh *flame radius* (radius bola api) fungsi *elapsed time*. Setelah itu, diplotlah sebuah grafik S_n . Apabila ru adalah besarnya radius dari bola api dan t adalah waktu, maka S_n dapat dituliskan.

$$S_n = \frac{d(ru)}{dt} \quad (3.1)$$

S_n merupakan fungsi dari *flame stretch rate* α . α didefinisikan dalam rumus sebagai berikut.

$$\alpha = \frac{d \ln(A)}{dt} = \frac{dA}{(A)dt} \quad (3.2)$$

Variabel A merupakan luas dari *flame* (api). Untuk kasus api *premixed* yang terpropagasi *spherically*, laju *flame stretch* dapat dituliskan dalam rumusan sebagai berikut.

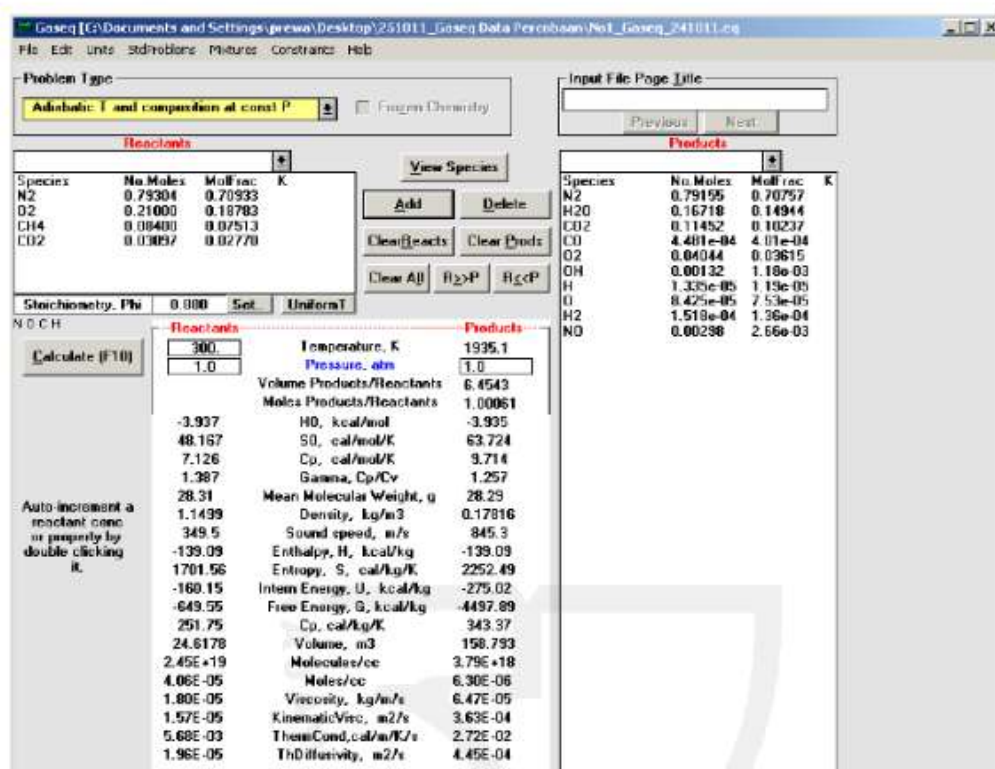
$$\alpha = \left(\frac{2}{ru} \right) \left(\frac{d(ru)}{dt} \right) = \left(\frac{2}{ru} \right) S_n \quad (3.3)$$

Melalui persamaan di atas, didapatkan S_n sebagai fungsi α . Selanjutnya, dilakukan *plotting* regresi linier dari data-data yang telah diplot ke arah $\alpha = 0$, sehingga didapatkan S_s . S_s adalah *unstretched flame speed* dan diperoleh dari melakukan intersepsi pada S_n , pada saat $\alpha = 0$ dalam grafik S_n sebagai fungsi α .

Untuk menentukan *laminar burning velocity* (ul) dari bahan bakar yang diuji, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan sebagai berikut.

$$ul = S_s \left(\frac{\rho_b}{\rho_u} \right) \quad (3.3)$$

Pada persamaan di atas, ρ_b merupakan densitas dari campuran bahan bakar–udara yang telah terbakar (*burned gas*) dan ρ_u adalah densitas dari campuran bahan bakar–udara sebelum terbakar (*unburned gas*). Dengan bantuan *gaseq software* maka bisa didapatkan nilai densitas campuran bahan bakar yang telah terbakar ($\rho_b = \text{burned gas}$) dan densitas dari campuran bahan bakar–udara sebelum terbakar ($\rho_u = \text{unburned gas}$). Contoh tampilan dari *gaseq software* dapat dilihat pada Gambar 3.1.



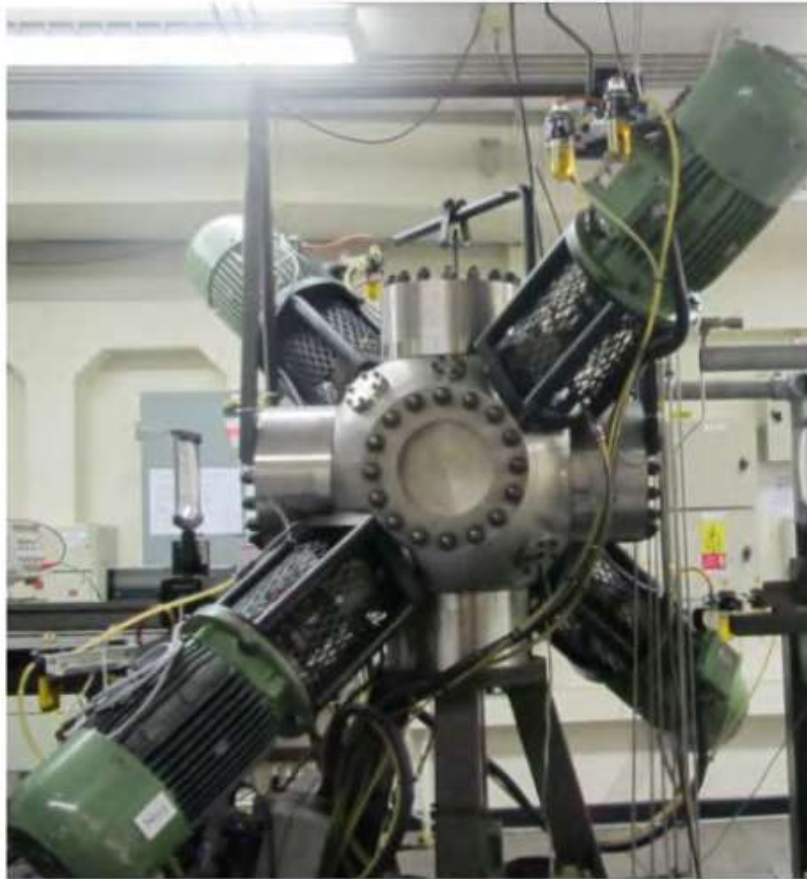
Gambar 3.1 Contoh Tampilan *Gaseq Software* untuk Mendapatkan ρ_b dan ρ_u

Combustion bomb volume konstan banyak digunakan dalam penelitian untuk mempelajari sifat pembakaran bahan bakar. Banyak peneliti menggunakan *combustion bomb* dengan volume konstan dan dimensi berbeda untuk mempelajari sifat pembakaran bahan bakar. Bradley (1998) menggunakan *combustion bomb* volume konstan untuk meneliti tentang *laminar burning velocity* pada beberapa bahan bakar (*iso-octane* dan campuran 90% *iso-octane*+10% *n-heptane*). Penelitian juga bertujuan untuk mendapatkan pengaruh temperatur dan tekanan terhadap *laminar burning velocity* dari bahan bakar tersebut. Melalui percobaan tersebut, didapati *laminar burning velocity iso-octane* dan campuran 90% *iso-octane*+10% *n-heptane* pada *step equivalence ratio* yang sama dari *stoichiometric*. Pada campuran kaya lebih tinggi dari campuran miskin. Hal ini merupakan karakteristik dari bahan bakar hidrokarbon, di mana biogas merupakan salah satu dari bahan bakar hidrokarbon juga.

Gu (2000) melakukan penelitian dengan *combustion bomb* volume konstan untuk meneliti tentang *laminar burning velocity* dan berbagai sifat pada bahan bakar metana pada berbagai *equivalence ratio*, temperatur, dan

tekanan. Sementara itu, Liao (2006) memakai *combustion bomb* volume konstan pada penelitian dengan ukuran ruang bakar dalam 108 x 108 x 135 mm. *Combustion bomb* yang digunakan dilengkapi dengan sebuah kamera REDLAKE HG-100K *high-speed CCD*, yang dioperasikan pada 5000 gambar tiap detik, dengan *Schlieren optical system* dan *spark ignition* dengan sebuah *piezoelectric absolute pressure transducer model Kistler 4075A*, serta menggunakan sebuah elemen kalibrasi Kistler 4618A.

Miao (2009) menggunakan *combustion bomb* volume konstan yang dilengkapi *ignition system*, *data acquisition system*, dan *Schlieren optical system*. *Combustion bomb* yang digunakan adalah tipe silinder dengan diameter 130 mm dan panjang 130 mm. Kedua sisi dari *combustion bomb* tersebut, dibuat transparan untuk akses kamera optik. *Flame* yang terpropagasi (*propagate*) direkam dengan menggunakan *high speed camera 10.000 pictures per second*. Serrano (2008) juga melakukan penelitian dengan menggunakan *combustion bomb* volume konstan. Pada penelitian ini, dilakukan penelitian tentang bahan bakar alternatif yang dapat diperbaharui (*renewable energy*) pada *biomass* dengan menggunakan MKII *combustion bomb* yang dapat dilihat pada Gambar 3.2, dan *high speed Photosonics Phantom* kamera digital dengan kemampuan menangkap gambar hingga 2500 frames/s seperti pada Gambar 3.3. Melalui penelitian tersebut, didapatkan *laminar burning velocity* dari bahan bakar *biomass* pada tekanan dan temperatur atmosfer pada *equivalent ratio* mulai 0,8 sampai 1,8.



Gambar 3.2 *MKII Combustion Bomb*



Gambar 3.3 *Kamera High Speed Photosonics Phantom Digital*

B. *Flammability Limit*

Glassman (2008), menyatakan bahwa *flammability limit* merupakan karakteristik penting selama pembakaran. Dalam pembakaran *premixed* yang menggunakan sumber pengapian (*ignition source*), api akan terus menyebar (*propagate*) bahkan setelah sumber pengapian dihilangkan jika rasio udara–bahan bakar memadai (berada pada zona *flammable region*). Jika rasio bahan bakar–udara terlalu rendah, api tidak akan menyebar bahkan setelah sumber pengapian dihilangkan. Batas bawah rasio bahan bakar terhadap udara (*lean mixture*) yang dapat menyebabkan perambatan api terus-menerus setelah sumber pengapian dihilangkan, disebut *lower flammability limit*. Pada perbandingan bahan bakar dan udara yang terlalu banyak, api tidak akan terpropagasi setelah *ignition source* dihilangkan. Batas perbandingan bahan bakar dan udara *rich mixture* yang dapat membuat api tetap terpropagasi (*propagate*) secara terus-menerus setelah *ignition source* dihilangkan, disebut *upper flammability limit*.

Sehingga, dapat disimpulkan bahwa *flammability limit* merupakan karakteristik penting dalam pembakaran bahan bakar dan udara. Pengapian dapat terjadi jika campuran bahan bakar dan udara memiliki komposisi tertentu. Batas komposisi campuran gas mudah terbakar dan udara (gas pengoksidasi) yang dapat terbakar, adalah *flammability limit*. *Lower flammability limit* adalah campuran bahan bakar–udara paling miskin yang dapat dinyalakan oleh campuran bahan bakar–udara. *Upper flammability limit* adalah campuran bahan bakar–udara terkaya yang dapat dinyalakan oleh campuran bahan bakar–udara.



BAB 4

BAHAN BAKAR RANTAI KARBON RENDAH (BIOGAS)

Biogas merupakan gas yang didapatkan sebagai hasil dari aktivitas fermentasi bahan organik atau yang sering dikenal dengan aktivitas anaerobik. Beberapa benda yang bisa dibuat menjadi biogas dalam aktivitas anaerobik adalah limbah rumah tangga, sampah *biodegradable* (limbah organik yang *biodegradable*), serta kotoran manusia dan hewan. Komponen penyusun utama dari biogas di antaranya adalah gas metana, gas karbon dioksida, dan gas nitrogen. Definisi lain dari biogas adalah gas yang mudah terbakar yang dihasilkan selama fermentasi bahan organik oleh bakteri anaerob (bakteri yang hidup dalam keadaan kedap udara).

Biogas yang didapatkan dari aktivitas anaerobik sangat sering dijumpai untuk mengolah limbah-limbah yang *biodegradable*. Hal ini dikarenakan melalui aktivitas anaerobik, ini bakteri patogen dapat dihancurkan. Selain itu, volume dari limbah yang dihasilkan dapat dikurangi untuk menghasilkan bahan bakar. Metana yang terkandung dalam biogas relatif lebih bersih pada saat dibakar, jika dibandingkan dengan membakar batu bara atau bahan bakar padat lainnya. Selain itu, pembakaran biogas juga dapat mengurangi emisi karbon dioksida, dikarenakan gas karbon dioksida yang dihasilkan lebih sedikit dan dapat memberikan energi yang lebih banyak.

Metana yang didapatkan dari proses anaerobik ini perlu untuk digunakan sebanyak-banyaknya, hal ini dikarenakan gas metana merupakan gas rumah kaca yang lebih berbahaya jika dibandingkan dengan gas karbon dioksida dalam perannya untuk pemanasan global. Kandungan karbon di dalam biogas tidak akan meningkatkan jumlah karbon di atmosfer, hal ini berbanding terbalik dengan pembakaran bahan bakar fosil ketika dilepaskan kembali ke atmosfer. Hal ini disebabkan karena karbon dari biogas diambil dari atmosfer melalui fotosintesis oleh tanaman.

Bakteri digunakan untuk menghasilkan gas dari bahan organik. Proses penguraian zat organik ini tanpa partisipasi oksigen disebut proses anaerobik. Gas yang dihasilkan terutama berupa metana (lebih dari 50%). Bakteri digunakan untuk mengolah bahan organik yang dikumpulkan di dalam reaktor (*digester*) dalam dua tahap. Pada langkah pertama, zat organik dipecah menjadi asam lemah oleh bakteri pembentuk asam. Bakteri ini akan memecah limbah pada tingkat hidrolisis dan pengasaman. Pada proses hidrolisis terjadi pemecahan senyawa kompleks atau rantai panjang, seperti lemak, protein, dan karbohidrat, menjadi senyawa yang lebih sederhana. Senyawa sederhana ini kemudian mengalami asidifikasi, sehingga dihasilkan pembentukan asam. Setelah bahan organik diubah menjadi asam, langkah kedua dalam proses fermentasi anaerobik adalah pembentukan gas metana oleh bakteri metanogenik, seperti *methano bacterium*, *methanococcus*, dan *methanosarcina*. Di banyak bidang, pengembangan proses pencernaan anaerobik ini telah berhasil. Proses pencernaan anaerobik ini membuat limbah-limbah menjadi dapat didaur ulang, sehingga dapat menghasilkan produk yang lebih bermanfaat. Proses fermentasi ini terjadi pada suhu sekitar 30 derajat celsius hingga 55 derajat celsius. Penggunaan proses ini telah terbukti mampu mengolah limbah-limbah yang didapatkan dari pertanian, industri, kotoran hewan atau manusia, dan *municipal solid waste* (limbah padat rumah tangga).

Manfaat utama penggunaan gas alam (metana) sebagai bahan bakar kendaraan adalah mengurangi emisi CO₂ jika dibandingkan dengan kendaraan yang berbahan bakar bensin. Di Indonesia, dengan digantikannya bahan bakar bensin dengan biogas (metana), akan mengakibatkan daya mesin yang dihasilkan menurun. Peralatan tambahan, seperti *supercharger* dan sistem injeksi bahan

bakar gas, dapat ditambahkan untuk meningkatkan tekanan dan densitas campuran bahan bakar gas dan udara yang masuk ke ruang bakar. Hal ini tentu akan meningkatkan daya yang dihasilkan oleh mesin pembakaran ke tingkat yang lebih besar daripada mesin dengan bahan bakar bensin. Nilai kalor biogas biasanya 21–24 MJ/m³. Perbandingan proporsi metana sebagai gas yang mudah terbakar dan *inhibitor* (karbon dioksida dan nitrogen) akan memengaruhi sifat pembakaran.

Dalam membangun tempat produksi biogas, diperlukan beberapa hal yang perlu dipersiapkan. Hal pertama yang perlu dipersiapkan adalah lahan yang kurang lebih seluas 16 meter persegi. Lahan ini nantinya akan digunakan sebagai tempat untuk membangun *digester* (reaktor biogas). *Digester* (reaktor biogas) merupakan bangunan utama untuk proses pembuatan biogas. *Digester* (reaktor biogas) memiliki fungsi untuk menampung biogas yang telah didapatkan dari proses anaerobik oleh bakteri-bakteri yang ada. Terdapat beberapa jenis *digester* yang umum dijumpai. Beberapa di antaranya adalah sebagai berikut.

1. *Digester* Kubah Tetap (*Fixed Dome*)

Digester ini memiliki nama lain, yaitu *digester china*. *Digester* ini pertama kali dibuat sekitar tahun 1930-an di China. *Digester* ini memiliki dua bagian utama. Bagian pertama, yaitu bagian yang berfungsi untuk tempat dari bakteri pencerna bahan baku biogas, baik bakteri yang berfungsi untuk membentuk asam, maupun bakteri yang berfungsi untuk pembentukan biogas dari asam yang telah terbentuk. Secara umum, bagian pertama ini dibuat dengan menggunakan campuran batu, semen, dan batu bata. Struktur dari bagian pertama ini harus kuat, dikarenakan akan menahan gas yang telah dihasilkan oleh bakteri agar tidak sampai terjadi kebocoran. Bagian berikutnya dari *digester* ini adalah bagian *fixed dome*. Pada bagian ini, gas-gas yang sudah tidak bergerak akan dikumpulkan. Bagian ini memiliki nama kubah, dikarenakan bentuknya yang menyerupai kubah.

Secara prinsip kerja, gas yang dihasilkan dari bagian pertama *digester* akan dialirkan ke bagian kedua dari *digester* dan akan disimpan di bagian ini. *Digester* ini memiliki kelebihan, yaitu biaya untuk pembangunannya yang tergolong murah, karena tidak menggunakan material logam dan perawatannya yang cenderung lebih mudah

dibandingkan jenis yang lain. Namun, perlu diperhatikan bahwa jenis ini mudah sekali mengalami keretakan jika terjadi gempa bumi, dan akan sulit untuk diperbaiki jika sudah terjadi kebocoran. Hal lain yang perlu menjadi perhatian adalah adanya pori-pori yang cukup besar pada *digester* ini, sehingga memungkinkan gas untuk mudah bocor.

2. *Digester* Terapung (*Floating*)

Digester ini pertama kali dibuat pada tahun 1937 di India, sehingga memiliki julukan lain, yaitu *digester* india. *Digester* ini memiliki bagian-bagian yang sama dengan yang dimiliki oleh *digester* kubah tetap. Perbedaan dari *digester* ini dengan *digester* kubah tetap adalah *digester* ini memiliki penampungan gas hasil aktivitas anaerobik berupa drum yang bergerak. Drum ini kemudian akan bergerak secara vertikal naik dan turun untuk menyimpan hasil biogas. Drum bergerak dengan posisi mengapung di atas cairan yang bergantung dari jumlah biogas yang dihasilkan.

Secara umum, keuntungan dari *digester* jenis terapung ini adalah, jumlah volume biogas yang dihasilkan dan tersimpan di dalam drum bisa langsung diketahui, dikarenakan pergerakan dari drum itu sendiri. Pergerakan drum ini juga memberikan efek lain, yaitu berupa konstannya tekanan yang ada di dalam drum. Namun, yang perlu untuk diwaspadai adalah mudahnya terjadi korosi pada drum, sehingga akan mengakibatkan usia yang lebih pendek jika dibandingkan dengan menggunakan model kubah tetap. Sehingga, bisa disimpulkan biaya yang dibutuhkan untuk *digester* ini lebih tinggi jika dibandingkan dengan biaya untuk *digester* kubah tetap.

3. *Digester* Balon

Untuk skala yang lebih kecil, seperti skala rumah tangga, jenis *digester* ini lebih umum untuk digunakan. Jenis *digester* ini menggunakan bahan dari plastik, sehingga akan lebih mudah untuk penanganannya. Di samping itu, penggunaan plastik yang ringan akan memudahkan pemindahan posisi *digester*. *Digester* ini hanya memiliki satu bagian, yang berfungsi sebagai tempat berlangsungnya proses anaerobik hingga biogas, dan sekaligus berfungsi sebagai media penyimpanan hasil biogas. *Digester* jenis ini tidak memisahkan bagian pemrosesan dan penyimpanan dengan

sekat, namun walaupun tidak dipisahkan, kedua material (bahan baku dan biogas) akan secara otomatis terpisah, dikarenakan beda massa jenisnya (bahan baku di bagian bawah dan biogas di bagian atas).

4. *Digester Fiberglass*

Digester jenis ini memiliki bahan pembuatan yang berasal dari *fiberglass* (serat fiber). *Digester* jenis ini bisa digunakan untuk skala kecil, seperti skala rumah tangga hingga skala industri. *Digester* jenis ini memiliki keunggulan yang sama dengan *digester* jenis balon, yaitu kemudahannya untuk ditangani dan kemudahannya untuk proses pemindahan posisi dari *digester* tersebut. *Digester* jenis ini juga hanya memiliki satu bagian tanpa sekat, di mana tidak ada sekat pemisah antara bagian proses anaerobik dan bagian penyimpanan hasil biogas yang telah dibuat dari aktivitas anaerobik tersebut.

Jenis *digester* yang menggunakan bahan *fiberglass* akan lebih efisien dibandingkan dengan bahan lainnya, dikarenakan bahan ini memiliki sifat kedap, kuat, serta ringan. Selain itu, dengan menggunakan bahan *fiberglass* ini, jika terjadi kerusakan berupa kebocoran, akan jauh lebih mudah untuk diperbaiki seperti sediakala.

Setelah dilakukan pemilihan model *digester*, selanjutnya yang perlu diperhatikan adalah tempat penampungan sisa lumpur yang dihasilkan oleh proses anaerobik tersebut. Nantinya material sisa ini bisa dimanfaatkan lebih lanjut untuk menjadi pupuk. Pupuk yang terbentuk pun bisa menjadi dua jenis, yaitu jenis padat dan cair. Setelah segala persiapan selesai, selanjutnya adalah melakukan langkah-langkah proses pembuatan biogas. Langkah pertama yang perlu dilakukan adalah melakukan pencampuran material mentah dengan air, dengan menggunakan perbandingan satu banding satu. Hal ini bertujuan untuk membuat material mentah memiliki bentuk seperti lumpur, yang kemudian akan memudahkan ketika akan dimasukkan ke dalam *digester*.

Langkah kedua adalah memasukkan material tadi ke dalam *digester* melalui lubang masukan yang sudah ada di *digester*. Pada saat proses pengisian ini kran gas yang tertutup harus dalam keadaan terbuka. Hal ini bertujuan agar udara yang ada di dalam *digester* volumenya bisa

digantikan oleh material mentah yang sudah dicampur dengan air. Pengisian dilakukan hingga sesuai dengan kapasitas *digester*.

Langkah ketiga adalah memasukkan *starter* (bakteri anaerob) yang banyak terjual di pasaran. Selain itu, masukkan juga rumen (lambung ternak yang memakan rumput) segar yang berasal dari rumah potong hewan. Starter yang dimasukkan berjumlah 1 liter, sedangkan rumen segar berjumlah lima karung untuk kapasitas *digester* antara 3,5 sampai 5m². Setelah itu, tutup kran gas dan biarkan proses fermentasi berjalan dengan sendirinya di dalam *digester*.

Langkah keempat adalah melakukan pembuangan gas yang telah terproduksi. Hal ini dilakukan dari hari pertama hingga kedelapan, karena gas yang dihasilkan masih belum berupa biogas, melainkan gas karbon dioksida. Mulai dari hari kesembilan hingga hari keempat belas biogas mulai terbentuk, namun masih memiliki kandungan gas karbon dioksida yang cukup tinggi, sehingga tidak akan terjadi nyala api, sehingga perlu menunggu hari keempat belas.

Langkah kelima adalah mengambil hasil biogas yang telah didapatkan dari dalam *digester* setelah hari keempat belas. Gas yang didapatkan bisa digunakan secara langsung untuk kebutuhan memasak di dapur ataupun bisa digunakan untuk kebutuhan lainnya. Biogas yang dihasilkan ini tidak akan memiliki aroma apa pun. Selain itu, perlu diingat untuk terus-menerus mengisi *digester* dengan material mentah yang berupa lumpur seperti pada langkah kesatu, untuk membuat sistem berjalan secara berkesinambungan.



BAB 5

PENGUJIAN KARAKTERISTIK PEMBAKARAN BIOGAS

A. Rancangan Pengujian

Pengujian pembakaran biogas bertujuan untuk mengetahui *laminar burning velocity* dan *flammability limit* pada biogas. Di samping itu, perlu juga mengetahui pengaruh *inhibitors* terhadap biogas, sehingga pengujian juga dilakukan pada metana murni sebagai pembandingan. *Inhibitors* yang dimaksud adalah karbon dioksida dan nitrogen yang merupakan *inhibitor* utama untuk biogas. Untuk lebih memahami sifat dari biogas, dilakukanlah pengujian pada dua kondisi tekanan yang berbeda. Tekanan pertama pada kondisi tekanan atmosfer (1 atm) kondisi lainnya adalah pada tekanan 0,5 atm.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan eksperimen. Pengujian dengan eksperimen bertujuan untuk mendapatkan *laminar burning velocity* dan *flammability limit*. Pengujian dilakukan pada metana murni dengan udara, kemudian biogas dengan udara, dilanjutkan dengan metana dengan kandungan 25% CO₂ dan udara, metana dengan kandungan 50% CO₂ dan udara, metana dengan kandungan 5% N₂ dan udara, serta metana dengan kandungan 10% N₂ dan udara. Pengujian dilakukan pada kondisi rasio ekuivalensi (*equivalence ratio*) bervariasi, mulai dari 0,6 hingga 1,4 dengan jarak masing-masing pengujian adalah 0,2. Semua pengujian dilakukan sebanyak dua kali, yaitu pada kondisi tekanan atmosfer (1

atm) dan tekanan 0,5 atm. Rangkuman dari proses pengujian dengan eksperimen dapat dilihat pada Tabel 5.1 dan pada Tabel 5.2 di bawah ini.

Tabel 5.1 Rancangan Pengujian Eksperimen pada Tekanan Atmosfer (1 Atm)

Percobaan pada Tekanan Atmosfer (1 Atm)					
Metana	Biogas	25% CO ₂ Metana	50% CO ₂ Metana	5% N ₂ Metana	10% N ₂ Metana
$\phi=0,6$	$\phi=0,6$	$\phi=0,6$	$\phi=0,6$	$\phi=0,6$	$\phi=0,6$
$\phi=0,8$	$\phi=0,8$	$\phi=0,8$	$\phi=0,8$	$\phi=0,8$	$\phi=0,8$
$\phi=1,0$	$\phi=1,0$	$\phi=1,0$	$\phi=1,0$	$\phi=1,0$	$\phi=1,0$
$\phi=1,2$	$\phi=1,2$	$\phi=1,2$	$\phi=1,2$	$\phi=1,2$	$\phi=1,2$
$\phi=1,4$	$\phi=1,4$	$\phi=1,4$	$\phi=1,4$	$\phi=1,4$	$\phi=1,4$

Tabel 5.2 Rancangan Pengujian Eksperimen pada Tekanan 0,5 Atm

Percobaan pada Tekanan 0,5 Atm					
Metana	Biogas	25% CO ₂ Metana	50% CO ₂ Metana	5% N ₂ Metana	10% N ₂ Metana
$\phi=0,6$	$\phi=0,6$	$\phi=0,6$	$\phi=0,6$	$\phi=0,6$	$\phi=0,6$
$\phi=0,8$	$\phi=0,8$	$\phi=0,8$	$\phi=0,8$	$\phi=0,8$	$\phi=0,8$
$\phi=1,0$	$\phi=1,0$	$\phi=1,0$	$\phi=1,0$	$\phi=1,0$	$\phi=1,0$
$\phi=1,2$	$\phi=1,2$	$\phi=1,2$	$\phi=1,2$	$\phi=1,2$	$\phi=1,2$
$\phi=1,4$	$\phi=1,4$	$\phi=1,4$	$\phi=1,4$	$\phi=1,4$	$\phi=1,4$

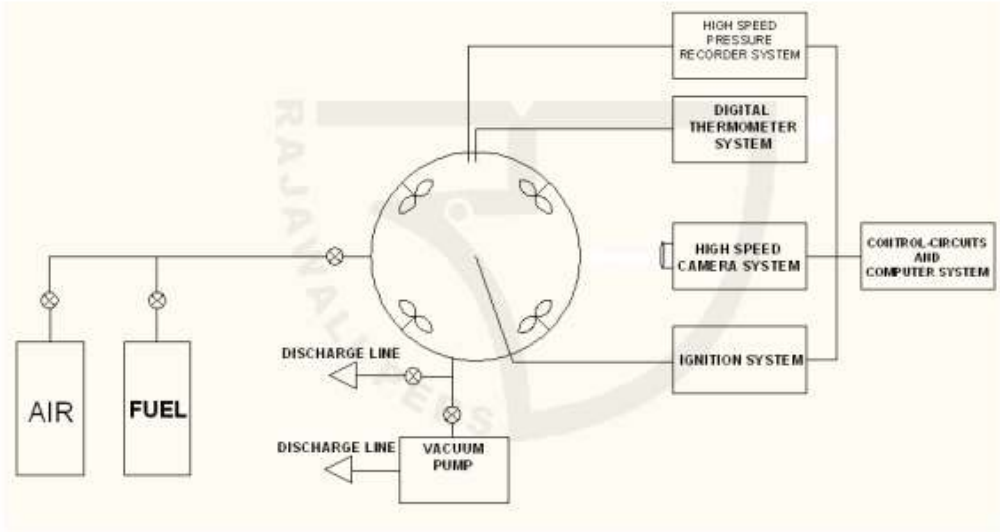
B. Alat dan Bahan Pengujian

Alat uji yang digunakan dalam penelitian ini berfungsi untuk memperoleh data penelitian. Percobaan dijalankan dengan tujuan untuk mengamati nyala api sferis bahan bakar biogas yang dibakar di dalam bejana yang berbentuk bola. MKII *fan stirred spherical combustion vessel (bomb)* adalah sebuah wadah pembakaran (bom) berbentuk bola yang dilengkapi dengan pengapian awal (pemantik api), terletak di tengah bola, mampu menciptakan inti api berbentuk bola dan dilengkapi dengan kipas untuk membuat campuran bahan bakar lebih seragam.

MKII *fan stirred spherical combustion vessel (bomb)* University of Leeds dan *High Speed camera Photosonics Phantom digital camera* adalah dua perangkat utama yang digunakan dalam eksperimen. MKII *fan stirred spherical combustion vessel (bomb)* adalah ruang bakar berbentuk bola dengan diameter 380 mm. Ruang bakar tersebut terbuat dari *stainless*

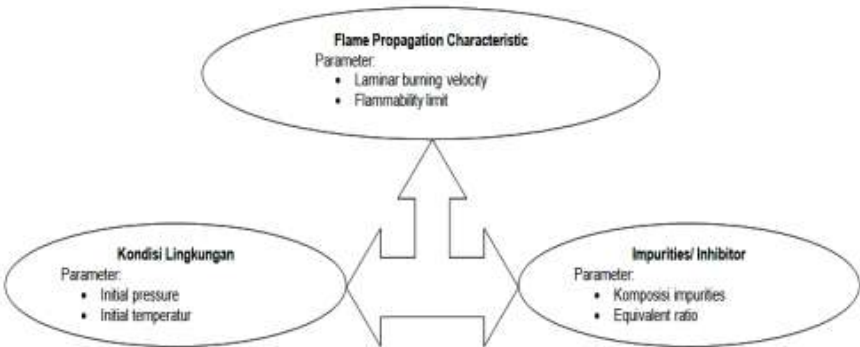
steel dengan empat kipas yang digerakkan oleh motor listrik untuk pencampuran bahan bakar dengan udara yang lebih merata dan memiliki sepasang jendela kaca bening berdiameter 150 mm yang digunakan untuk mengakses kondisi selama proses pembakaran di ruang bakar. High Speed camera Photosonics Phantom digital camera, yang dijalankan pada frame rate 2500frames/s digunakan untuk menangkap proses pembakaran.

Di samping itu, MKII fan stirred spherical combustion vessel dilengkapi dengan sensor yang dihubungkan dengan komputer untuk merekam data yang dihasilkan selama proses pembakaran yang terjadi dalam ruang bakar, seperti terlihat dalam skema diagram percobaan pada Gambar 5.1.



Gambar 5.1 Skema Diagram Percobaan Pengukuran Laminar Burning Velocity dan Flammability Limit

C. Variabel Penelitian



Gambar 5.2 Skema Hubungan Sebab Akibat

Hubungan kausal yang dikembangkan dalam rancangan pengujian dalam kaitannya dengan konsep penelitian, ditunjukkan pada Gambar 5.2. Diagram kausal dapat digunakan untuk mendefinisikan variabel-variabel yang digunakan dalam penelitian. Variabel pertama merupakan variabel bebas. Variabel ini adalah *inhibitor*. Variabel ini dinyatakan dalam parameter komposisi pengotor (murni, komposisi *intermediate*, dan komposisi maksimum) dan rasio ekuivalensi dari 0,6 hingga 1,4 dengan jarak 0,2. Variabel berikutnya merupakan variabel terikat. Karakteristik dari propagasi api merupakan variabel terikat. Variabel ini dinyatakan dalam parameter kecepatan pembakaran laminar dan *flammability limit* yang direkam dengan bantuan *schlieren cine photography* menggunakan kamera *Photosonics Phantom digital*, yang dijalankan pada *frame rate* 2500 *frames/s* dengan resolusi 768 x 768. Variabel terakhir adalah variabel kontrol. Variabel ini merupakan kondisi lingkungan yang dinyatakan dalam parameter tekanan (atmosfer dan *reduced pressure* (0,5 atm)) dan suhu awal (*room temperature*).

D. Prosedur Umum Pengambilan Data Pengujian

Secara umum, langkah-langkah untuk mengambil data eksperimen adalah sebagai berikut.

1. Membaca dengan saksama *data sheet* dari material dan aturan keamanan dari bahan bakar yang akan digunakan dalam percobaan.
2. Melakukan pengecekan terhadap suplai gas dari tangki bahan bakar dan silinder udara, serta memastikan tidak ada kebocoran pada saluran yang ada.
3. Mencatat temperatur dan tekanan di MKII *combustion bomb* sesaat sebelum dilakukan percobaan.
4. Melakukan pengisian MKII *combustion bomb* dengan bahan bakar (*fuel*) dan mencatat perubahan tekanan dari ruang bakar yang dihasilkan. Perubahan tekanan dari memasukkan bahan bakar ini adalah *partial pressure* dari bahan bakar.
5. Melakukan pengisian MKII *combustion bomb* dengan udara (*air*) dan mencatat *final pressure* yang dihasilkan.
6. Menyalakan *spark ignition*, sehingga api terpropagasi.

7. Melakukan perekaman terhadap api menggunakan kamera dan tekanan di dalam bejana.
8. Menyimpan data yang diperoleh dari percobaan ke dalam *memory card*.
9. Memproses data yang didapatkan.
10. Melakukan pengulangan prosedur di atas untuk semua kombinasi bahan bakar dan tekanan udara.

E. Prosedur Menentukan Perbandingan Bahan Bakar dan Udara

Metana (CH_4) dan udara (yang terdiri dari oksigen dan nitrogen) merupakan reaktan dan karbon dioksida (CO_2), nitrogen (N_2), dan air (H_2O) adalah produk dari proses pembakaran biogas. Berdasar kesetimbangan proses pembakaran stoikiometri antara metana (sebagai bahan bakar) dan udara (sebagai oksidator) dapat diekspresikan seperti dalam persamaan (2.1). Jika bahan bakar yang digunakan adalah biogas yang terdiri dari metana (CH_4), karbon dioksida (CO_2), dan nitrogen (N_2), sedangkan oksidator yang digunakan adalah udara. Maka, persamaan kesetimbangan proses pembakaran biogas (sebagai bahan bakar) dan udara (sebagai oksidator) dapat diekspresikan seperti dalam persamaan (5.1).

$$\phi \left(\left(\frac{A}{A} \right) \text{CH}_4 + \left(\frac{B}{A} \right) \text{CO}_2 + \left(\frac{C}{A} \right) \text{N}_2 \right) + 2 \left(\text{O}_2 + \left(\frac{79}{21} \right) \text{N}_2 \right) \rightarrow X \text{CO}_2 + Y (2\text{H}_2\text{O}) + Z \text{N}_2 \quad (5.1)$$

Di mana ϕ merupakan rasio ekuivalensi. Sementara itu, A merupakan persentase CH_4 di dalam bahan bakar, B merupakan persentase CO_2 di dalam bahan bakar, dan C merupakan persentase N_2 di dalam bahan bakar. Pada MKII *combustion bomb*, perbandingan *partial pressure* dari bahan bakar (biogas) dan *partial pressure* dari oksidator (udara) yang dipergunakan, dicari untuk menentukan rasio ekuivalensi dari bahan bakar dan udara. Perbandingan *partial pressure* dari bahan bakar dan *partial pressure* dari oksidator (udara) yang digunakan adalah sama dengan perbandingan volume bahan bakar dan udara, sehingga dapat dituliskan dalam persamaan (5.2).

$$X_{fuel} = \frac{\phi \left(\frac{A}{A} + \frac{B}{A} + \frac{C}{A} \right)}{\phi \left(\frac{A}{A} + \frac{B}{A} + \frac{C}{A} \right) + 2 \left(1 + \frac{79}{21} \right)} \quad (5.2)$$

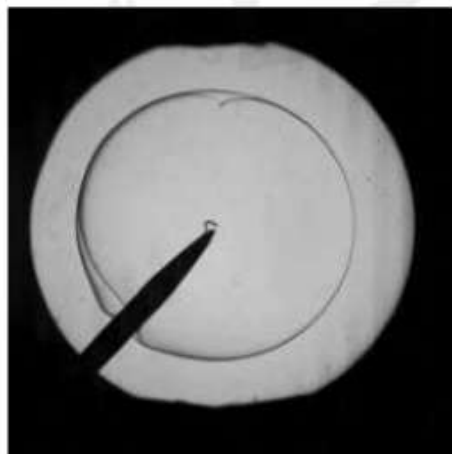
$$X_{air} = 1 - X_{fuel} \quad (5.3)$$

Di mana ϕ merupakan rasio ekuivalensi, X_{fuel} merupakan *partial pressure* dari bahan bakar, dan X_{air} adalah *partial pressure* dari udara.

F. Prosedur Menentukan *Laminar Burning Velocity* Bahan Bakar

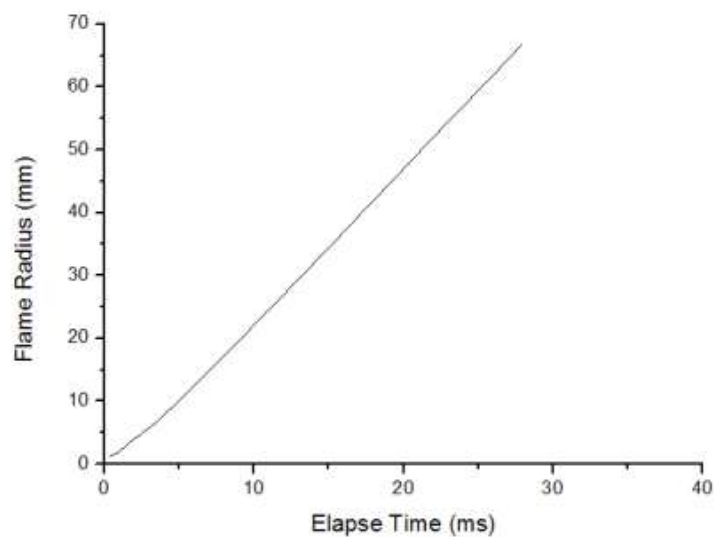
Berikut ini merupakan prosedur bagaimana menentukan *laminar burning velocity* dari bahan bakar yang sedang diuji pada MKII *combustion bomb*.

1. Mengubah *file* video yang telah direkam dalam *memory card* menjadi *file* gambar pada setiap satuan waktu dengan menggunakan bantuan *Phantom cine viewer 6.0.6*, sehingga didapatkan gambar *flame propagation* setiap satuan waktu seperti yang terlihat pada Gambar 5.3.



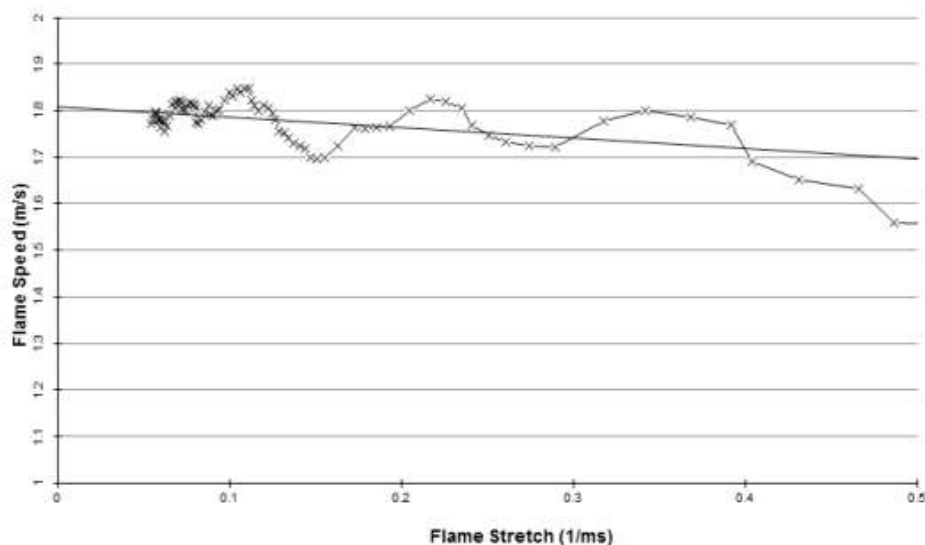
Gambar 5.3 Contoh Hasil *Flame Propagation* dalam Gambar dari *File* Video

2. Menentukan radius api dari Gambar 5.3. Kemudian dilanjutkan dengan menentukan luasnya, sehingga didapatkan hasil *flame radius* fungsi *elapsed time* seperti contoh pada Gambar 5.4.



Gambar 5.4 Contoh *Flame Radius Fungsi Elapsed Time*

3. Membuat grafik S_n ($S_n = dr/dt$) sebagai fungsi dari *flame stretch rate* (α) dengan menggunakan persamaan 3.5. Selanjutnya, dilakukan *plotting* regresi linier dari data-data yang telah didapatkan, yang kemudian diplot ke titik di mana $\alpha = 0$, sehingga didapatkan S_s . S_s adalah *unstretched flame speed* dan diperoleh dari melakukan intersepsi pada S_n , pada saat $\alpha = 0$ dalam grafik S_n sebagai fungsi α , seperti terlihat pada Gambar 5.5.



Gambar 5.5 Contoh Hasil *Flame Speed Fungsi Flame Stretch Rate*

4. Menentukan *laminar burning velocity* (u_l) dari bahan bakar yang diuji dengan menggunakan persamaan 3.5. Nilai dari densitas campuran

bahan bakar yang telah terbakar ($\rho_b = \text{burned gas}$) dan densitas dari campuran bahan bakar–udara sebelum terbakar ($\rho_u = \text{unburned gas}$) dapat diperoleh dari *Gaseq software*.





BAB 6

KARAKTERISTIK BIOGAS KOTORAN SAPI DI DAERAH JAWA TIMUR

Sapi merupakan salah satu hewan yang cukup banyak di Indonesia, terutama di Jawa Timur. Untuk itu, ada peluang yang cukup baik untuk memanfaatkan biogas dari kotoran sapi. Berdasar uji komposisi kotoran sapi di salah satu daerah di Jawa Timur, diperoleh biogas kotoran sapi mengandung 66.4% metana, 30,6% karbon dioksida, dan 3% nitrogen. Karbon dioksida dan nitrogen bertindak sebagai *inhibitor*.

Dengan menggunakan bantuan persamaan (5.2) dan (5.3) akan didapati nilai dari *partial pressure* untuk metana murni, biogas, metana dengan 25% CO₂, metana dengan 50% CO₂, metana dengan 5% N₂, dan metana dengan 10% N₂. Nilai dari masing-masing *partial pressure* dapat dilihat pada Tabel 6.1 di bawah ini.

Tabel 6.1 Nilai *Partial Pressure* pada Berbagai Campuran Bahan Bakar untuk Campuran Stoikiometri

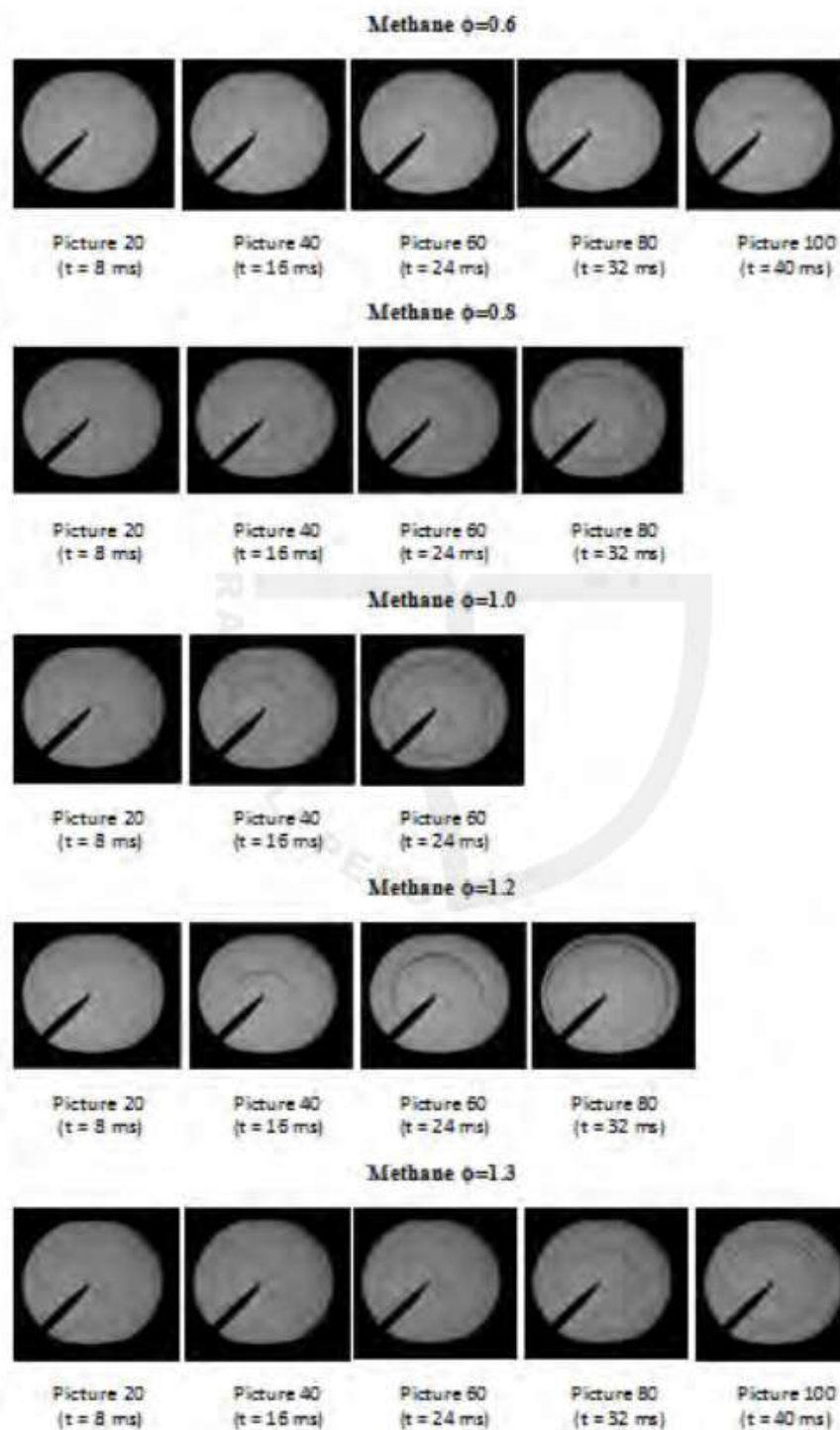
Bahan Bakar	X_{fuel}	X_{air}
Metana (CH ₄) murni	0.095	0.905
Biogas 30,6% CO ₂ , 3% N ₂ , dan 66,4% CH ₄	0.137	0.863
Metana dengan 25% CO ₂	0.123	0.877
Metana dengan 50% CO ₂	0.174	0.826
Metana dengan 5% N ₂	0.100	0.900
Metana dengan 10% N ₂	0.105	0.895

A. Karakteristik *Laminar Burning Velocity* pada Tekanan Atmosfer

1. Karakteristik Metana Murni pada Tekanan Atmosfer

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 1,4 tidak mengalami propagasi, sedangkan pada rasio ekuivalensi 0,6 masih terjadi propagasi. Untuk itu, dilakukanlah pengujian tambahan untuk mencari *lower flammability limit* dan memastikan nilai *upper flammability limit* dengan menambahkan pengujian pada rasio ekuivalensi 0,5 dan 1,3. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,5 tidak terjadi propagasi dan pada 1,3 terjadi propagasi.

Pada rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi, dilakukan perekaman dan kemudian diubah menjadi file-file gambar. Hasil gambar untuk pembakaran metana murni pada rasio ekuivalensi 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; dan 1,3; dapat dilihat pada Gambar 6.1 berikut.



Gambar 6.1 Propagasi Api pada Berbagai Rasio Ekuivalensi untuk Metana Murni pada Tekanan Atmosfer

Melalui gambar di atas, kemudian bisa dicari grafik *flame radius* fungsi waktu. Dari grafik ini kemudian bisa didapatkan nilai dari *laminar*

burning velocity sesuai dengan langkah-langkah yang sudah dilakukan pada bab 5. Melalui perhitungan tersebut, didapati nilai *laminar burning velocity* pada masing-masing rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dapat dilihat pada Tabel 6.2.

Tabel 6.2 *Laminar Burning Velocity* Metana Murni pada Tekanan Atmosfer

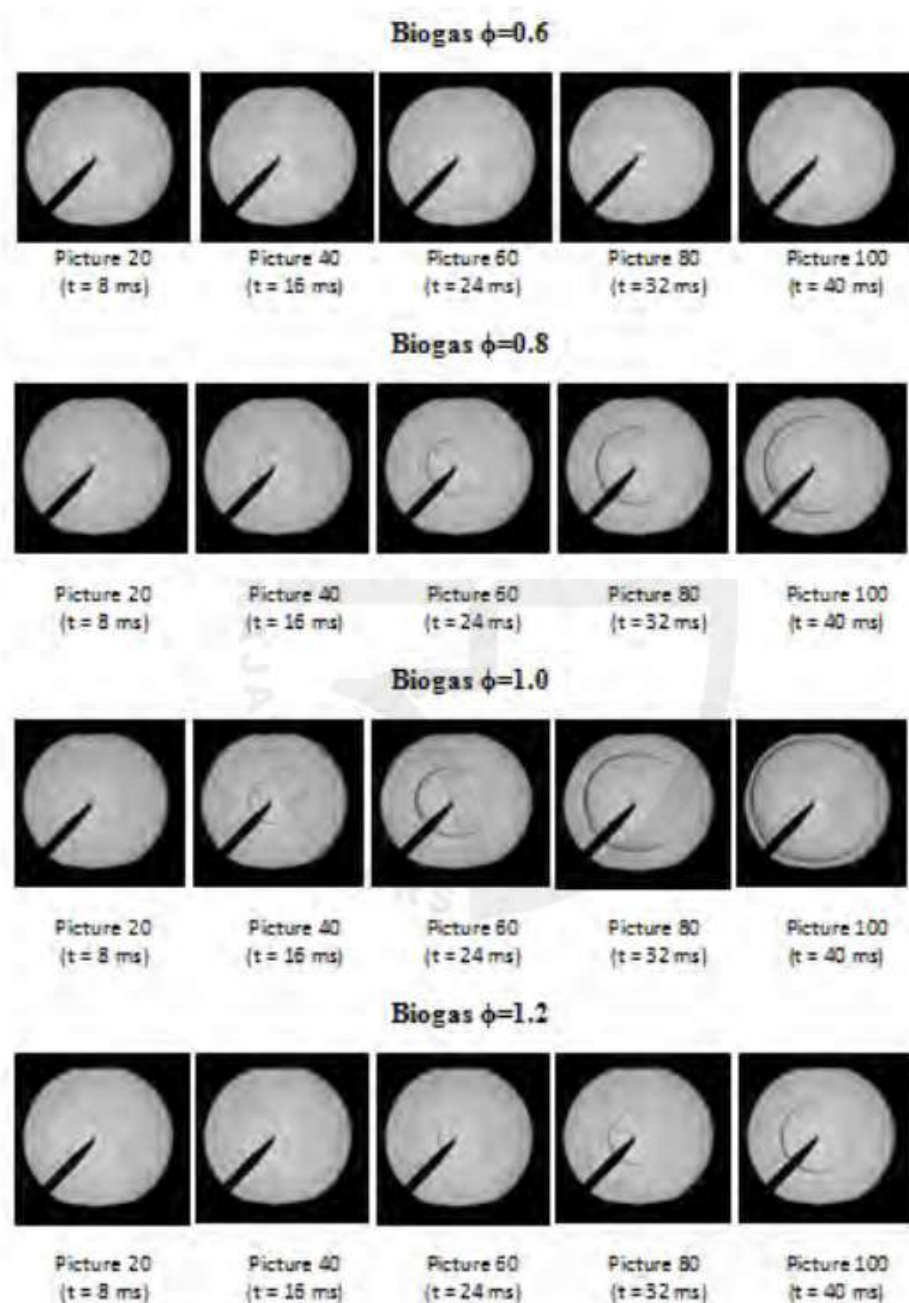
Rasio Ekuivalensi	Kecepatan Pembakaran Laminar (m/s)
0,6	0,095
0,8	0,275
1,0	0,353
1,2	0,308
1,3	0,202

Metana murni memiliki *flammable region* pada rasio ekuivalensi 0,6 hingga 1,3. Rasio ekuivalensi kurang dari 0,6 tidak terjadi propagasi api dan rasio ekuivalensi lebih dari 1,3 tidak terjadi propagasi api. Melalui data di atas, dapat dilihat bahwa pada campuran kaya akan memiliki *laminar burning velocity* yang lebih tinggi daripada pada campuran miskin. Hal ini sejalan dengan berbagai penelitian yang menjelaskan mengenai karakteristik dari bahan bakar hidrokarbon, di mana *laminar burning velocity* pada campuran kaya lebih tinggi jika dibandingkan dengan campuran miskin.

2. Karakteristik Biogas pada Tekanan Atmosfer

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 1,4 telah tidak mengalami propagasi, sedangkan pada rasio ekuivalensi 0,6 masih terjadi propagasi. Untuk itu, dilakukanlah pengujian tambahan untuk mencari *lower flammability limit* dan memastikan nilai *upper flammability limit* dengan menambahkan pengujian pada rasio ekuivalensi 0,5 dan 1,3. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,5 dan 1,3 tidak terjadi propagasi.

Pada rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dilakukan perekaman dan kemudian diubah menjadi *file-file* gambar. Hasil gambar untuk pembakaran biogas pada rasio ekuivalensi 0,6; 0,8; 1,0; dan 1,2; dapat dilihat pada Gambar 6.2 berikut.



Gambar 6.2 Propagasi Api pada Berbagai Rasio Ekuivalensi untuk Biogas pada Tekanan Atmosfer

Melalui gambar di atas, kemudian bisa dicari grafik *flame radius* fungsi waktu. Dari grafik ini kemudian bisa didapatkan nilai dari *laminar burning velocity* sesuai dengan langkah-langkah yang sudah dilakukan pada bab 5. Melalui perhitungan tersebut, didapati nilai *laminar burning velocity* pada masing-masing rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi, yang dapat dilihat pada Tabel 6.3.

Tabel 6.3 *Laminar Burning Velocity* Biogas pada Tekanan Atmosfer

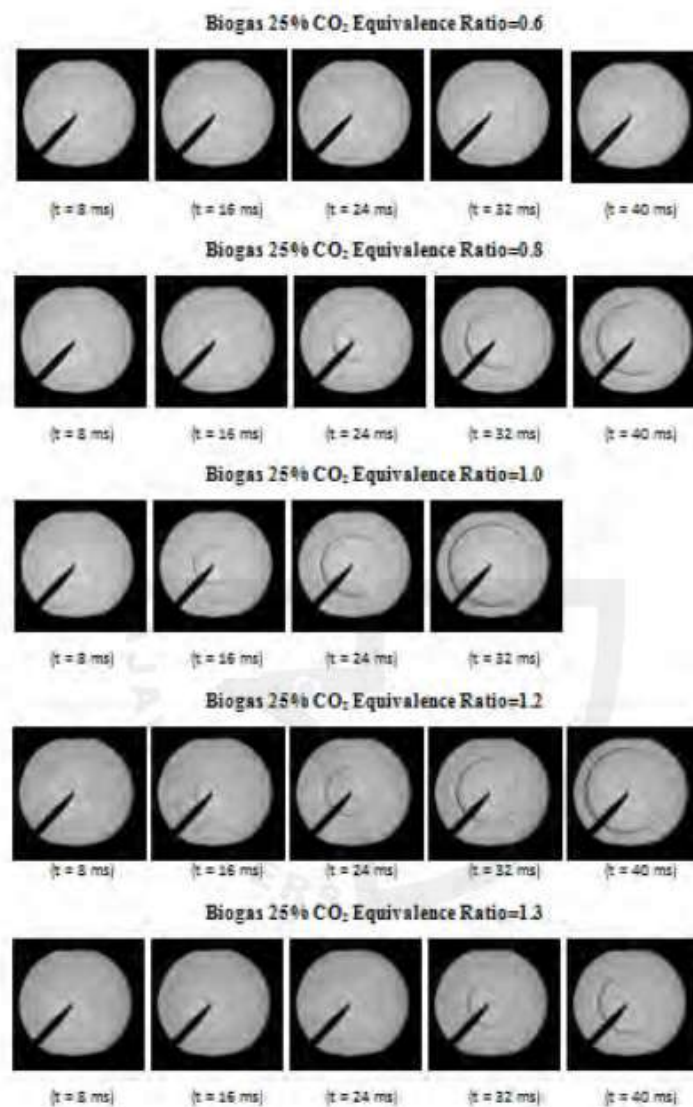
Rasio Ekuivalensi	Kecepatan Pembakaran Laminar (m/s)
0,6	0,074
0,8	0,209
1,0	0,264
1,2	0,186

Biogas memiliki *flammable region* pada rasio ekuivalensi 0,6 hingga 1,2. Rasio ekuivalensi kurang dari 0,6 tidak terjadi propagasi api dan rasio ekuivalensi lebih dari 1,2 tidak terjadi propagasi api. Melalui data di atas, dapat dilihat bahwa pada campuran kaya akan memiliki *laminar burning velocity* yang lebih rendah daripada pada campuran miskin. Hal ini disebabkan karena adanya pengotor berupa nitrogen dan karbon dioksida.

3. Karakteristik Metana dengan 25% CO₂ pada Tekanan Atmosfer

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 1,4 tidak mengalami propagasi, sedangkan pada rasio ekuivalensi 0,6 masih terjadi propagasi. Untuk itu, dilakukanlah pengujian tambahan untuk mencari *lower flammability limit* dan memastikan nilai *upper flammability limit* dengan menambahkan pengujian pada rasio ekuivalensi 0,5 dan 1,3. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,5 tidak terjadi propagasi dan pada 1,3 terjadi propagasi.

Pada rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dilakukan perekaman dan kemudian diubah menjadi *file-file* gambar. Hasil gambar untuk pembakaran metana dengan 25% CO₂ pada rasio ekuivalensi 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; dan 1,3; dapat dilihat pada Gambar 6.3 di bawah ini.



Gambar 6.3 Propagasi Api pada Berbagai Rasio Ekuivalensi untuk Metana dengan 25% CO₂ pada Tekanan Atmosfer

Melalui gambar di atas, kemudian bisa dicari grafik *flame radius* fungsi waktu. Dari grafik ini kemudian bisa didapatkan nilai dari *laminar burning velocity* sesuai dengan langkah-langkah yang sudah dilakukan pada bab 5. Melalui perhitungan tersebut, didapati nilai *laminar burning velocity* pada masing-masing rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi, yang dapat dilihat pada Tabel 6.4.

Tabel 6.4 *Laminar Burning Velocity* Metana dengan 25% CO₂ pada Tekanan Atmosfer

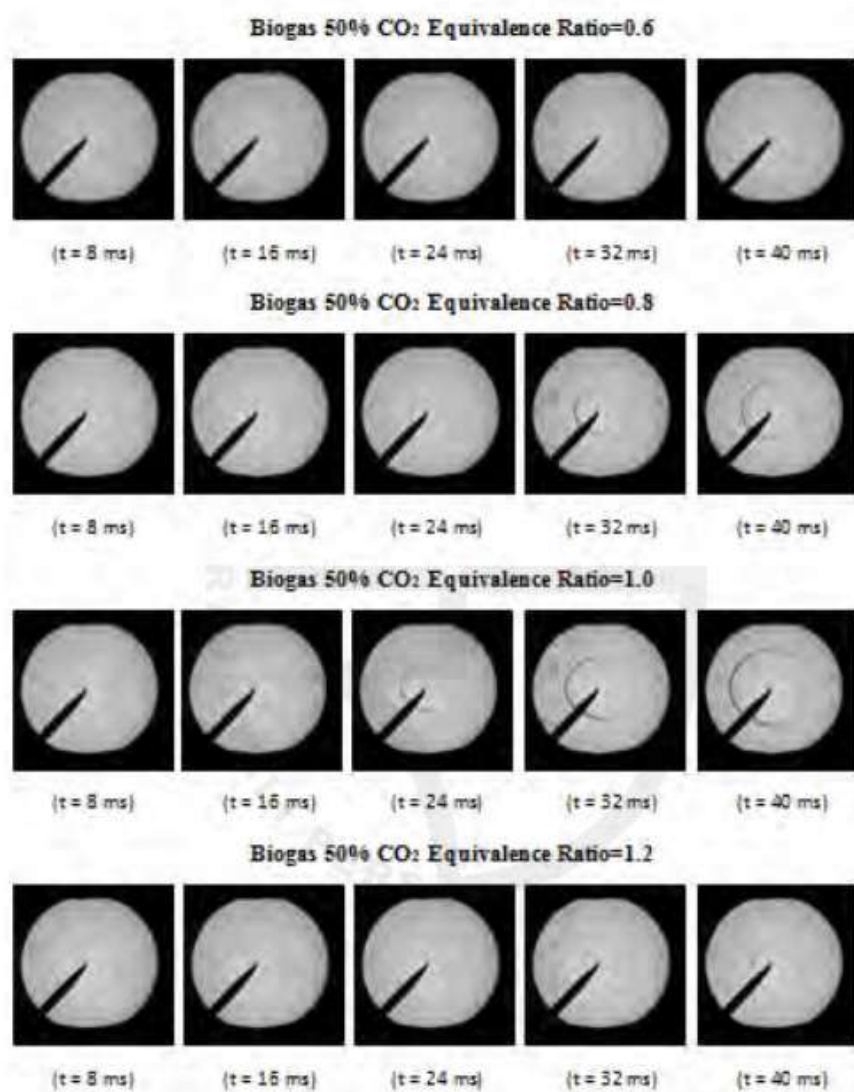
Rasio Ekuivalensi	Kecepatan Pembakaran Laminar (m/s)
0,6	0,080
0,8	0,229
1,0	0,289
1,2	0,236
1,3	0,144

Metana dengan 25% CO₂ memiliki *flammable region* pada rasio ekuivalensi 0,6 hingga 1,3. Rasio ekuivalensi kurang dari 0,6 tidak terjadi propagasi api dan rasio ekuivalensi lebih dari 1,3 tidak terjadi propagasi api. Terlihat bahwa terjadi penurunan nilai *laminar burning velocity* akibat pengotor berupa karbon dioksida. Melalui data di atas, dapat dilihat bahwa pada campuran kaya akan memiliki *laminar burning velocity* yang hampir sama dengan campuran miskin. Hal ini menunjukkan karbon dioksida lebih berpengaruh pada campuran kaya.

4. Karakteristik Metana dengan 50% CO₂ pada Tekanan Atmosfer

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 1,4 telah tidak mengalami propagasi, sedangkan pada rasio ekuivalensi 0,6 masih terjadi propagasi. Untuk itu, dilakukanlah pengujian tambahan untuk mencari *lower flammability limit* dan memastikan nilai *upper flammability limit* dengan menambahkan pengujian pada rasio ekuivalensi 0,5 dan 1,3. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,5 dan 1,3 tidak terjadi propagasi.

Pada rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dilakukan perekaman dan kemudian diubah menjadi *file-file* gambar. Hasil gambar untuk pembakaran metana dengan 50% CO₂ pada rasio ekuivalensi 0,6; 0,8; 1,0; dan 1,2; dapat dilihat pada Gambar 6.4 berikut.



Gambar 6.4 Propagasi Api pada Berbagai Rasio Ekuivalensi untuk Metana dengan 50% CO₂ pada Tekanan Atmosfer

Melalui gambar di atas, kemudian bisa dicari grafik *flame radius* fungsi waktu. Dari grafik ini kemudian bisa didapatkan nilai dari *laminar burning velocity* sesuai dengan langkah-langkah yang sudah dilakukan pada bab 5. Melalui perhitungan tersebut, didapati nilai *laminar burning velocity* pada masing-masing rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dapat dilihat pada Tabel 6.5.

Tabel 6.5 *Laminar Burning Velocity* Metana dengan 50% CO₂ pada Tekanan Atmosfer

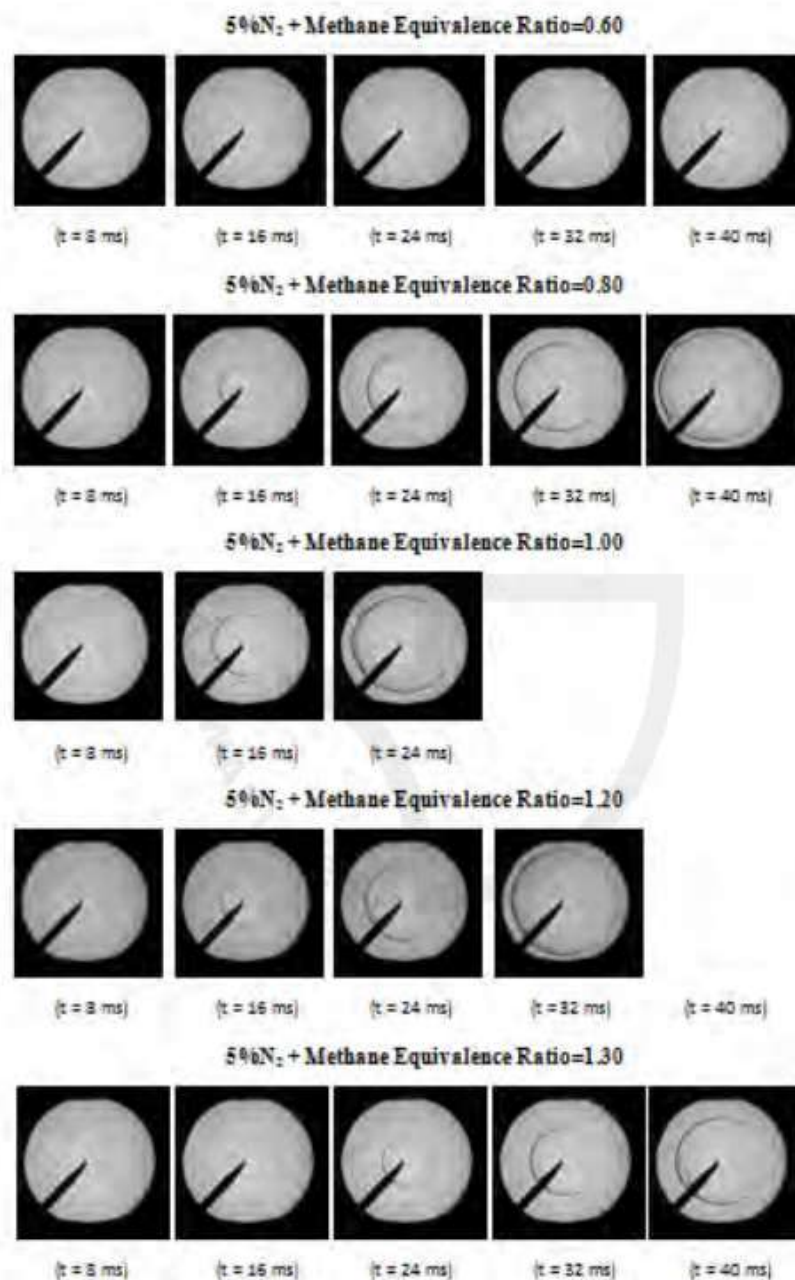
Rasio Ekuivalensi	Kecepatan Pembakaran Laminar (m/s)
0,6	0,061
0,8	0,154
1,0	0,189
1,2	0,117

Metana dengan 50% CO₂ memiliki *flammable region* pada rasio ekuivalensi 0,6 hingga 1,2. Rasio ekuivalensi kurang dari 0,6 tidak terjadi propagasi api dan rasio ekuivalensi lebih dari 1,2 tidak terjadi propagasi api. Terlihat bahwa terjadi penurunan nilai *laminar burning velocity* akibat pengotor berupa karbon dioksida. Melalui data di atas, dapat dilihat bahwa pada campuran kaya akan memiliki *laminar burning velocity* lebih rendah dari campuran miskin. Hal ini menunjukkan karbon dioksida lebih berpengaruh pada campuran kaya. Selain itu, pengotor karbon dioksida membuat karakteristik pembakaran tidak mengikuti karakteristik pembakaran hidrokarbon.

5. Karakteristik Metana dengan 5% N₂ pada Tekanan Atmosfer

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 1,4 telah tidak mengalami propagasi, sedangkan pada rasio ekuivalensi 0,6 masih terjadi propagasi. Untuk itu, dilakukanlah pengujian tambahan untuk mencari *lower flammability limit* dan memastikan nilai *upper flammability limit* dengan menambahkan pengujian pada rasio ekuivalensi 0,5 dan 1,3. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,5 tidak terjadi propagasi dan pada 1,3 terjadi propagasi.

Pada rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dilakukan perekaman, dan kemudian diubah menjadi *file-file* gambar. Hasil gambar untuk pembakaran metana dengan 5% N₂ pada rasio ekuivalensi 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; dan 1,3; dapat dilihat pada Gambar 6.5 berikut.



Gambar 6.5 Propagasi Api pada Berbagai Rasio Ekuivalensi untuk Metana dengan 5% N₂ pada Tekanan Atmosfer

Melalui gambar di atas, kemudian bisa dicari grafik *flame radius* fungsi waktu. Dari grafik ini kemudian bisa didapatkan nilai dari *laminar burning velocity* sesuai dengan langkah-langkah yang sudah dilakukan pada bab 5. Melalui perhitungan tersebut, didapati nilai *laminar burning velocity* pada masing-masing rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi, yang dapat dilihat pada Tabel 6.6.

Tabel 6.6 *Laminar Burning Velocity* Metana dengan 5% N₂ pada Tekanan Atmosfer

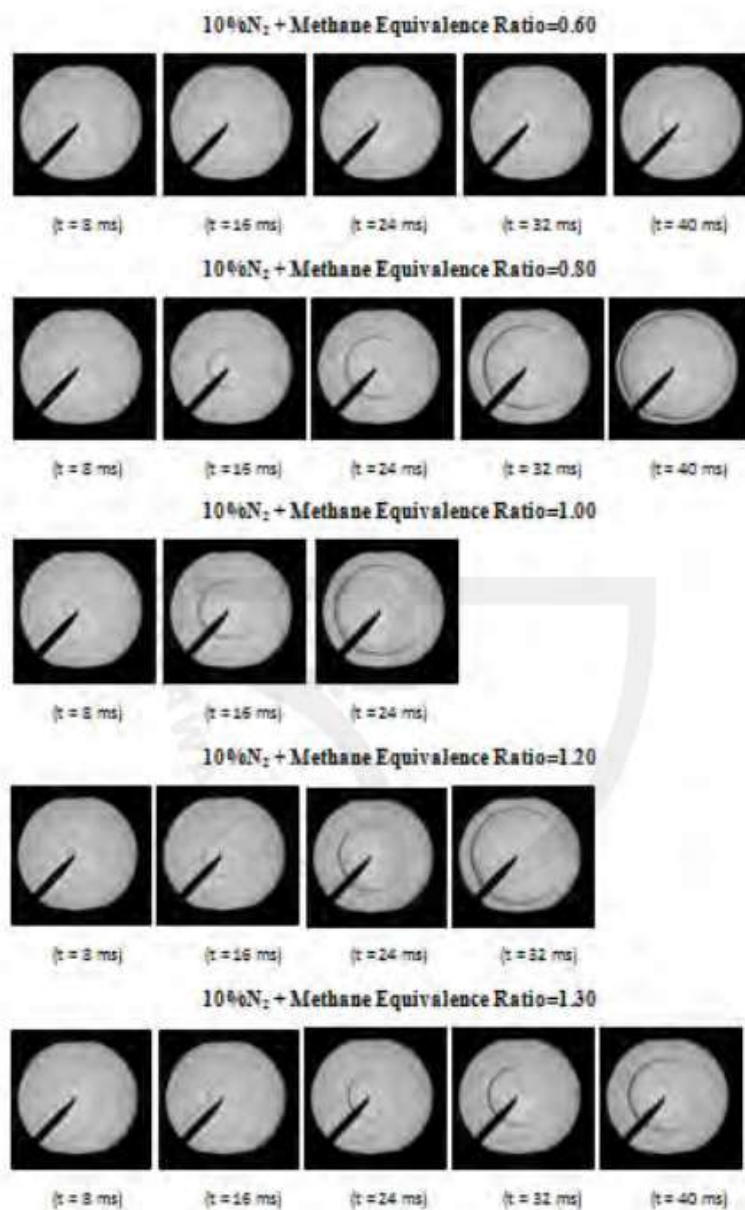
Rasio Ekuivalensi	Kecepatan Pembakaran Laminar (m/s)
0,6	0,093
0,8	0,269
1,0	0,345
1,2	0,296
1,3	0,193

Metana dengan 5% N₂ memiliki *flammable region* pada rasio ekuivalensi 0,6 hingga 1,3. Rasio ekuivalensi kurang dari 0,6 tidak terjadi propagasi api dan rasio ekuivalensi lebih dari 1,3 tidak terjadi propagasi api. Melalui data di atas, dapat dilihat bahwa pada campuran kaya akan memiliki *laminar burning velocity* lebih tinggi dari campuran miskin. Hal ini sesuai dengan karakteristik dari pembakaran bahan bakar hidrokarbon.

6. Karakteristik Metana dengan 10% N₂ pada Tekanan Atmosfer

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 1,4 tidak mengalami propagasi, sedangkan pada rasio ekuivalensi 0,6 masih terjadi propagasi. Untuk itu, dilakukanlah pengujian tambahan untuk mencari *lower flammability limit* dan memastikan nilai *upper flammability limit* dengan menambahkan pengujian pada rasio ekuivalensi 0,5 dan 1,3. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,5 tidak terjadi propagasi dan pada 1,3 terjadi propagasi.

Pada rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dilakukan perekaman, dan kemudian diubah menjadi *file-file* gambar. Hasil gambar untuk pembakaran metana dengan 10% N₂ pada rasio ekuivalensi 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; dan 1,3; dapat dilihat pada Gambar 6.6 di bawah ini.



Gambar 6.6 Propagasi Api pada Berbagai Rasio Ekuivalensi untuk Metana dengan 10% N₂ pada Tekanan Atmosfer

Melalui gambar tersebut, kemudian bisa dicari grafik *flame radius* fungsi waktu. Dari grafik ini kemudian bisa didapatkan nilai dari *laminar burning velocity* sesuai dengan langkah-langkah yang sudah dilakukan pada bab 5. Melalui perhitungan tersebut, didapati nilai *laminar burning velocity* pada masing-masing rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dapat dilihat pada Tabel 6.7.

Tabel 6.7 *Laminar Burning Velocity* Metana dengan 10% N₂ pada Tekanan Atmosfer

Rasio Ekuivalensi	Kecepatan Pembakaran Laminar (m/s)
0,6	0,090
0,8	0,266
1,0	0,338
1,2	0,291
1,3	0,183

Metana dengan 10% N₂ memiliki *flammable region* pada rasio ekuivalensi 0,6 hingga 1,3. Rasio ekuivalensi kurang dari 0,6 tidak terjadi propagasi api dan rasio ekuivalensi lebih dari 1,3 tidak terjadi propagasi api. Melalui data di atas, dapat dilihat bahwa pada campuran kaya akan memiliki *laminar burning velocity* lebih tinggi dari campuran miskin. Hal ini sesuai dengan karakteristik dari pembakaran bahan bakar hidrokarbon.

Melalui percobaan yang telah dilakukan pada berbagai jenis bahan bakar pada kondisi tekanan atmosfer di MKII *Combustion bomb*, karakteristik *laminar burning velocity* dapat dirangkum menjadi seperti pada Tabel 6.8.

Tabel 6.8 Karakteristik *Laminar Burning Velocity* pada Berbagai Bahan Bakar di Tekanan Atmosfer

ϕ	Metana Murni	Biogas	Metana 25% CO ₂	Metana 50% CO ₂	Metana 5% N ₂	Metana 10% N ₂
0,5	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi
0,6	0,095	0,074	0,080	0,061	0,093	0,090
0,8	0,275	0,209	0,229	0,154	0,269	0,266
1	0,353	0,264	0,289	0,189	0,345	0,338
1,2	0,308	0,186	0,236	0,117	0,298	0,291
1,3	0,202	Tidak ada propagasi	0,144	Tidak ada propagasi	0,193	0,183
1,4	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi

Melalui hasil di atas dapat terlihat bahwa nilai *laminar burning velocity* paling besar terdapat pada metana murni, kemudian diikuti oleh

metana dengan 5% N₂, metana dengan 10% N₂, metana dengan 25% CO₂ Biogas, dan yang memiliki nilai *laminar burning velocity* paling rendah adalah metana dengan 50% CO₂. Dari eksperimen metana dengan 50% CO₂ dan dibandingkan dengan eksperimen metana dengan 25% CO₂, dapat disimpulkan bahwa pengotor karbon dioksida sangat berperan dalam menurunkan nilai dari *laminar burning velocity* dan mempersempit *flammable region*. Hal ini dikarenakan nilai dari kapasitas panas untuk pengotor karbon dioksida lebih tinggi dibandingkan pengotor nitrogen.

Dengan membandingkan eksperimen metana dengan 5% N₂ dan eksperimen metana dengan 10% N₂ didapati bahwa pengotor nitrogen membuat nilai dari *laminar burning velocity* menurun, namun dapat dilihat bahwa penurunan ini tidak sampai membuat *flammability limit* menjadi lebih sempit. Hal ini dikarenakan kandungan pengotor nitrogen yang lebih sedikit dan memiliki kapasitas panas yang lebih rendah dibandingkan dengan pengotor karbon dioksida.

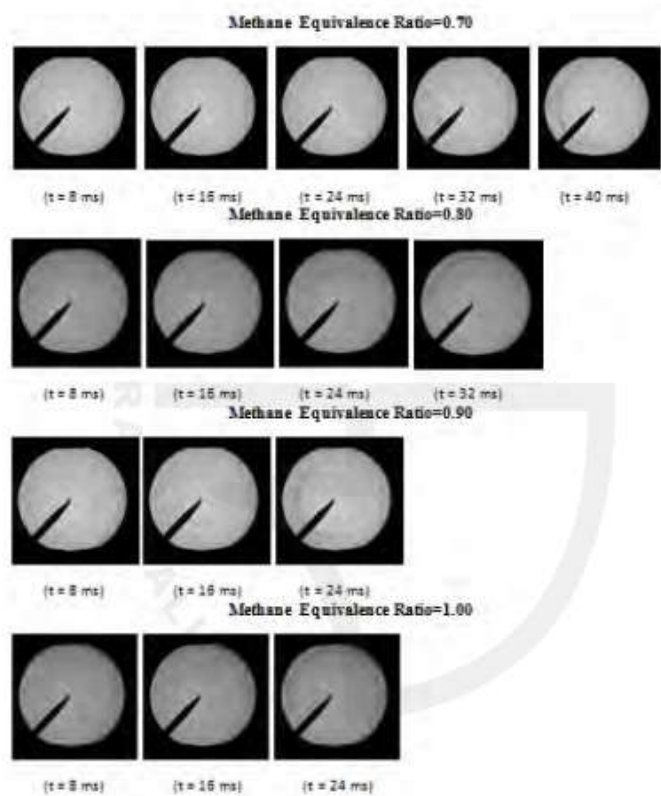
B. Karakteristik *Laminar Burning Velocity* pada Tekanan 0,5 Atm

Pengujian pada tekanan ini penting untuk dilakukan, dikarenakan pada tekanan yang lebih rendah, difusivitas dari bahan bakar dan waktu reaksi bahan bakar menjadi lebih rendah. Dengan melakukan eksperimen ini, akan didapatkan pemahaman yang jauh lebih baik terhadap karakteristik dari kecepatan pembakaran laminar serta *flammability limit* dari biogas yang sedang diuji.

1. Karakteristik Metana Murni pada Tekanan 0,5 Atm

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 1,2 tidak mengalami propagasi, sedangkan pada rasio ekuivalensi 0,6 sudah tidak terjadi propagasi. Untuk itu, dilakukanlah pengujian tambahan untuk memastikan nilai *lower flammability limit* dan *upper flammability limit* dengan menambahkan pengujian pada rasio ekuivalensi 0,7 dan 0,9. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,7 dan 0,9 terjadi propagasi.

Pada rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dilakukan perekaman, dan kemudian diubah menjadi *file-file* gambar. Hasil gambar untuk pembakaran metana murni pada rasio ekuivalensi 0,7; 0,8; 0,9; dan 1,0; dapat dilihat pada Gambar 6.7 berikut.



Gambar 6.7 Propagasi Api pada Berbagai Rasio Ekuivalensi untuk Metana Murni pada Tekanan 0,5 Atm

Melalui gambar di atas, kemudian bisa dicari grafik *flame radius* fungsi waktu. Dari grafik ini, bisa didapatkan nilai dari *laminar burning velocity* sesuai dengan langkah-langkah yang sudah dilakukan pada bab 5. Melalui perhitungan tersebut, didapati nilai *laminar burning velocity* pada masing-masing rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi, yang dapat dilihat pada Tabel 6.9.

Tabel 6.9 *Laminar Burning Velocity* Metana Murni pada Tekanan 0,5 Atm

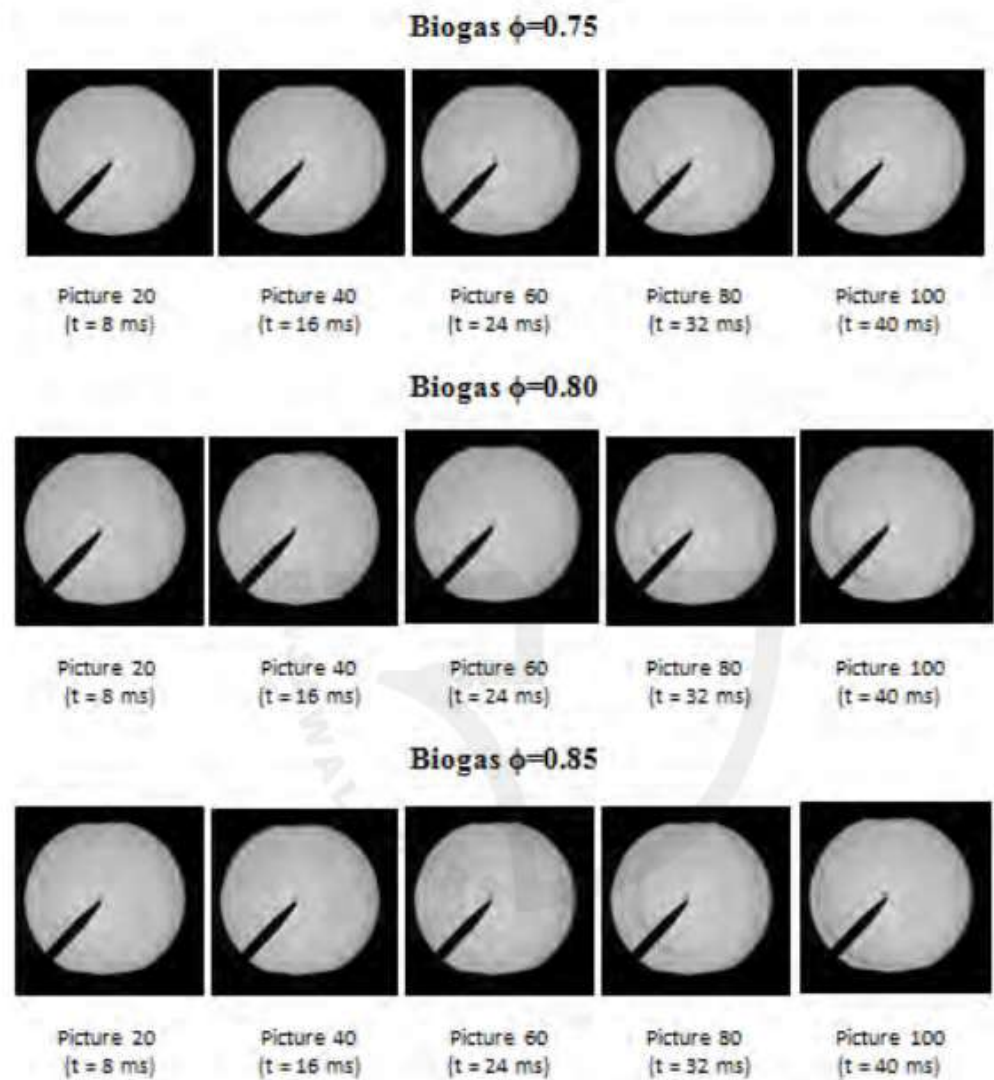
Rasio Ekuivalensi	Kecepatan Pembakaran Laminar (m/s)
0,7	0,234
0,8	0,318
0,9	0,379
1,0	0,415

Metana murni memiliki *flammable region* pada rasio ekuivalensi 0,7 hingga 1. Rasio ekuivalensi kurang dari 0,7 tidak terjadi propagasi api dan rasio ekuivalensi lebih dari 1 tidak terjadi propagasi api. Melalui data di atas, dapat dilihat bahwa nilai *laminar burning velocity* meningkat dari kondisi campuran miskin hingga ke kondisi stoikiometri.

2. Karakteristik Biogas pada Tekanan 0,5 Atm

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 1,0 dan 0,6 telah tidak mengalami propagasi. Untuk itu, dilakukanlah pengujian tambahan untuk memastikan nilai *lower flammability limit* dan nilai *upper flammability limit* dengan menambahkan pengujian pada rasio ekuivalensi 0,7; 0,75; 0,85; dan 0,9. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,7 dan 0,9 tidak terjadi propagasi.

Pada rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dilakukan perekaman, dan kemudian diubah menjadi *file-file* gambar. Hasil gambar untuk pembakaran biogas pada rasio ekuivalensi 0,75; 0,8; dan 0,85; dapat dilihat pada Gambar 6.8 berikut



Gambar 6.8 Propagasi Api pada Berbagai Rasio Ekuivalensi untuk Biogas pada Tekanan 0,5 Atm

Melalui gambar di atas, kemudian bisa dicari grafik *flame radius* fungsi waktu. Dari grafik ini, bisa didapatkan nilai dari *laminar burning velocity* sesuai dengan langkah-langkah yang sudah dilakukan pada bab 5. Melalui perhitungan tersebut, didapati nilai *laminar burning velocity* pada masing-masing rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi, yang dapat dilihat pada Tabel 6.10.

Tabel 6.10 *Laminar Burning Velocity* Biogas pada Tekanan 0,5 Atm

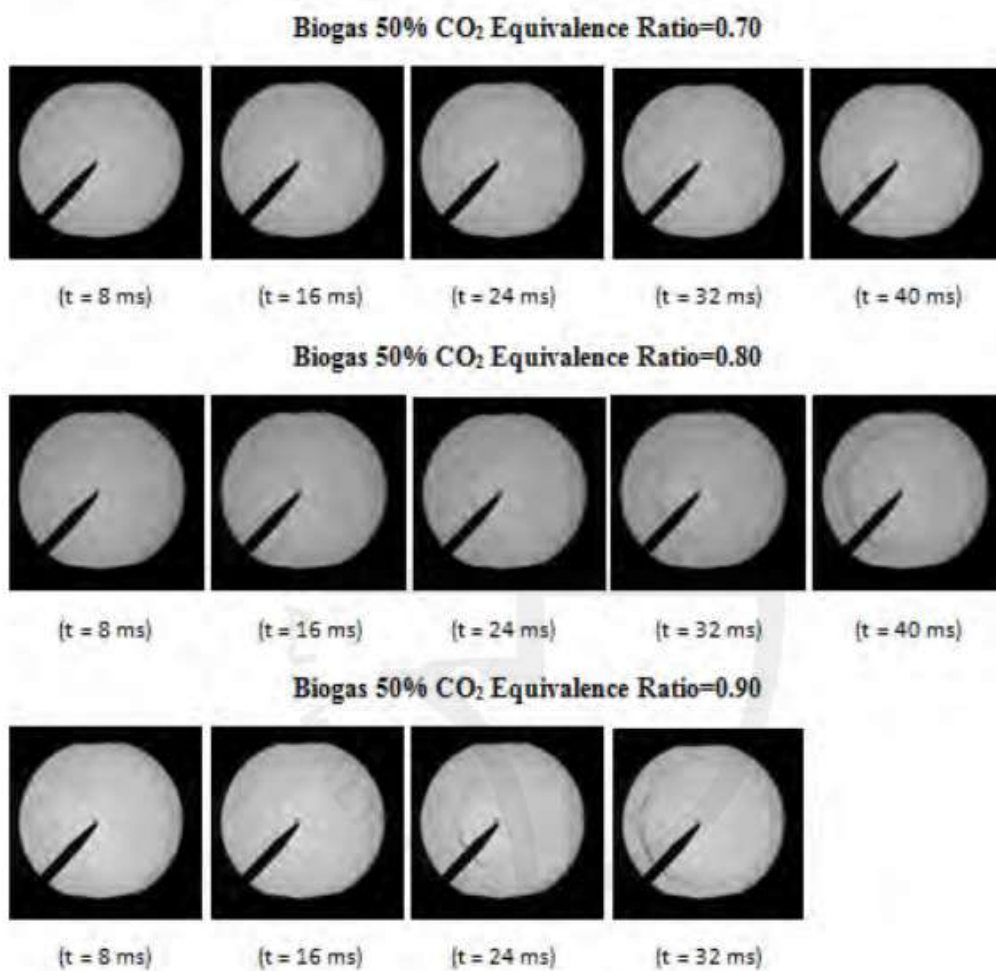
Rasio Ekuivalensi	Kecepatan Pembakaran Laminar (m/s)
0,75	0,218
0,80	0,246
0,85	0,269

Biogas memiliki *flammable region* pada rasio ekuivalensi 0,75 hingga 0,85. Rasio ekuivalensi kurang dari 0,75 tidak terjadi propagasi api dan rasio ekuivalensi lebih dari 0,85 tidak terjadi propagasi api. Melalui data di atas, dapat dilihat bahwa nilai *laminar burning velocity* meningkat dari rasio ekuivalensi 0,75 hingga rasio ekuivalensi 0,85.

3. Karakteristik Metana dengan 25% CO₂ pada Tekanan 0,5 Atm

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,6 dan rasio ekuivalensi 1. Untuk itu, dilakukanlah pengujian tambahan untuk memastikan nilai *lower flammability limit* dan nilai *upper flammability limit* dengan menambahkan pengujian pada rasio ekuivalensi 0,7 dan 0,9. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,7 dan pada 0,9 terjadi propagasi.

Pada rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dilakukan perekaman, dan kemudian diubah menjadi *file-file* gambar. Hasil gambar untuk pembakaran metana dengan 25% CO₂ pada rasio ekuivalensi 0,7; 0,8; dan 0,9; dapat dilihat pada Gambar 6.9 di bawah ini.



Gambar 6.9 Propagasi Api pada Berbagai Rasio Ekuivalensi untuk Metana dengan 25% CO₂ pada Tekanan 0,5 Atm

Melalui gambar di atas, kemudian bisa dicari grafik *flame radius* fungsi waktu. Dari grafik ini, bisa didapatkan nilai dari *laminar burning velocity* sesuai dengan langkah-langkah yang sudah dilakukan pada bab 5. Melalui perhitungan tersebut, didapati nilai *laminar burning velocity* pada masing-masing rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi, yang dapat dilihat pada Tabel 6.11.

Tabel 6.11 *Laminar Burning Velocity* Metana dengan 25% CO₂ pada Tekanan 0,5 Atm

Rasio Ekuivalensi	Kecepatan Pembakaran Laminar (m/s)
0,7	0,187
0,8	0,252
0,9	0,292

Metana dengan 25% CO₂ memiliki *flammable region* pada rasio ekuivalensi 0,7 hingga 0,9. Rasio ekuivalensi kurang dari 0,7 tidak terjadi propagasi api dan rasio ekuivalensi lebih dari 0,9 tidak terjadi propagasi api. Melalui data di atas, dapat dilihat bahwa nilai *laminar burning velocity* meningkat dari rasio ekuivalensi 0,7 hingga rasio ekuivalensi 0,9.

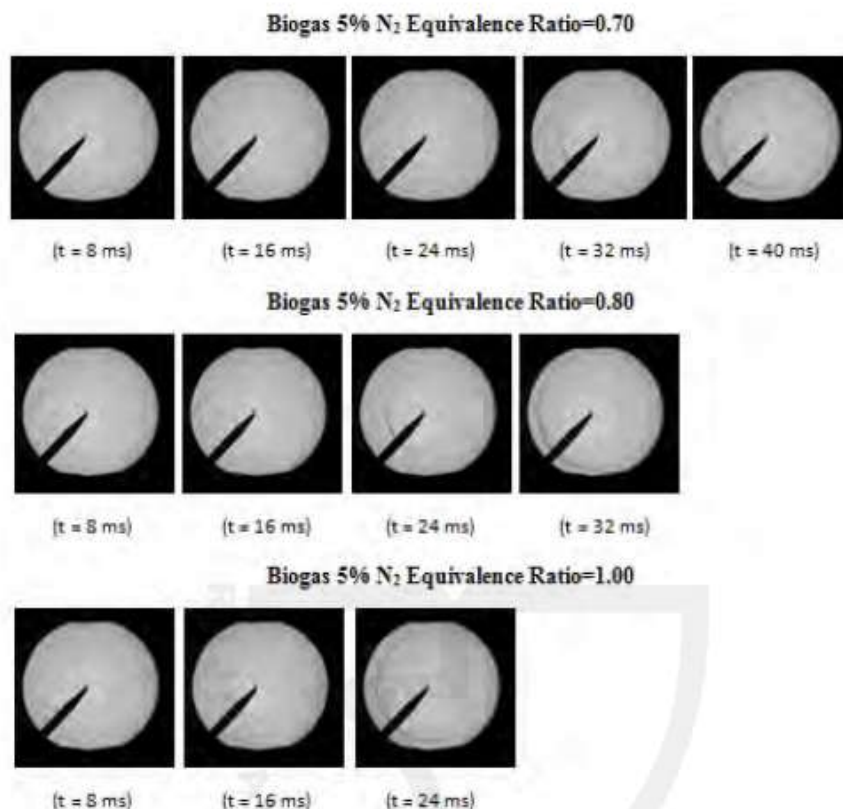
4. Karakteristik Metana dengan 50% CO₂ pada Tekanan 0,5 Atm

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,6 hingga rasio ekuivalensi 1,4 tidak ada yang mengalami propagasi. Hal ini disebabkan karena jumlah dari pengotor karbon dioksida dan kapasitas panas dari karbon dioksida.

5. Karakteristik Metana dengan 5% N₂ pada Tekanan 0,5 Atm

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,6 dan 1,2 telah tidak mengalami propagasi. Untuk itu, dilakukanlah pengujian tambahan untuk memastikan nilai *lower flammability limit* 0,7. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,7 terjadi propagasi.

Pada rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dilakukan perekaman, dan kemudian diubah menjadi *file-file* gambar. Hasil gambar untuk pembakaran metana dengan 5% N₂ pada rasio ekuivalensi 0,7; 0,8; dan 1,0; dapat dilihat pada Gambar 6.10 berikut.



Gambar 6.10 Propagasi Api pada Berbagai Rasio Ekuivalensi untuk Metana dengan 5% N₂ pada Tekanan 0,5 Atm

Melalui gambar di atas, kemudian bisa dicari grafik *flame radius* fungsi waktu. Dari grafik ini, bisa didapatkan nilai dari *laminar burning velocity* sesuai dengan langkah-langkah yang sudah dilakukan pada bab 5. Melalui perhitungan tersebut didapati nilai *laminar burning velocity* pada masing-masing rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi, yang dapat dilihat pada Tabel 6.12.

Tabel 6.12 *Laminar Burning Velocity* Metana dengan 5% N₂ pada Tekanan 0,5 Atm

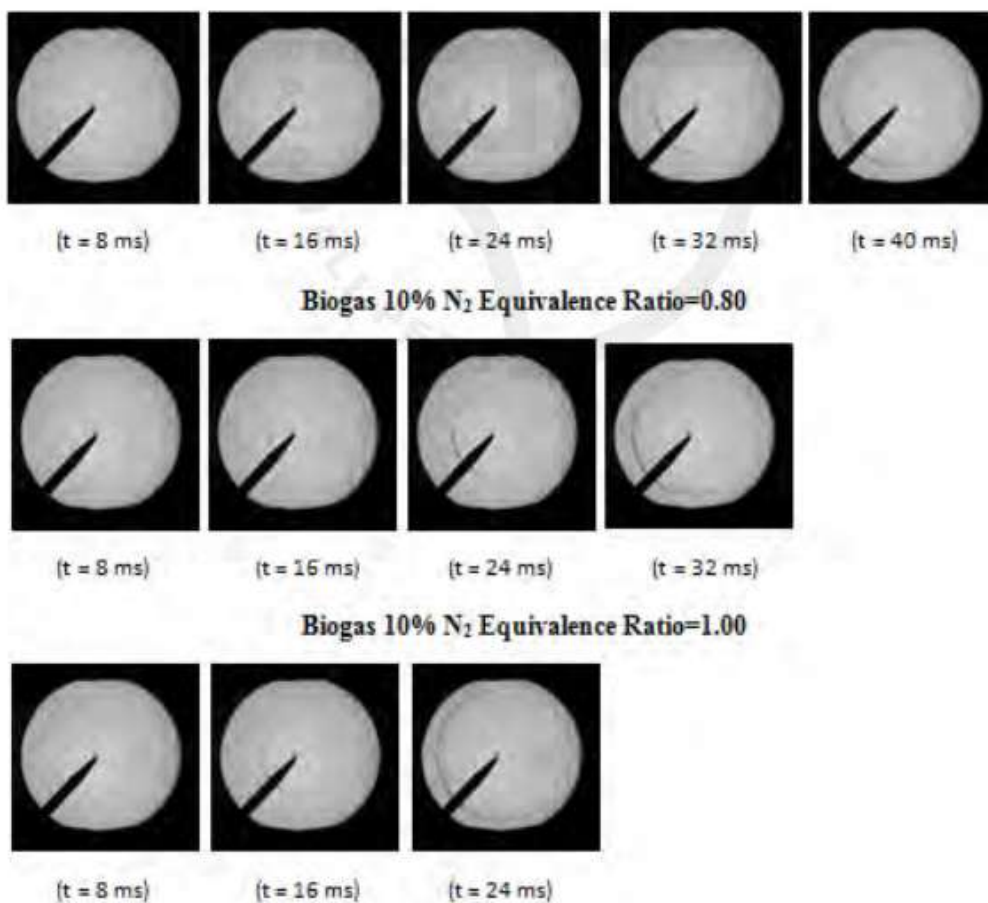
Rasio Ekuivalensi	Kecepatan Pembakaran Laminar (m/s)
0,70	0,229
0,80	0,310
1,00	0,402

Metana dengan 5% N₂ memiliki *flammable region* pada rasio ekuivalensi 0,7 hingga 1. Rasio ekuivalensi kurang dari 0,7 tidak terjadi propagasi api dan rasio ekuivalensi lebih dari 1 tidak terjadi propagasi api. Melalui data tersebut, dapat dilihat bahwa nilai *laminar burning velocity* meningkat dari kondisi campuran miskin hingga ke kondisi stoikiometri.

6. Karakteristik Metana dengan 10% N₂ pada Tekanan 0,5 Atm

Pengujian awal dilakukan pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,4 dengan jarak kenaikan adalah 0,2. Setelah percobaan dilakukan didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,6 dan 1,2 telah tidak mengalami propagasi. Untuk itu, dilakukanlah pengujian tambahan untuk memastikan nilai *lower flammability limit* 0,7. Setelah percobaan dilakukan, didapati bahwa pada rasio ekuivalensi 0,7 terjadi propagasi.

Pada rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi dilakukan perekaman, dan kemudian diubah menjadi *file-file* gambar. Hasil gambar untuk pembakaran metana dengan 5% N₂ pada rasio ekuivalensi 0,7; 0,8; dan 1,0; dapat dilihat pada Gambar 6.11 berikut.



Gambar 6.11 Propagasi Api pada Berbagai Rasio Ekuivalensi untuk Metana dengan 10% N₂ pada Tekanan 0,5 Atm

Melalui gambar di atas, kemudian bisa dicari grafik *flame radius* fungsi waktu. Dari grafik ini, bisa didapatkan nilai dari *laminar burning velocity* sesuai dengan langkah-langkah yang sudah dilakukan pada bab

5. Melalui perhitungan tersebut, didapati nilai *laminar burning velocity* pada masing-masing rasio ekuivalensi yang mengalami propagasi, yang dapat dilihat pada Tabel 6.13.

Tabel 6.13 *Laminar Burning Velocity* Metana dengan 10% N₂ pada Tekanan 0,5 Atm

Rasio Ekuivalensi	Kecepatan Pembakaran Laminar (m/s)
0,70	0,226
0,80	0,299
1,00	0,390

Metana dengan 10% N₂ memiliki *flammable region* pada rasio ekuivalensi 0,7 hingga 1. Rasio ekuivalensi kurang dari 0,7 tidak terjadi propagasi api dan rasio ekuivalensi lebih dari 1 tidak terjadi propagasi api. Melalui data di atas, dapat dilihat bahwa nilai *laminar burning velocity* meningkat dari kondisi campuran miskin hingga ke kondisi stoikiometri.

Melalui percobaan yang telah dilakukan pada berbagai jenis bahan bakar pada kondisi tekanan 0,5 atm di MKII *Combustion bomb*, karakteristik *laminar burning velocity* dapat dirangkum menjadi seperti pada Tabel 6.14.

Tabel 6.14 Karakteristik *Laminar Burning Velocity* pada Berbagai Bahan Bakar di Tekanan 0,5 Atm

ϕ	Metana Murni	Biogas	Metana 25% CO ₂	Metana 50% CO ₂	Metana 5% N ₂	Metana 10% N ₂
0,60	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi
0,70	0,234	Tidak ada propagasi	0,187	Tidak ada propagasi	0,229	0,226
0,75	-	0,218	-	Tidak ada propagasi	-	-
0,80	0,318	0,246	0,252	Tidak ada propagasi	0,310	0,299
0,85	-	0,269	-	Tidak ada propagasi	-	-
0,90	0,379	Tidak ada propagasi	0,292	Tidak ada propagasi	-	-
1,00	0,415	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	0,402	0,390
1,20	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi
1,40	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi	Tidak ada propagasi

Melalui hasil di atas, dapat terlihat bahwa nilai *laminar burning velocity* paling besar terdapat pada metana murni, kemudian diikuti oleh metana dengan 5% N₂, metana dengan 10% N₂, metana dengan 25% CO₂ Biogas, dan yang memiliki nilai *laminar burning velocity* paling rendah adalah metana dengan 50% CO₂. Dari eksperimen metana dengan 50% CO₂ dan dibandingkan dengan eksperimen metana dengan 25%CO₂, dapat disimpulkan bahwa pengotor karbon dioksida sangat berperan dalam menurunkan nilai dari *laminar burning velocity*, bahkan hingga membuat eksperimen dengan 50% CO₂ tidak mengalami propagasi. Selain itu, pengotor karbon dioksida juga mempersempit *flammable region*. Hal ini dikarenakan nilai dari kapasitas panas untuk pengotor karbon dioksida lebih tinggi dibandingkan pengotor nitrogen.

Dengan membandingkan eksperimen metana dengan 5% N₂ dan eksperimen metana dengan 10% N₂, didapati bahwa pengotor nitrogen membuat nilai dari *laminar burning velocity* menurun. Namun, dapat dilihat bahwa penurunan ini tidak sampai membuat *flammability limit* menjadi lebih sempit. Hal ini dikarenakan kandungan pengotor nitrogen yang lebih sedikit dan memiliki kapasitas panas yang lebih rendah dibandingkan dengan pengotor karbon dioksida.

Karbon dioksida dan nitrogen yang bertindak sebagai senyawa pengotor mengakibatkan menurunnya nilai *laminar burning velocity* pada tiap rasio ekuivalensi pembakaran. Untuk persentase tertentu dari pengotor selain menurunkan nilai *laminar burning velocity*, juga mempersempit *flammability region*.

Pada beberapa kasus, penambahan pengotor pada bahan bakar akan mengakibatkan terjadinya pergeseran nilai maksimum dari kecepatan aliran laminar campuran bahan bakar yang kaya ke campuran bahan bakar yang miskin. Hal ini terjadi pada pengotor karbon dioksida dengan persentase 30,6% (biogas) dan 50%. Hal ini mengakibatkan terjadinya pertentangan dengan karakteristik umum dari bahan bakar hidro karbon, di mana seharusnya campuran kaya memiliki nilai *laminar burning velocity* yang lebih tinggi pada rasio ekuivalensi yang sama dari campuran stoikiometri. Melalui fenomena ini, dapat disimpulkan bahwa pengaruh pengotor lebih besar pada campuran kaya dan pengotor karbon

dioksida memberikan pengaruh lebih besar dibandingkan pengotor nitrogen.

C. Pengaruh *Inhibitors* (CO_2 dan N_2) pada *Laminar Burning Velocity* dan *Flammability Limit*

Melalui eksperimen pembakaran berbagai jenis bahan bakar yang telah dilakukan di MKII *combustion bomb*, baik pada tekanan atmosfer maupun tekanan 0,5 atm seperti yang dapat dilihat pada Gambar 6.53. Dapat diketahui pengaruh pengotor karbon dioksida dan nitrogen terhadap *laminar burning velocity* dan *flammability limit*.

Pada kondisi temperatur ruangan dan tekanan atmosfer, kecepatan pembakaran laminar pada rasio ekuivalensi yang sama dari bahan bakar biogas adalah lebih kecil jika dibandingkan dengan kecepatan pembakaran laminar pada bahan bakar CH_4 (metana). Hal ini bisa terjadi dikarenakan oleh adanya gas karbon dioksida dan gas nitrogen yang memiliki sifat *inhibitor*. Sifat ini akan mengakibatkan gas-gas tersebut menyerap panas yang dihasilkan oleh dari pembakaran, sehingga akan menurunkan temperatur api yang dihasilkan. Di samping itu, juga akan menurunkan kecepatan reaksi kimia yang terjadi.

Flammability limit biogas lebih sempit daripada bahan bakar CH_4 (metana), karena adanya *inhibitor* karbon dioksida dan nitrogen. Pada rasio ekuivalen yang sama, campuran metana dan udara menunjukkan *laminar burning velocity* yang lebih tinggi daripada biogas dan udara di bawah kondisi tekanan atmosfer. Penurunan tekanan meningkatkan kecepatan pembakaran laminar dan mempersempit area yang mudah terbakar. Rasio ekuivalensi metana dalam kisaran yang mudah terbakar pada tekanan atmosfer adalah 0,6 hingga 1,3. Kisaran rasio ekuivalensi yang mudah terbakar bahan bakar biogas yang dibakar pada tekanan atmosfer adalah pada rasio ekuivalensi antara 0,6 hingga 1,2. Metana pada tekanan yang dikurangi (0,5 atm), dapat terbakar di rasio ekuivalensi 0,7 hingga 1,0. Rasio ekuivalensi biogas dari daerah yang mudah terbakar di bawah tekanan tereduksi adalah 0,75 hingga 0,85. Efek dari *inhibitor* (CO_2 dan N_2) mengurangi daerah *flammability limit* dan mengurangi kecepatan pembakaran laminar, baik di atmosfer dan tekanan 0,5 atm.

Efek *inhibitor* lebih efektif di daerah kaya, yang dapat dilihat dengan menggeser batas atas kecepatan pembakaran laminar dari campuran kaya (dalam metana) ke campuran miskin dalam biogas. Efek dari *inhibitor* ini bahkan lebih besar di bawah tekanan 0,5 atm, sehingga membatasi jangkauan biogas yang mudah terbakar ke kisaran rasio ekuivalensi yang sangat sempit.

D. Pengaruh CO₂ pada *Laminar Burning Velocity* dan *Flammability Limit*

Karena efek gas pengotor CO₂ (*inert*), daerah yang mudah terbakar berkurang dan *laminar burning velocity* berkurang baik pada atmosfer maupun tekanan 0,5 atm. Tindakan *inhibitor* lebih efektif di daerah kaya. Efek dari *inhibitor* ini bahkan lebih besar di bawah tekanan yang dikurangi. Artinya, rasio ekuivalensi biogas yang mudah terbakar adalah antara 0,75 dan 0,85, dan metana dengan 50% CO₂ tidak memiliki rasio ekuivalensi yang bisa terbakar. Hal ini dikarenakan proporsi CO₂ dalam biogas sangat besar (sampai 50%) dan kemampuan CO₂ untuk menyerap panas sangat besar.

E. Pengaruh N₂ pada *Laminar Burning Velocity* dan *Flammability Limit*

Dengan rasio ekuivalen yang sama, campuran metana dan udara menunjukkan *laminar burning velocity* yang lebih tinggi daripada biogas dan udara pada tekanan atmosfer dan tekanan 0,5 atm. Penurunan tekanan meningkatkan nilai kecepatan pembakaran laminar. Oleh karena aksi *inhibitor* N₂, kecepatan pembakaran laminar menurun pada tekanan atmosfer dan tekanan 0,5 atm, tetapi daerah yang mudah terbakar tidak berkurang. Hal ini karena proporsi N₂ dalam biogas tidak terlalu tinggi (sampai 10%) dan kapasitas endotermik N₂ jauh lebih rendah daripada CO₂.

F. Pengaruh Tekanan pada *Laminar Burning Velocity* dan *Flammability Limit*

Ditemukan bahwa pada tekanan yang lebih rendah akan meningkatkan nilai *laminar burning velocity* bahan bakar, namun wilayah yang mudah

terbakar menyempit. Efek CO_2 lebih besar daripada efek N_2 pada biogas. Hal ini dikarenakan biogas memiliki proporsi CO_2 yang sangat besar (sampai 50%) dan CO_2 memiliki kemampuan menyerap panas yang sangat besar. Hal ini terlihat pada perbandingan daerah yang mudah terbakar metana dengan 25% CO_2 dan biogas. Metana dengan 50% CO_2 metana di bawah tekanan yang dikurangi tidak menyebabkan terjadinya propagasi api. Gas *inert* N_2 dalam biogas memiliki proporsi pengotor N_2 yang sangat rendah dalam bahan bakar dan penyerapan N_2 yang sangat rendah, yang sedikit memperlambat kecepatan pembakaran laminar bahan bakar dan tidak merubah *flammability limit* bahan bakar hal ini terjadi, baik pada tekanan atmosfer dan tekanan 0,5 atm.





DAFTAR PUSTAKA

- Abdulwahid. M., Saqr. K.M., Sies. M.M., and Ujir., 2009, Diffusive Thermal Instabilities of C_4H_{10} - C_3H_8 /Air Laminar Premixed Flames, *Journal for the Basic Principles of Diffusion Theory, Experiment and Application*, 9(8):1–8.
- Admin Distan. (2018, November 19). *Pemanfaatan Kotoran Ternak untuk Biogas*. Retrieved from Dinas Pertanian Pemerintah Kabupaten Buleleng: <https://distan.bulelengkab.go.id/informasi/detail/artikel/pemanfaatan-kotoran-ternak-untuk-biogas-14>.
- Alwis A.D., 2002, A review of Sri Lanka's Performance with a Renewable Energy Technology. *Energy for Sustainable Development*, 6(1):30–37.
- Anggono, Willyanto. (2017). Behavior of Biogas Containing Nitrogen on Flammability Limits and Laminar Burning Velocities. *International Journal of Renewable Energy Research*, 7 (1), 304–310. <https://doi.org/10.20508.ijrer.v7i1.5509.g6990>.
- Anggono, Willyanto, Suprianto, F.D., Hartanto, T. 1., Purnomo, K., & Wijaya, T. P. (2016). The Effect of Nitrogen on Biogas Flame Prpagation Characteristic in Premix Combustion. 100001. <https://doi.org/10.1063/1.4943345>.
- Anggono, Willyanto, Suprianto, F. D., Purnomo, K., Hartanto, T. 1., & Wijayan, T. P. (2016). The Effect of Nitrogen on Biogas Flame

- Characteristic Biogas External Premixed Combustion. *Applied Mechanics and Materials*, 836, 265–270. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.836.265>.
- Anggono. W., Wardana. I.N.G., Pourkashanian. M., Hughes. K.J., Lawes. M., Wahyudi. S., Hamidi. N., and Hayakawa. A., 2012, Experimental and Numerical Simulation on Biogas Flame Propagation Characteristic in Spark Ignition Premixed Combustion, Proceeding The3rd International Conference on Engineering and ICT (ICEI2012) Melaka–Malaysia, 2:290–294.
- Anggono. W., Wardana. I.N.G., Lawes. M., Hughes. K.J., Wahyudi. S., Hamidi. N., 2012, Laminar Burning Characteristics of Biogas-Air Mixtures in Spark Ignited Premix Combustion. *Journal of Applied Sciences Research*, 8:4126–4132.
- Anggono. W., Wardana. I.N.G., Lawes. M., Hughes. K.J., Wahyudi. S., Hamidi. N., and Hayakawa. A., 2013, Laminar Burning Velocity and Flammability Characteristics of Biogas-Air Mixtures in Spark Ignited Premix Combustion. *Journal of Physics Conference Series*.
- Anggono, W., Wardana, I. N. G., Lawes, M., Hughes, K.J., Wahyudi, S., Hamidi, N., & Hayakawa, A. (2016). The Influence of CO₂ in Biogas Flammability Limit and Laminar Burning Velocity in Spark Ignited Premix Combustion at Various Pressures. 030001. <https://doi.org/10.1063/1.4943425>.
- Aung KT, Tseng LK, Ismail MA, Faeth GM., 1995, Response to comment by S.C. Taylor and D.B. Smith on “Laminar Burning Velocities and Markstein Number of Hydrocarbon/Air Flames. *Combustion and Flame*, 102:526–530.
- Bond T, Templeton MR., 2011, History and Future of Domestic Biogas Plants in the Developing World. *Energy for Sustainable Development*, 15(4):347–54.
- Bradley. D., Gaskell. P.H., Gu. X.J., 1996, Burning Velocities, Markstein Lengths, and Flame Quenching for Spherical Methane-Air Flames: A Computational Study, *Combust. Flame*, 104:176–198.
- Bradley. D., Hicks. R.A., Lawes. M., Sheppard. C.G.W. and Wooley, R., 1998, The Measurement of Laminar Burning Velocities and Markstein Numbers for Isooctane-Air and Iso-Octane-n-Heptane-

- Air Mixtures at Elevated Temperatures and Pressures in an Explosion Bomb, *Combust. Flame*, 115:126–144.
- Bradley. D., 2009, Combustion and the Design of Future Engine Fuels, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, *Journal of Mechanical Engineering Science*, Part C:2751–2765.
- Cacua. K., Amell. A., Cadavid. F., 2012, Effects of Oxygen Enriched Air on the Operation and Performance of a Diesel-Biogas Dual Fuel Engine, *Biomass and Bioenergy*, 45:159–167.
- Dowdy. D.R., Smith. D.B., and Taylor. S.C., 1990, The Use of Expanding Spherical Flames to Determine Burning Velocities and Stretch Effects in Hydrogen/Air Mixtures, *Proc. Comb. Inst.*, 23:325–332.
- Ferrer. I., Garfi. M., Uggetti. E., Marti. L.F., Calderon. A., Velo. E., 2011, Biogas Production in Low-Cost Household Digesters at the Peruvian Andes, *Biomass and Bioenergy*, 35:1688–74.
- Flesch. T.K., Desjardins. R.L., Worth. .D., 2011, Fugitive Methane Emissions from an Agricultural Biodigester, *Biomass and Bioenergy*, 35:3927–35.
- Fristrom. R.M., Westnberg. A.A., 1965, *Flame Structure*, McGraw-Hill.
- Gillespie. L., Lawes. M., Sheppard. C.G.W., Woolley. R., 2000, Aspects of laminar and turbulent burning velocity relevant to SI engines. SAE Paper Series 2000-01-0192.
- Glassman. I., Yetter. R.A., 2008. *Combustion*. Fourth edition. Academic Press. Elsevier.
- Gu. X.J., Haq. M.Z., Lawes. M., and Wooley. R., 2000), Laminar Burning Velocity and Markstein Lengths of Methane-Air Mixtures, *Combust. Flame*, 121:41–58.
- Hassan. M.I., Aung. K.T., and Faeth. G.M., 1998, Measured and Predicted Properties of Laminar Premixed Methane/Air Flames at Various Pressures, *Combust. Flame*, 115:539–550.
- Hu. E., Huang. Z., He. J., Miao. H., 2009, Experimental and Numerical Study on Laminar Burning Velocities and Flame Instabilities of Hydrogen–Air Mixtures at Elevated Pressures and Temperatures, *International Journal Hydrogen Energy*, 34:8741–8755.
- Huang. Z., Zhang. Y., Zeng. K., Liu. B., Wang. Q., and Jiang. D., 2006, Measurements of Laminar Burning Velocities for Natural Gas–

- Hydrogen–Air Mixtures, *International Journal Combustion and Flame*, 146: 303–311.
- Ilminnafik. N., Hamidi. N, Wardana. I.N.G., 2011, Behavior of Flame Propagation in LPG Premixed Combustion with Carbon Dioxide Inhibitor, *International Journal of Academic Research*, 3:705–708.
- Karpov. V.P., Lipatnikov. A.N., and PiotrWolanski., 1997, Finding the Markstein Number Using the Measurements of Expanding Spherical Laminar Flames, *Combust. Flame*, 109:436–448.
- Khizer. S., Stone. C.R., 2004, Measurements of the Laminar Burning Velocity for Mixtures of Methanol and Air from a Constant–Volume Vessel Using a Multizone Model, *Combustion and Flame*, 139:152–166.
- Kurchania. A.K., Panwar. N.L., Pagar. S.D., 2010, Design and Performance Evaluation of Biogas Stove for Community Cooking Application, *International Journal of Sustainable Energy*, 29:116–23.
- Lafay. Y., Taupin. B., Martins. G., Cabot. G., Renou. B., Boukhalfa, 2007, Experiment Study of Biogas Combustion Using a Gas Turbine Configuration, *Experiments in Fluids*, 43:395–410.
- Liao. S.Y., Jiang. D.M., Huang. Z.H., Zeng. K., 2006, Characterization of Laminar Premixed Methanol–Air Flames, *Fuel*:1346–1353.
- Liao. S.Y., Liang. D.M., Gao. J., Huang. Z.H., Cheng. Q., 2004, Measurements of Markstein Numbers and Laminar Burning Velocities for Liquefied Petroleum Gas–Air Mixtures, *Fuel*:1281–1288.
- Lichtman. R., Ellegard. A., Lal. S., Sharma. N., 1996, The Improved Biogas Systems Project: Results and Future Work, *Energy for Sustainable Development*, 3(4):28–42.
- Lide D.R., 2004. *Handbook of Chemistry and Physic*, 84th edition, CRC Press.
- Mahallawy. F., Habik. S.E., 2002, *Fundamental and Technology of Combustion*. Elsevier Science Ltd., first edition.
- Marshall. S.P, Taylor. S., Stone. C.R., Davies. T.J., Cracknell. R.F., 2011, Laminar Burning Velocity Measurements of Liquid Fuels at Elevated Pressures and Temperatures with combustion residuals, *Combustion and Flame*, 158:1920–32.

- Masera. O., Edwards. R., Arnez. C.A., Berrueta. V., Johnson. M., Bracho. L.R., Riojas. R.H., Smith. K.R., 2007, Impact of Patsari Improved Cookstoves on Indoor Air Quality in Michoacán, Mexico, *Energy for Sustainable Development*, 11:45–56.
- Metghalchi. M., Keck. J.C., 1980, Laminar Burning Velocity of Propane-Air Mixtures at High Temperature and Pressure, *Combustion and Flame*, 38:143–54.
- Miao. H., Min. J., Qi. J., Qian. H., Huang. Z., 2009, Laminar Burning Velocity and Markstein Length of Nitrogen Diluted Natural Gas/Hydrogen/Air Mixtures at Normal, Reduced and Elevated Pressures, *Hydrogen Energy*, 34:3145–55.
- Molnarne. M., 2005, Flammability of gas mixtures. Part 2: Influence of Inert Gases, *Journal of Hazardous Material*, A121:45–49.
- Nathan. S.S., Mallikarjuna. J.M., Ramesh. A., 2010, An Experimental Study of the Biogas–Diesel HCCI Mode of Engine Operation, *Energy Conversion and Management*, 51:1347–53.
- Pertanianku. (2015, June 20). *Jenis-Jenis Reaktor Biogas (Digester)*. Retrieved from Pertanianku: <https://www.pertanianku.com/jenis-jenis-reaktor-biogas-digester/>.
- Porpatham. E., Ramesh. A., Nagalingam. B., 2008, Investigation on the Effect of Concentration of Methane in Biogas When Used as a Fuel for a Spark Ignition Engine, *Fuel*, 87:1651–9.
- Ronney. P.D., 2001, *Premixed–Gas Flames in Microgravity Combustion*. Academic Press, London.
- Serrano. C., Hernandez. J.J., Mandilas. C., Sheppard. C.G.W., Woolleyb. R., 2008, Laminar Burning Behaviour of Biomass Gasification-Derived Producer Gas, *International Journal of Hydrogen Energy*, 33:851–862.
- Sridhar. G., Paul. P.J. and Mukunda. H.S., 2001, Biomass Derived Producer Gas as a Reciprocating Engine Fuel–An Experimental Analysis, *Biomass & Bioenergy*, 21:61–72.
- Tirtoatmodjo. R., Anggono. W., 1999, Peningkatan Performance Motor Bensin 4 Tak 3 Silinder yang Menggunakan BBG dengan Penambahan Blower dan Sistem Injeksi. *Jurnal Teknik Mesin*, Vol. 1, No. 1.

- Venkataraman. C., Sagar. A.D., Habib. G., Lam. N., Smith. K.R., 2010, The Indian National Initiative for Advanced Biomass Cookstoves: The Benefits of Clean Combustion, *Energy for Sustainable Development*, 14:63–72.
- Wardana, ING., 2008, Bahan Bakar dan teknologi Pembakaran, PT Danar Wijaya, Brawijaya University Press.
- Warnatz. J., Mass. U., Dibble. R.W., 2006, *Combustion: Physical and Chemical Fundamentals, Modeling and Simulation, Experiments, Pollutant Formation*, 4th edition, Springer.
- <http://www.dikti.org/?q=node/99>, Dec 10, 2009.
- <http://energialternatif.ekon.go.id/>, Dec 10, 2009.
- http://me.berkeley.edu/gri_mech, Dec 14, 2011.



BIODATA PENULIS



Willyanto Anggono, Dosen dan Profesor di program Teknik Mesin, Universitas Kristen Petra, Surabaya dengan konsentrasi di bidang energi berkelanjutan, khususnya energi yang terbuat dari sampah (limbah). Ia menyelesaikan Pendidikan S-1 Teknik Mesin di Universitas Kristen Petra, Surabaya dan Pendidikan S-2 di Engineering Product Design Hogeschool van Utrecht, the Netherlands serta S-3 di Teknik Mesin Universitas Brawijaya, Malang. Selama menjadi Dosen dan peneliti, Willyanto telah mendapatkan berbagai hibah dari Indonesia maupun Internasional, menerbitkan paten, memublikasikan karya ilmiah internasional bereputasi, kegiatan sebagai komite ilmiah, dan sebagai *reviewer* pada konferensi dan jurnal internasional bereputasi. Ia banyak terlibat dalam penelitian ilmu pembakaran bersama peneliti ternama di Indonesia, serta berkolaborasi dengan peneliti Internasional dari Liverpool University, United Kingdom, Leeds University, United Kingdom, Tohoku University, Jepang dan Sophia University, Jepang.



Teng Sutrisno, Staf Pengajar di Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri Universitas Kristen Petra. Beliau menyelesaikan gelar Doktor bidang Aerodinamika Kompresor Aksial di Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia pada tahun 2017. Sebelumnya, telah menyelesaikan gelar Magister di bidang Thermofluida di Institut Teknologi Bandung pada tahun 2009 dan gelar Sarjana di bidang Konversi Energi di Universitas Kristen Petra pada tahun 2006. Penelitiannya dalam bentuk publikasi banyak berkecimpung dan Paten di bidang Mekanika Fluida, Perpindahan Panas, Pembakaran Dalam, dan Energi terbarukan.



Fandi D. Suprianto, Staf Pengajar di Prodi Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri Universitas Kristen Petra. Setelah menyelesaikan gelar Sarjana Teknik Mesin di bidang Konversi Energi di Universitas Kristen Petra pada tahun 2004, ia melanjutkan studi S-2 di The University of Leeds – United Kingdom, dan memperoleh gelar Master of Science in Combustion and Energy pada tahun 2006. Sejumlah penelitiannya dalam bidang Pembakaran dan Energi terbarukan telah dipublikasikan dalam jurnal dan prosiding nasional maupun internasional, dan selain itu ia adalah salah satu inventor dari beberapa paten dalam bidang bahan bakar.



Gabriel J. Gotama, mahasiswa S-3 program Teknik Mesin di The University of Melbourne, Australia dan Shanghai Jiao Tong University, China (gelar gabungan) dengan fokus penelitian di bidang kimia pembakaran. Ia menyelesaikan Pendidikan S-1 program Teknik Mesin di Universitas Kristen Petra, Surabaya dan Pendidikan S-2 program Teknik Kedirgantaraan di Nanyang Technological University, Singapura dan Technical University of Munich, Jerman (gelar gabungan). Ia banyak terlibat dalam penelitian ilmu pembakaran bersama Prof. Willyanto Anggono dan berkolaborasi

dengan peneliti dari Tohoku University, Jepang dan Sophia University, Jepang.



Ivan C. Hernando, mahasiswa S-2 jurusan teknik mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember di bidang otomotif. Telah menyelesaikan pendidikan S-1 di jurusan teknik mesin Universitas Kristen Petra pada tahun 2021 dengan penelitian pada pembuatan robot serial manipulator 6 DOF. Ia merupakan ketua tim KMHE (Kontes Mobil Hemat Energi) Universitas Kristen Petra pada tahun 2020 yang berhasil meraih posisi kedua dalam kategori aerodinamika bodi kendaraan. Ia juga aktif dalam menulis PKM, salah satu judul yang ditulis adalah peningkatan rasio elektrifikasi dengan turbin uap pemanas *solar collector* dan biogas.

KARAKTERISTIK_PEMBAKARAN_BAHAN_BAKAR.pdf

ORIGINALITY REPORT

3%

SIMILARITY INDEX

3%

INTERNET SOURCES

0%

PUBLICATIONS

2%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1

sipeg.unj.ac.id

Internet Source

2%

2

poetrycontests.biz

Internet Source

1%

3

bu.edu.eg

Internet Source

1%

Exclude quotes On

Exclude bibliography On

Exclude matches < 1%