

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Penelitian yang sangat mendasar tentang pengaruh zat terlarut CO_2 dalam distribusi temperatur CH_4 dilakukan antara lain oleh:

Dikemukakan oleh Karim (1991), laju reaksi pembakaran campuran $\text{CH}_4\text{-CO}_2$ akan menurun seiring dengan meningkatnya konsentrasi CO_2 dalam campuran bahan bakar. Hal ini akan otomatis berakibat waktu pembakaran menjadi lebih lama demikian juga dengan waktu penyalaan bahan bakar. Tetapi, hasil penelitian lainnya (Karim, 1992) menunjukkan bahwa laju reaksi oksidasi pembakaran bahan bakar Metana- CO_2 ini dapat ditingkatkan dengan meningkatkan homogenitas pencampuran reaktannya.

Karim (1998), meneliti mengenai pengaruh kandungan gas CO_2 di dalam campuran gas $\text{CH}_4\text{-CO}_2$, dan hasilnya adalah gas CO_2 dapat menurunkan nilai kalor pembakaran yang berakibat pada rendahnya nilai energi dari pembakaran yang dihasilkan. Tingginya kadar kandungan gas CO_2 akan dapat mempengaruhi lamanya proses pembakaran dan juga berakibat pada sulitnya penyalaan awal pembakaran. Disini dituliskan jumlah sebagian energi pembakaran yang terserap oleh zat terlarut dalam hal ini adalah CO_2 akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur pembakaran.

Ramesh (2008), meneliti tentang efek dari konsentrasi metana dalam biogas saat digunakan sebagai bahan bakar pada penyalaan mesin dengan busi. Hasilnya adalah konsentrasi gas CO_2 dalam biogas yang digunakan sebagai bahan bakar menurunkan kinerja mesin secara signifikan. Konsentrasi gas CO_2 dari yang sebelumnya 41% dikurangi hingga mencapai 20% dapat meningkatkan kinerja yang dihasilkan oleh mesin tersebut seiring dengan bertambahnya konsentrasi CH_4 .

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

Chen (2011), meneliti mengenai karakteristik pembakaran biogas menggunakan metode *Counterflow burner* dengan menambahkan Hidrogen pada campuran bahan bakar. Hasilnya adalah metode *Counterflow burner* dapat memperlihatkan pengaruh penambahan Hidrogen pada proses karakteristik pembakaran biogas. Berdasarkan hasil penelitian tersebut dapat ditemukan cara lain untuk mengoptimalkan bahan bakar biogas tanpa harus melakukan proses pemurnian yang rumit. Pemurnian yang dimaksud adalah kandungan biogas dengan kandungan-kandungan pengotor lain seperti gas CO_2 .

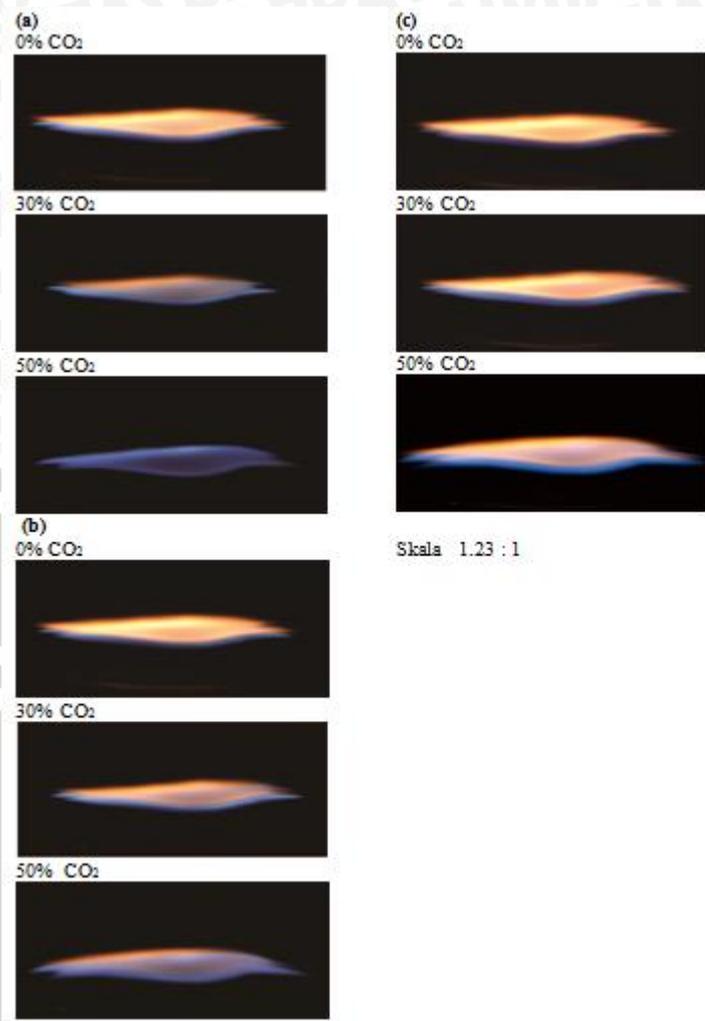
Tsuji (1982),meneliti tentang metode pembakaran dengan menggunakan metode *Counterflow burner*. Dari hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ini merupakan metode yang sesuai digunakan untuk mempelajari struktur api yang dipengaruhi oleh jenis kandungan bahan bakar, massa alir bahan bakar, AFR maupun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

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

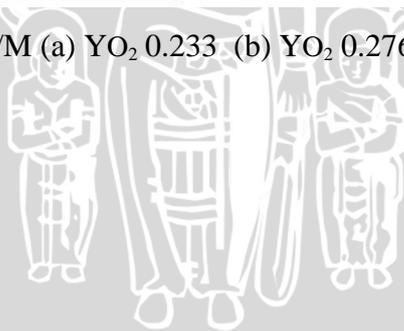
Axelbaum (1996) Untuk sistem $\text{CH}_4 - \text{O}_2 - \text{N}_2$ pada suhu nyala adiabatik diberikan , batas padam api meningkat dengan fraksi campuran stoikiometri. Peningkatan ini merupakan hasil dari pergeseran profil O_2 ke daerah suhu yang lebih tinggi sehingga meningkatkan tingkat produksi OH dan O dan konsentrasi di wilayah ini menghasilkan api yang lebih kuat .

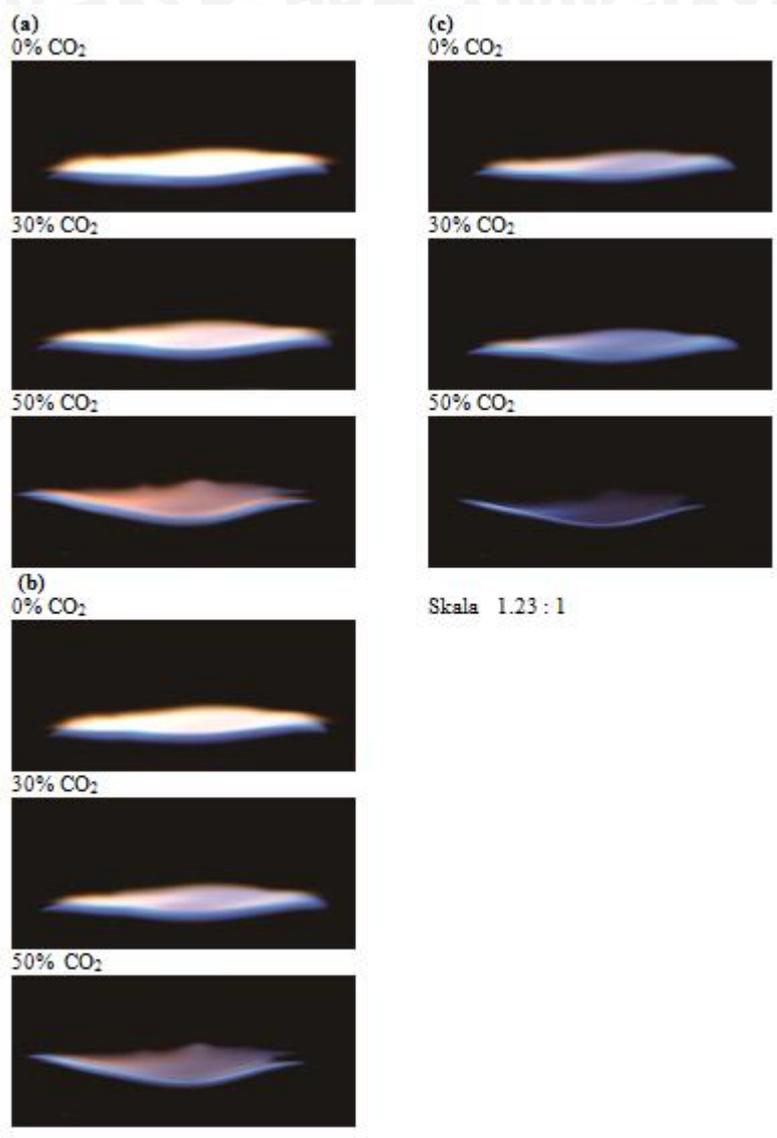
Shih (2009) Kemungkinan efek penambahan CO_2 pada H_2/O_2 api dapat dikategorikan sebagai efek encer , efek kimiawi , dan radiasi efek . Pertama , CO_2 merupakan inhibitor . Penambahan CO_2 mengurangi konsentrasi reaktan yang relatif , sehingga laju reaksi keseluruhan menurun . Kedua , CO_2 tidak benar-benar kimia inert . Telah diakui , pada suhu tinggi ,konversi CO_2 , gas CO mungkin muncul. Ketiga, CO_2 adalah gas radiasi berpartisipasi kuat. Radiasi merupakan salah satu transfer panas penting yang terlibat dalam difusi api, terutama pada tingkat arus konvektif kecepatan rendah.

Farizkaraja (2014) meneliti pengaruh kandungan CO_2 terhadap karakteristik api pembakaran difusi CH_4+CO_2 pada counterflow burner .

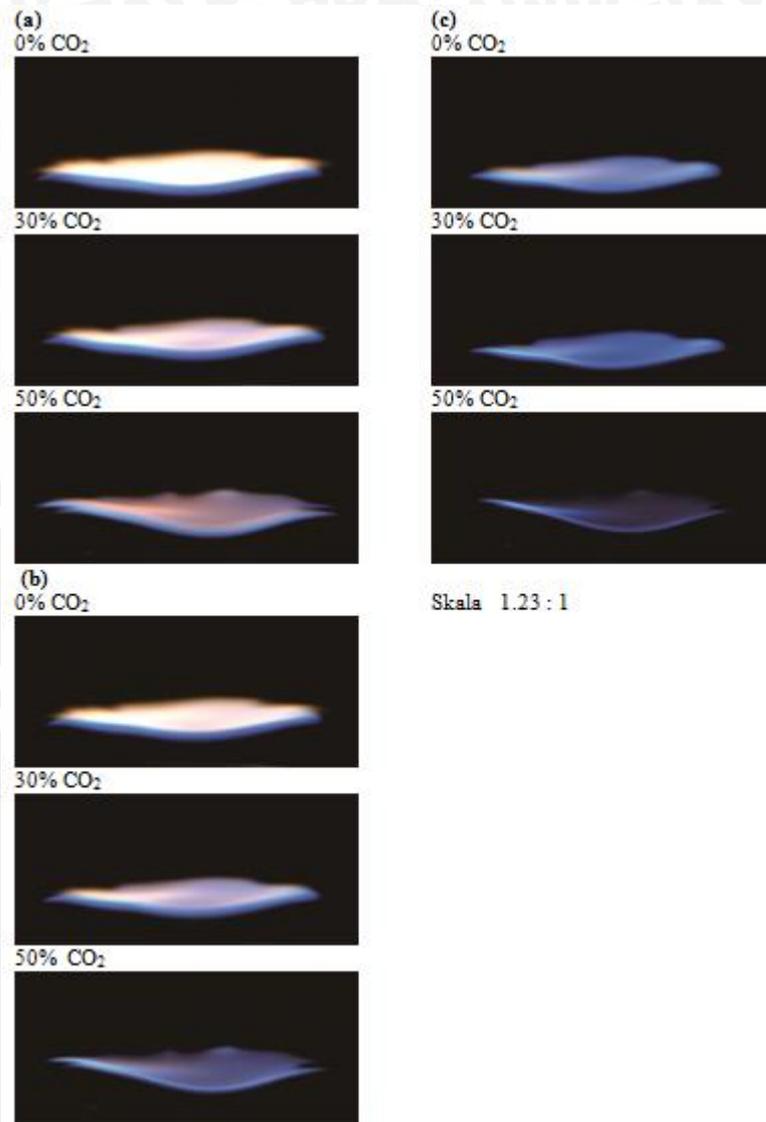


Gambar 2.1 Foto api debit 4 L/M (a) YO_2 0.233 (b) YO_2 0.276 (c) YO_2 0.314





Gambar 2.2 Foto api debit 8 L/M (a) YO₂ 0.314 (b) YO₂ 0.276 (c) YO₂ 0.233



Gambar 2.3 Foto api debit 12 L/M (a) YO_2 0.314 (b) YO_2 0.276 (c) YO_2 0.233

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

lebih besar akan terlihat api kuning semakin melebar seiring meningkatnya YO_2 . Ini dikarenakan dengan O_2 semakin bertambah maka kemungkinan bahan bakar yang ikut terbakar lebih banyak.

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



2.2 Biogas

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

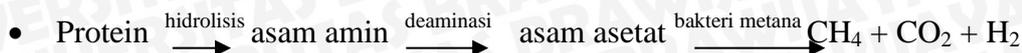
- Kondisi pembakaran mudah diatur
- Lebih mudah disalurkan dalam pipa
- Mampu menghasilkan efisiensi tinggi, karena kelebihan udara yang digunakan biasanya sedikit karena udara dan bahan bakar langsung bercampur dan terbakar.

2.2.1 Prinsip Pembentukan Biogas

Proses pembentukan biogas dilakukan secara fermentasi yaitu proses pembentukan gas Metana dalam kondisi anaerob dengan bantuan bakteri anaerob di dalam suatu digester sehingga dihasilkan gas Metana (CH₄) dan gas Karbondioksida (CO₂) yang volumenya lebih besar dari gas Hidrogen (H₂), gas Nitrogen (N₂) dan Asam sulfida (H₂S). Proses fermentasi memerlukan waktu 7 sampai 10 hari untuk menghasilkan biogas dengan suhu optimum 35 °C dan pH optimum pada range 6,4 – 7,9. Bakteri pembentuk biogas yang digunakan yaitu bakteri anaerob seperti *Methanobacterium*, *Methanobacillus*, *Methanococcus* dan *Methanosarcina* (Price dan Cheremisinoff, 1981).

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

- Polisakarida $\xrightarrow{\text{hidrolisis}}$ glukosa $\xrightarrow{\text{glikolisis}}$ asam asetat $\xrightarrow{\text{bakteri metana}}$ CH₄ + CO₂ + H₂
- Gliserol $\xrightarrow{\text{fosforilasi}}$ asam asetat $\xrightarrow{\text{bakteri metana}}$ CH₄ + CO₂ + H₂
- Lemak $\xrightarrow{\text{hidrolisis}}$ asam lemak $\xrightarrow{\beta\text{-oksidasi}}$ asam asetat $\xrightarrow{\text{bakteri metana}}$ CH₄ + CO₂ + H₂



Secara umum, reaksi pembentukan CH₄ adalah :



Sebagai contoh, pada pembuatan biogas dari bahan baku kotoran sapi yang banyak mengandung selulosa. Bahan baku dalam bentuk selulosa akan lebih mudah dicerna oleh bakteri anaerob. Reaksi biokimia pembentukan CH₄ dari kotoran sapi:



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

Tabel 2.1 Komposisi pada Biogas

No	Nama Gas	Rumus Kimia	Jumlah
1	Metana	CH ₄	54% - 70%
2	Karbon dioksida	CO ₂	27% - 45%
3	Nitrogen	N ₂	3% - 5%
4	Hidrogen	H ₂	1% - 0%
5	Karbon monooksida	CO	0,1%
6	Oksigen	O ₂	0,1%
7	Hidrogen Sulfida	H ₂ S	<1%

Sumber : L. Widiarto dan Sudarto, 1997

Gas yang timbul dari proses ini kemudian ditampung di dalam digester. Penumpukan produksi gas akan menimbulkan tekanan sehingga dapat disalurkan ke rumah melalui pipa. Gas yang dihasilkan tersebut dapat dipakai untuk memasak dengan kompor gas. Gas yang dihasilkan ini sangat baik untuk pembakaran karena mampu menghasilkan panas yang cukup tinggi, apinya berwarna biru, tidak berbau dan tidak berasap sehingga kebersihan rumah tetap terjaga.

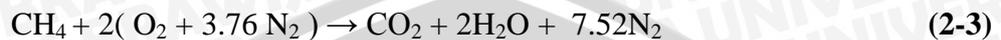


2.2.2 Karakteristik gas yang terkandung dalam biogas

a. Metana (CH₄)

Metana adalah hidrokarbon paling sederhana yang berbentuk gas dengan rumus kimia CH₄. Metana murni tidak berbau. Di dalam dunia industri untuk memudahkan dalam mendeteksi jika ada kebocoran biasanya diberi bau-bauan.

Rumus reaksi kimia reaksi dari Metana dapat ditulis sebagai berikut :



Adapun sifat dari metana adalah sebagai berikut:

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

b. Karbondioksida (CO₂)

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

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

c. Udara

Kandungan elemen senyawa gas dan partikel dalam udara akan berubah-ubah dengan ketinggian dari permukaan tanah. Demikian juga massanya, akan berkurang seiring dengan ketinggian. Semakin dekat dengan lapisan troposfer, maka udara semakin tipis, sehingga melewati batas gravitasi bumi, maka udara akan hampa sama sekali.

Dalam keadaan kering, komposisi gas yang mengisi atmosfer bumi adalah gas N₂ (78,0%), Gas O₂ (21,0%), gas Ar (0,9%), dan gas CO₂ (0,03%) dan gabungan gas-gas lainnya (0,07%). Makin tinggi lapisan udara, kandungan

gas yang ringan seperti gas H₂ semakin banyak, sedangkan gas yang lebih berat seperti N₂, O₂, dan Ar semakin berkurang.

No.	Unsur kimia	Lambang	Volume (%)
1	Netrogen / zat lemas	N ₂	78.08
2	Oksigen / zat pembakar	O ₂	20.95
3	Argon	Ar	0.93
4	Asam arang	CO ₂	0.03
5	Neon	Ne	0.0018
6	Helium	He	0.00015
7	Kripton	Kr	0.00011
8	Xenon	Xe	0.00005
9	Nitrous oksida	N ₂ O	0.00005
10	Hidrogen	H ₂	0.00005

d. Nitrogen (N₂)

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

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

e. Oksigen (O₂)

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

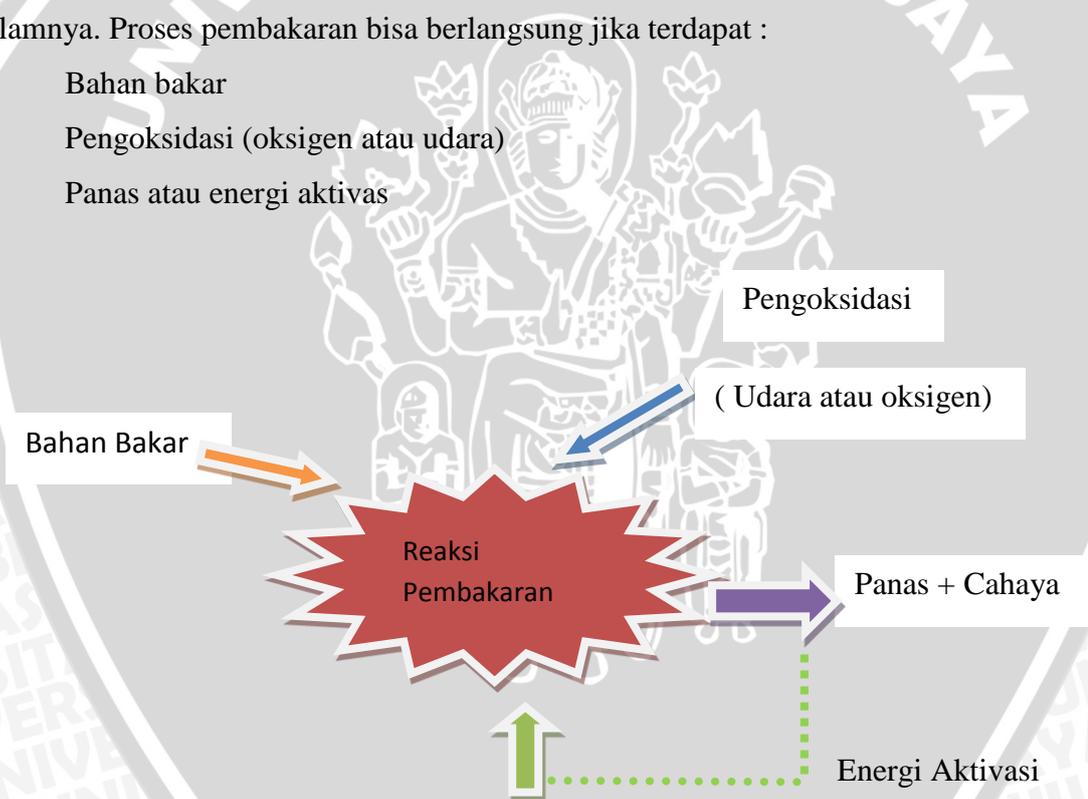
Densitas pada 25°C	:	1.31725 kg/m ³
Molar mass	:	32.06 kg/kmol

C_v : 0.661 kJ/kg.K
 C_p : 0.918 kJ/kg.K

2.3 Pengertian dan Reaksi Pembakaran

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

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



Gambar 2.4 Ilustrasi proses Pembakaran

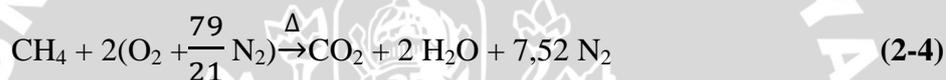
Sumber : Wardana (2008:1)

Energi panas dan cahaya diperlukan guna mengaktifkan molekul-molekul bahan bakar sehingga molekul tersebut menjadi bermuatan. Energi panas dan cahaya ini dapat disebut juga sebagai energi aktivasi.

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

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

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



Reaktan

Produk

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

2.3.1 Pembakaran Stoikiometri

Pembakaran stoikiometri adalah pembakaran dimana semua atom dari pengoksidasian bereaksi secara kimia untuk menjadi berbagai produk. Pada proses pembakaran selalu membutuhkan oksigen sebagai oksidatornya, sedangkan Oksigen sendiri didapat dari udara, dimana udara terdiri dari Oksigen, Nitrogen, Argon, Karbon dioksida, Uap air dan sejumlah gas dalam bagian yang cukup kecil. Komposisi dari udara kering dapat dilihat pada Tabel 2.4.

Tabel 2.2 Komposisi Udara kering

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

Sumber : Bayong (2004)

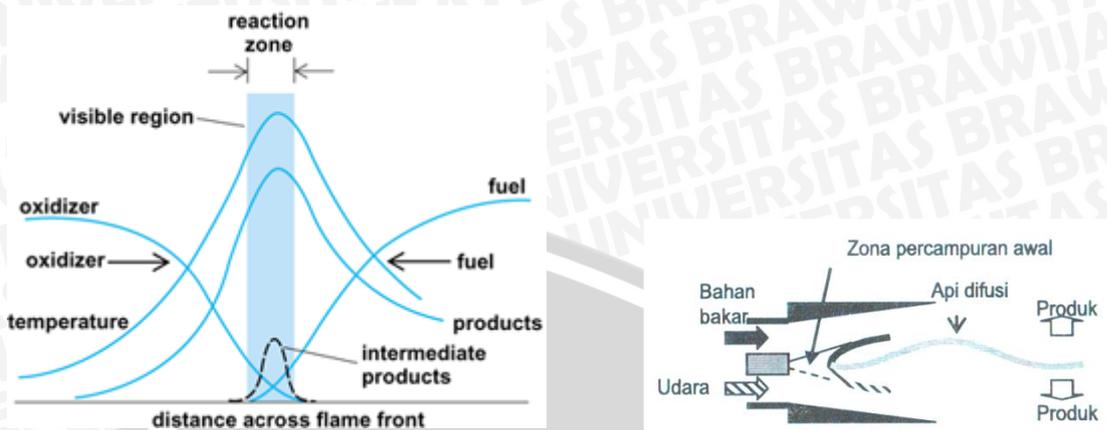
Untuk memudahkan perhitungan dalam reaksi pembakaran, maka untuk Oksigen dapat diasumsikan sebesar 21% dan 79% untuk Nitrogen. Oleh karena itu, pada reaksi pembakaran dengan udara, penggunaan 1 mol O₂ akan melibatkan penggunaan $\left(\frac{79,0}{21,0}\right) = 3,76$ mol N₂. Untuk dapat mencapai pembakaran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



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

2.4 Pembakaran Difusi

Pembakaran dapat dilakukan dengan cara premiks maupun difusi. Pembakaran dengan cara difusi adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan pengoksidasi (udara atau O₂) tidak dicampur secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Proses pembakaran difusi ini bisa dijumpai di berbagai proses pembakaran seperti nyala lilin, api kebakaran, pembakaran di turbin gas, serta pembakaran pada mesin diesel dan masih banyak lagi.



Gambar 2.5 Struktur api difusi

Sumber: Wardana:2008

Pada api difusi, panas yang dibangkitkan di dalam zona reaksi didifusikan keluar sehingga lebar distribusi temperatur hampir sama dengan lebar daerah difusi. Jika pencampuran bahan bakar dan udara (oksigen) dengan proses difusi ini mencapai kondisi mendekati stoikiometri, dan panas yang dilepas oleh api di daerah pencampuran tersebut sudah cukup maka pembakaran akan berlangsung. Namun, ketika konsentrasi udara di daerah pengoksidasi dan konsentrasi bahan bakar di daerah bahan bakar rendah, maka karena akibat pengaruh pendinginan dari luar, suhu pada daerah reaksi menjadi rendah dan api tidak akan terbentuk.

2.4.1 Struktur Aliran Reaktan Api Difusi

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

2.5 Karakteristik Nyala Api

2.5.1 Batas Mampu Nyala (*Flammability Limits*)

Pembakaran difusi akan berlangsung pada daerah dimana bahan bakar dan udara kemudian bercampur. Pemunculan dari nyala akan bergantung pada sifat dari bahan bakar dan kecepatan pancaran bahan bakar terhadap udara di sekitarnya. Pemunculan nyala api ini juga memiliki kisaran batas bawah atau biasa disebut campuran termiskin maupun kisaran batas atas atau biasa disebut campuran terkaya. Kisaran batas bawah terjadi jika pada kondisi campuran awal minimal akan terjadi nyala api kecil. Sedangkan untuk kisaran batas atas, jika dari kisaran batas bawah ditambahkan kembali aliran bahan bakar maka yang terjadi adalah nyala api akan berhenti menyebar. Hal ini disebabkan karena kapasitas panas dari campuran udara-bahan bakar yang naik namun temperatur nyala api berkurang dan konsentrasi bahan bakar yang ditambahkan tidak akan mampu untuk menyalakan gas yang ada di dekatnya dan hal tersebut akan berakibat nyala api berhenti menyebar.

Tabel 2.3 Batas mampu nyala api

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

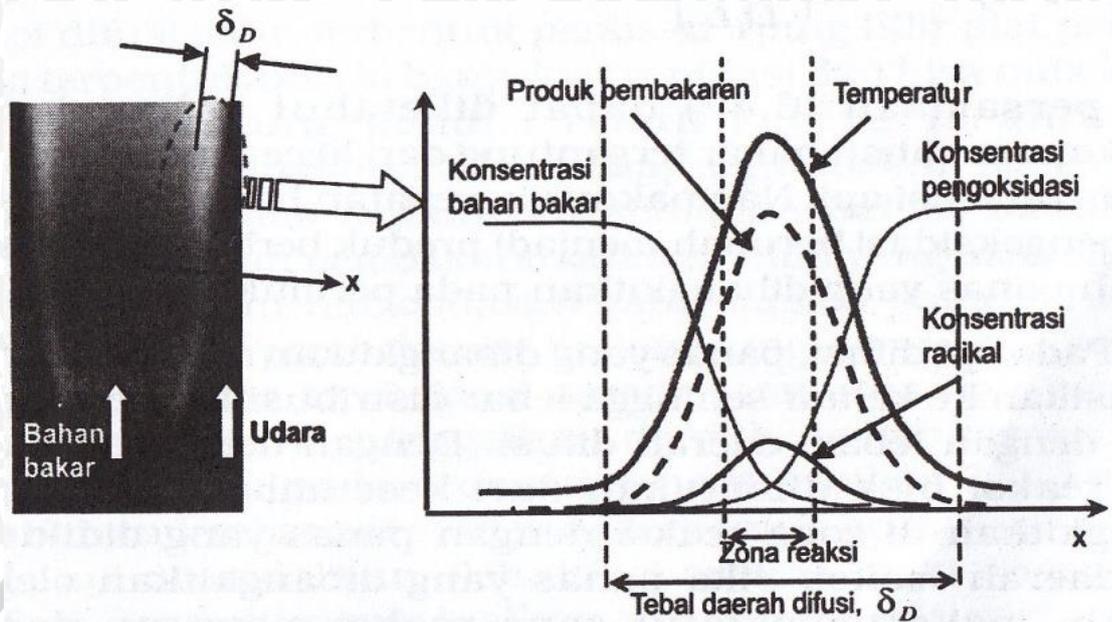
Sumber: H.F. Coward dan G.W. Jones, 503:1952

2.5.2 Warna Api

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

2.5.3 Lebar Api

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



Gambar 2.6 Lebar daerah api difusi

Sumber: Wardana:2008

2.5.4 Distribusi Temperatur

Distribusi temperatur diamati dengan cara radiasi panas yang dipancarkan. Radiasi panas adalah radiasi elektromagnetik akibat temperaturnya.

2.6 Inhibitor

Inhibitor adalah zat yang untuk menghambat atau menurunkan laju reaksi kimia, dalam hal ini reaksi kimia pembakaran. Molekul-molekul inhibitor akan terurai dan bekerja dengan mengganggu rantai reaksi kimia pembakaran, sehingga reaksi kimia pembakaran akan terhambat. Makin tinggi tingkat penguraian molekul inhibitor dan konsentrasi inhibitor akan makin memperlambat laju reaksi pembakaran (Karim, G.A. 1998)

2.7 Counter Flow Diffusion Flame

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

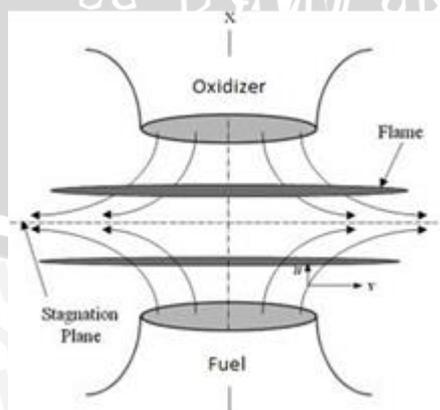
merupakan salah satu cara untuk mempelajari struktur api yang dipengaruhi oleh jenis kandungan bahan bakar, massa alir bahan bakar maupun karakteristik reaktan bahan bakar dan oksidator.



Gambar 2.7 Nyala api pada *counterflow burner*

Sumber : Particle And Combustion Engineering, Tsinghua University

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



Gambar 2.8 Skematik *Counterflow flame burner*

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

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

2.8 Hipotesis

Hipotesisnya adalah semakin besar kandungan CO₂ pada bahan bakar maka karakteristik yang terjadi pada api adalah api semakin berjelaga dan warna semakin gelap.

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

Pengaruh prosentase CO₂ terhadap distribusi temperatur juga mempengaruhi, semakin besar prosentase CO₂ maka semakin rendah temperatur api yang dihasilkan. Hal ini dikarenakan kandungan gas CO₂ sebagai gas inert dan inhibitor akan menahan asupan gas oksigen pada saat pembakaran berlangsung maka api yang timbul adalah api kaya (api dengan kandungan bahan bakar lebih banyak dari oksidatornya) sehingga CO₂ menyerap kalor hasil pembakaran.