

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Sasongko (2014) melakukan penelitian tentang pengaruh prosentase CO<sub>2</sub> terhadap karakteristik pembakaran difusi biogas. Berdasarkan hasil penelitiannya diperoleh bahwa jika kandungan CO<sub>2</sub> dalam biogas terus ditambah maka luas daerah warna api kuning yang dihasilkan dari pembakaran difusi dengan *counterflow burner* akan semakin berkurang.

Purwanto (2014) melakukan penelitian tentang karakteristik pembakaran premiks CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> dengan penambahan *gas mixer*. Berdasarkan hasil penelitiannya diperoleh bahwa kadar CO<sub>2</sub> mempengaruhi warna api yang dihasilkan, semakin tinggi kadar CO<sub>2</sub> maka warna api yang dihasilkan semakin biru transparan. Selain itu, adanya penambahan *gas mixer* mempengaruhi cepat rambat api dan pergeseran batas mampu nyala api ke arah kaya bahan bakar.

Putranto (2014) melakukan penelitian tentang pengaruh massa alir reaktan terhadap karakteristik pembakaran difusi CH<sub>4</sub>-CO<sub>2</sub> pada *counterflow burner*. Berdasarkan hasil penelitiannya didapatkan kesimpulan bahwa penambahan massa alir reaktan mengakibatkan tingkat kecerahan warna api dan lebar api yang dihasilkan semakin meningkat (terang). Penambahan konsentrasi CO<sub>2</sub> pada bahan bakar juga mempengaruhi warna api yang dihasilkan akan semakin gelap dan lebar api yang dihasilkan berkurang sebelum sampai akhirnya padam.

Hamidi (2013) melakukan penelitian tentang pengaruh kandungan CO<sub>2</sub> terhadap karakteristik pembakaran (*flammability characteristics*) biogas. Berdasarkan hasil penelitiannya didapatkan kesimpulan bahwa semakin tinggi kandungan CO<sub>2</sub> dalam biogas mengakibatkan penyempitan daerah mampu nyala dan penurunan kecepatan cepat rambat api. Kecepatan rambat api tertinggi pada keadaan stoikiometri campuran biogas dan udara tanpa CO<sub>2</sub>.

Wahyudi (2012) melakukan penelitian tentang pengaruh kadar karbondioksida (CO<sub>2</sub>) dan nitrogen (N<sub>2</sub>) pada karakteristik pembakaran gas metana. Berdasarkan hasil penelitiannya didapatkan kesimpulan bahwa kadar CO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub> yang dicampur pada bahan bakar bakar metana (CH<sub>4</sub>) mempengaruhi kecepatan rambat api. Kecepatan rambat api penyalaan bawah lebih cepat daripada penyalaan atas karena adanya pengaruh gaya apung yang besar.

Midiani (2011) melakukan penelitian tentang pengaruh inhibitor terhadap kecepatan rambat api pembakaran LPG. Berdasarkan hasil penelitiannya didapatkan kesimpulan bahwa penambahan konsentrasi inhibitor CO<sub>2</sub> akan mempengaruhi cepat rambat api. Kecepatan rambat api maksimum pada campuran yang diberikan tambahan inhibitor berupa CO<sub>2</sub> berada dibawah kecepatan rambat api maksimum campuran tanpa penambahan inhibitor CO<sub>2</sub>.

Chang (2011) melakukan penelitian tentang karakteristik kestabilan api difusi campuran CH<sub>4</sub> dan CO. Berdasarkan hasil penelitiannya didapatkan kesimpulan bahwa pengaruh penambahan CO menyebabkan api mengalami *lift off* pada keadaan dimana semakin banyak CO yang ditambahkan pada bahan bakar metana sampai api mendekati padam maka jarak *lift off* api akan semakin tinggi.

## 2.2 Biogas

Biogas merupakan salah satu contoh bahan bakar alternatif terbarukan yang berpotensi untuk diproduksi dan dikembangkan pada era krisis energi fosil seperti saat ini. Biogas adalah gas yang dihasilkan dari fermentasi anaerob oleh bakteri anaerob *Methanobacterium sp* terhadap bahan organik seperti sampah organik, limbah rumah tangga organik, dan kotoran hewan ternak. Fermentasi anaerob berarti tidak ada udara yang masuk ke dalam reaktor atau dengan kata lain berlangsung pada keadaan tertutup.

Biogas dapat diperbarui karena terbentuk dari pembusukan sampah dan limbah organik yang mudah kita temukan di lingkungan sekitar kita. Pemanfaatan biogas secara optimal akan membantu mengurangi efek rumah kaca dan mengurangi biaya untuk konsumsi bahan bakar minyak sehingga dapat membantu masyarakat dalam mengatasi masalah mahalannya harga bahan bakar minyak.

### 2.2.1 Komposisi Kandungan Biogas

Komposisi kandungan biogas yang utama adalah gas metana (CH<sub>4</sub>) dan gas karbon dioksida (CO<sub>2</sub>). Komponen lainnya yang ditemukan terdapat dalam kisaran konsentrasi yang kecil antara lain gas hidrogen (H<sub>2</sub>), gas nitrogen (N<sub>2</sub>), gas hidrogen sulfida (H<sub>2</sub>S), dan gas karbon monoksida (CO). Untuk lebih lengkapnya dapat dilihat dalam tabel 2.1 prosentase jumlah komposisi biogas mulai dari yang terbesar sampai yang terkecil.

Tabel 2.1 Komposisi biogas

No	Nama Gas	Rumus Kimia	Jumlah
1	Metana	CH <sub>4</sub>	55 % - 75 %
2	Karbon dioksida	CO <sub>2</sub>	25 % - 45 %
3	Nitrogen	N <sub>2</sub>	1 % - 5 %
4	Hidrogen	H <sub>2</sub>	0 % - 3 %
5	Hidrogen Sulfida	H <sub>2</sub> S	0,1 % - 0,5 %
6	Karbon monoksida	CO	0 % - 0,3 %

Sumber : Karellas et.al (2010)

Metana (CH<sub>4</sub>) adalah hidrokarbon paling sederhana dan paling ringan. Beberapa kelebihan bahan bakar gas seperti metana ini misalnya dibanding bahan bakar yang lain adalah bahan bakar ini dapat terbakar tanpa adanya asap dan bau polutan. Selain itu proses pembakarannya juga bisa mendekati sempurna dengan persen kelebihan udara sangat kecil. Adapun sifat gas metana dapat dilihat dalam tabel 2.2 dibawah ini :

Tabel 2.2 Properti gas metana (CH<sub>4</sub>)

BESARAN	HARGA BESARAN
Massa molar	16,04 kg/kmol
Densitas pada suhu 25 °C ( $\rho$ )	0,6604 kg/m <sup>3</sup>
Konstanta gas (R)	0,5182 kJ/(kg.°K)
Kalor spesifik pada tekanan konstan (Cp)	2,226 kJ/(kg.°K)
Kalor spesifik pada <i>volume</i> konstan (Cv)	1,708 kJ/(kg.°K)

Sumber : Cengel and Cimbula "Fluid Mechanics fundamental and Application" Table A-1 Page 886, Table A-10 Page 895)

### 2.2.2 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 (Chakraborty et. al, 1975)

Dalam penelitian ini akan digunakan karbondioksida sebagai *inhibitor* yang merupakan gas penghambat reaksi pembakaran yang efektif. Hal ini dikarenakan gas karbondioksida akan mengabsorpsi energi panas dari produk gas pembakaran. Selain itu karbondioksida memiliki properti dan sifat fisika yang ditunjukkan pada tabel 2.3 :

Tabel 2.3 Properti gas karbondioksida (CO<sub>2</sub>)

BESARAN	HARGA BESARAN
Massa molar	44,01 kg/kmol
Densitas pada suhu 25 °C ( $\rho$ )	1,6658 kg/m <sup>3</sup>
Konstanta gas (R)	0,1889 kJ/(kg.°K)
Kalor spesifik pada tekanan konstan (Cp)	0,844 kJ/(kg.°K)
Kalor spesifik pada <i>volume</i> konstan (Cv)	0,655 kJ/(kg.°K)

Sumber : *Cengel and Cimbula "Fluid Mechanics fundamental and Application" Table A-1 Page 886, Table A-10 Page 895)*

### 2.3 Reaksi Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia antara bahan bakar dan pengoksidator (oksigen atau udara) yang diberikan energi aktivasi lalu menghasilkan energi kalor dan cahaya.

Sesuai dengan gambar 2.1 proses pembakaran bisa berlangsung jika ada :

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



Gambar 2.1 Ilustrasi proses pembakaran  
Sumber : Wardana (2008:3)

Ada dua hal yang sangat penting dan harus dipenuhi agar proses pembakaran bisa berlangsung yaitu :

- Kesetimbangan massa
- Kesetimbangan energi

Kesetimbangan massa atau yang sering disebut stoikiometri oleh para ahli kimia berasal dari bahasa Yunani *stoicheion* yang berarti elemen atau prinsip utama. Sedangkan kesetimbangan energi dalam pembakarana adalah turunan sari prinsip – prinsip termokimia.

### 2.3.1 Pembakaran Stoikiometri

Pembakaran stoikiometri adalah reaksi kimia atom dan pengoksidasinya menjadi produk. Udara adalah pengoksidasi umum yang diasumsikan terdiri dari 21% oksigen dan 79 % nitrogen (fraksi mol atau *volume*). Reaksi kimia pembakaran  $\text{CH}_4 + \text{CO}_2$  dengan udara :



Tanda panah menunjukkan arah perubahan dari reaktan menjadi produk dengan memanfaatkan kalor untuk reaksi kimia. Kemudian seimbangkan atom C, H, O, dan N satu per satu pada persamaan reaksi kimia antara reaktan dan produk yang dihasilkan. Cara yang digunakan untuk menyeimbangkan reaksi kimia pembakaran adalah sebagai berikut :

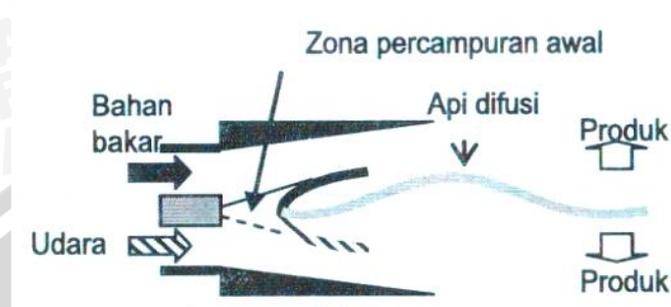
1. Tuliskan persamaan reaksi tanpa koefisien. (persamaan 2-1).
2. Buat daftar atom sesuai persamaan sebelum dan sesudah reaksi.
3. Periksa jumlah atom masing-masing sebelum dan sesudah reaksi.
4. Seimbangkan atom sebelah kiri dan kanan dengan menyamakan koefisiennya.
5. Jika diperlukan sederhanakan koefisien tersebut sampai angka terendah.

Keadaan setimbang dari persamaan reaksi kimia 2-1 dapat kita lihat pada persamaan 2-2 berikut ini :



### 2.3.2 Pembakaran Difusi

Pembakaran dapat dilakukan dengan cara premiks maupun difusi. Pembakaran dengan cara difusi adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan pengoksidasi (udara atau  $O_2$ ) tidak bercampur sebelum terbakar namun bercampur pada zona reaksi secara alami akibat adanya difusi molekul.



Gambar 2.2 Pembakaran difusi  
Sumber : Wardana (2008)

Pada pembakaran difusi bahan bakar tidak dicampur dengan oksidator. Bahan bakar mengalir masuk ke dalam ruang bakar, kemudian dengan adanya penambahan energi aktivasi membuat bahan bakar bereaksi dengan udara dari lingkungan sekitar yang berfungsi sebagai oksidator sehingga menghasilkan nyala api. Difusi terjadi karena bercampurnya suatu gas terhadap gas lainnya akibat sifat kinetiknya. Difusi terjadi dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah dengan konsentrasi yang lebih rendah.

## 2.4 Gas

### 2.4.1 Sifat Fisik dan Teori Kinetik Gas

Berikut ini adalah sifat – sifat fisik secara umum dari berbagai macam gas :

- *Volume* dan bentuk gas menyesuaikan dengan wadahnya.
- Materi lebih mudah dimampatkan dibanding zat cair dan zat padat.
- Akan bercampur secara merata dan sempurna jika ditempatkan pada suatu wadah yang sama.
- Memiliki kerapatan yang jauh lebih rendah dibanding dengan cairan atau padatan.

(Raymond Chang 2005 : 124)

Inti dari teori kinetik molekul gas adalah asumsi - asumsi berikut :

- Gas terdiri dari molekul – molekul yang satu dengan lainnya dipisahkan oleh jarak yang lebih besar dari ukurannya sendiri.

- Molekul – molekul gas selalu bergerak secara terus menerus dengan arah yang tak tentu sehingga antara satu molekul dan molekul lainnya sering terjadi tumbukan.
- Molekul – molekul gas tidak mengalami gaya tarik – menarik maupun gaya tolak – menolak antara satu dengan lainnya.
- Energi kinetik rata – rata molekul berbanding lurus dengan temperatur gas dalam kelvin.

(Raymond Chang 2005 : 142)

### 2.4.2 Hukum - Hukum Gas

Hukum –hukum yang berkaitan dengan gas antara lain :

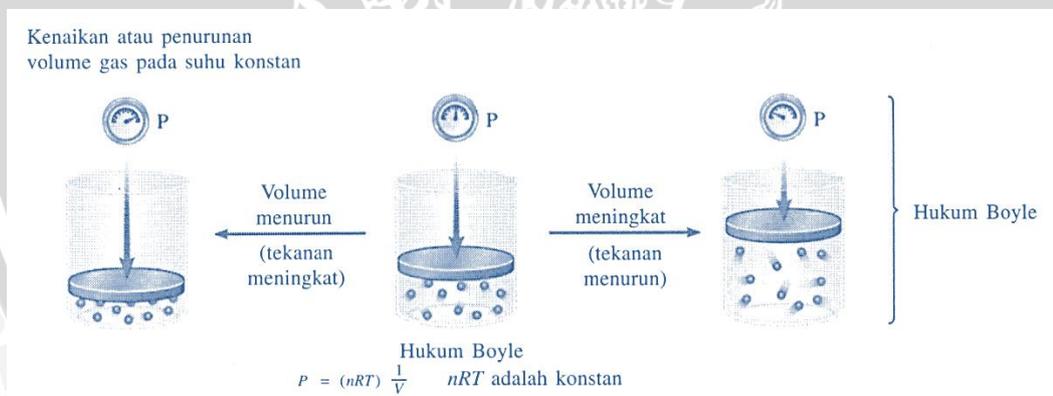
#### 1. Hukum Boyle :

$$P = (nRT) \frac{1}{V} \quad ; nRT \text{ adalah konstan} \quad (2-3)$$

“*volume* berbanding terbalik terhadap tekanannya (pada T dan n konstan)”

Keterangan :

P	: tekanan absolut gas (atm)	T	: temperatur (°K)
V	: volume (m <sup>3</sup> )	R	= k.No
n	: jumlah mol (g/mol)	k	: konstanta Boltzman (1,38x10 <sup>-23</sup> J/°K)
R	: konstanta gas (8,31 J/mol.°K)	No	: Bilangan Avogadro (6,02x10 <sup>-23</sup> /mol)



Gambar 2.3 Ilustrasi Hukum Boyle  
Sumber : Raymond Chang (2005)

Berdasarkan hukum pada persamaan 2-3 nilai tekanan (P) berbanding terbalik dengan besarnya nilai *volume* (V). Semakin besar *volume* suatu gas pada temperatur (T) yang sama maka semakin kecil tekanannya. Sebaliknya semakin kecil *volume* suatu gas pada temperatur (T) yang sama maka semakin besar tekanannya.

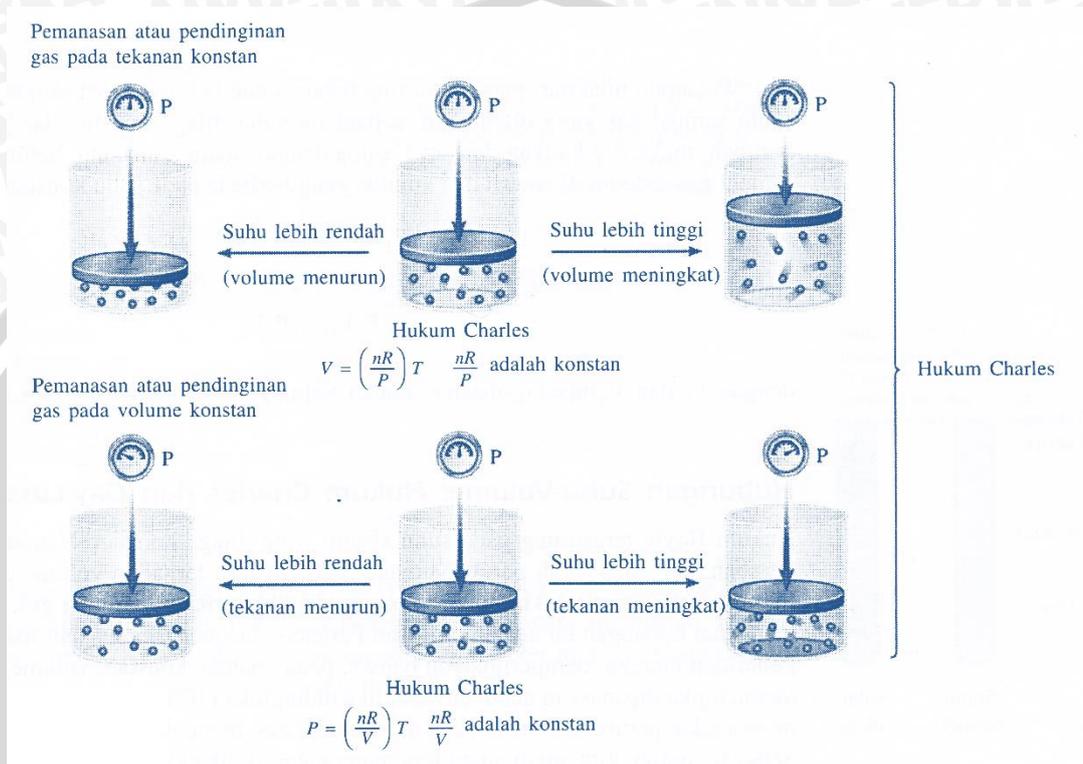
2. Hukum Charles :

$$V = \left(\frac{nR}{P}\right)T \quad ; \quad \frac{nR}{P} \text{ adalah konstan} \quad (2-4)$$

“*volume* berbanding lurus dengan suhu (pada P dan n konstan)”

$$P = \left(\frac{nR}{V}\right)T \quad ; \quad \frac{nR}{V} \text{ adalah konstan} \quad (2-5)$$

“tekanan berbanding lurus dengan suhu (pada V dan n konstan)”



Gambar 2.4 Ilustrasi Hukum Charles  
 Sumber : Raymond Chang (2005)

Berdasarkan hukum pada persamaan 2-4 nilai *volume* (V) berbanding lurus dengan besarnya nilai temperatur (T). Semakin tinggi temperatur suatu gas pada tekanan (P) yang sama maka semakin besar *volumenya*. Sebaliknya semakin rendah temperatur suatu gas pada tekanan (P) yang sama maka semakin kecil *volumenya*.

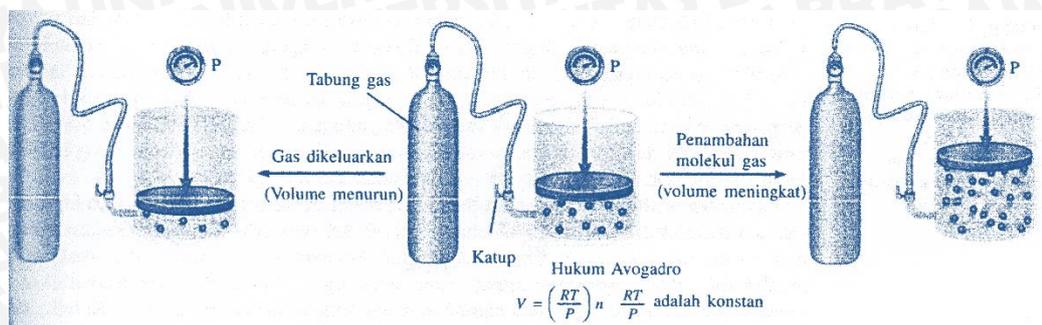
Berdasarkan hukum pada persamaan 2-5 nilai tekanan (P) berbanding lurus dengan besarnya nilai temperatur (T). Semakin tinggi temperatur suatu gas pada *volume* (V) yang sama maka semakin besar tekanannya. Sebaliknya semakin rendah temperatur suatu gas pada *volume* (V) yang sama maka semakin kecil tekanannya.

3. Hukum Avogadro :

$$V = \left(\frac{RT}{P}\right)n \quad ; \quad \frac{RT}{P} \text{ adalah konstan} \quad (2-6)$$



“Gas – gas pada *volume* yang sama mengandung jumlah molekul yang sama (pada T dan P yang sama)”



Gambar 2.5 Ilustrasi Hukum Avogadro  
 Sumber : Raymond Chang (2005)

Berdasarkan hukum pada persamaan 2-6 nilai *volume* (V) berbanding lurus dengan besarnya jumlah molekul (n). Semakin banyak jumlah molekul suatu gas pada temperatur (T) dan tekanan (P) yang sama maka semakin besar *volumenya*. Sebaliknya semakin sedikit jumlah molekul suatu gas pada temperatur (T) dan tekanan (P) yang sama maka semakin kecil *volumenya*.

### 2.4.3 Difusi Gas

Difusi merupakan pencampuran antara molekul suatu gas dengan molekul gas lainnya yang terjadi akibat pengaruh dari energi kinetiknya. Difusi berlangsung dari daerah dengan konsentrasi tinggi ke daerah yang memiliki konsentrasi lebih rendah. Proses difusi memerlukan waktu yang lambat karena pergerakan dari molekul – molekul itu sendiri tidak beraturan arahnya sehingga memungkinkan adanya tumbukan dengan molekul lain ketika bergerak dan menyebabkan arah geraknya berubah ke arah lain.

### 2.4.4 Pengadukan dan Pemanasan Reaktan

Pengadukan campuran dua gas atau lebih dapat dilakukan dengan menggunakan *gas mixer*. Pengadukan berlangsung secara mekanik dengan bantuan putaran fan yang ada di dalam *gas mixer*. Sebuah *gas mixer* digunakan untuk mengaduk campuran CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub> secara mekanik agar molekul-molekul dari kedua gas tersebut dapat tercampur secara merata. Dalam penelitian ini gas CH<sub>4</sub> memiliki densitas lebih kecil dari gas CO<sub>2</sub>.

Jika keduanya dicampur kemungkinan yang terjadi adalah gas  $\text{CH}_4$  berada diatas dan  $\text{CO}_2$  dibawah. Penjabaran densitas ditunjukkan pada persamaan 2-7.

$$\rho = m \cdot V \quad (2-7)$$

Keterangan :

$\rho$  : densitas ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $m$  : massa (kg)  
 $V$  : volume ( $\text{m}^3$ )

Pada penelitian ini juga dilakukan pemanasan awal terhadap reaktan yang terdiri dari campuran  $\text{CH}_4 - \text{CO}_2$ . Pemanasan dilakukan dengan menggunakan bantuan *heater*. Pemanasan yang dilakukan terhadap campuran  $\text{CH}_4 - \text{CO}_2$  membuat densitas dari kedua gas tersebut menurun dan semakin ringan dan akan meningkatkan gerak dari molekul – molekul reaktan pada *burner* menjadi lebih cepat sehingga memaksimalkan tinggi api hasil pembakaran.

## 2.5 Nyala Api

Terdapat 2 klasifikasi pembakaran menurut mekanisme pencampuran udara dan bahan bakar, yaitu pembakaran premiks dan pembakaran difusi. Kedua jenis pembakaran ini menghasilkan nyala api yang berbeda. Nyala api premiks dihasilkan dari pembakaran dimana udara dan bahan bakar dicampur terlebih dahulu sebelum masuk ke ruang bakar, contohnya kendaraan bermotor yang menggunakan karburator untuk mencampur bahan bakar dan udara sebelum dibakar. Nyala api difusi dihasilkan dari pembakaran dimana bahan bakar dan udara tidak bercampur terlebih dahulu sebelum masuk ke ruang bakar, melainkan bercampur sendiri secara difusi setelah terbakar di ruang bakar.

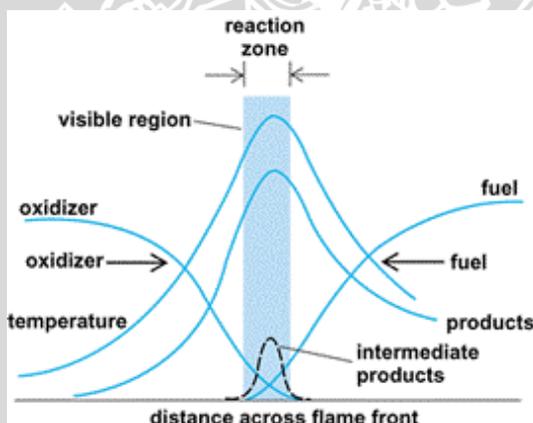
Kerucut api pada bunsen ada dua yaitu kerucut bagian dalam (yang dekat dengan ujung *burner*) merupakan kerucut api premiks dan kerucut terluar (yang jauh dari ujung *burner*) merupakan kerucut api difusi. Kerucut difusi bagian luar terbentuk karena adanya sebagian bahan bakar yang belum terbakar habis pada daerah kerucut api premiks sehingga bereaksi kembali dengan udara lingkungan sekitar secara difusi.

### 2.5.1 Api Difusi

Sebelum api difusi terbentuk bahan bakar dan udara bercampur di daerah pencampuran awal dan terbakar membentuk api premiks sebagian. Api premiks pada

sisi bahan bakar menjadi api kaya bahan bakar dan yang di sisi udara menjadi kaya udara atau miskin bahan bakar. Api difusi tidak bisa merambat menuju ke bahan bakar karena kekurangan oksigen begitupun sebaliknya tidak bisa merambat ke udara karena kekurangan bahan bakar. Jadi posisi api difusi adalah pada daerah campuran udara dan bahan bakar stoikiometri.

Pembakaran difusi adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan oksidator (udara atau oksigen) tidak dicampur secara mekanik, melainkan bercampur sendiri secara alami dengan proses difusi. Campuran bahan bakar dan udara akan terbakar secara difusi apabila kondisinya mencapai stoikiometri dan panas yang cukup (Wardana, 2008:182). Akan tetapi ketika konsentrasi udara (pengoksidasi) dan bahan bakar rendah maka pembakaran tidak akan terjadi. Oleh karena itu ketepatan jumlah aliran antara bahan bakar dengan pengoksidasi (udara/oksigen) menjadi sangat penting agar api difusi dapat tercipta. Contoh pembakaran difusi yaitu terdapat pada pembakaran turbin gas, nyala api pada lilin, pembakaran pada mesin diesel, dan masih banyak lagi.



Gambar 2.6 Struktur Api Difusi  
Sumber : Wardana (2008;183)

Panas yang dihasilkan di dalam zona reaksi didifusikan ke keluar sehingga lebar distribusi temperatur hampir sama dengan lebar zona difusi. Menentukan temperatur zona difusi dapat ditentukan dengan cara kesetimbangan panas, yaitu panas yang dibangkitkan di zona reaksi dengan panas yang didifusikan ke luar zona reaksi. Panas yang dibangkitkan berbanding lurus dengan temperaturnya. Jika panas yang dibangkitkan rendah maka temperatur zona reaksi juga rendah (dapat dilihat pada gambar 2.6). Ini dapat mengakibatkan proses pembakaran akan terhenti.

### 2.5.2 Warna Api

Warna api adalah panjang gelombang dari getaran ion yang dominan di api. Warna api bahan bakar hidrokarbon hasil dari pembakaran sempurna umumnya berwarna biru yang menandakan bahwa proses pembakaran didominasi pembentukan ion CH. Jika pembakaran tidak sempurna, karena kekurangan oksigen, maka sebagian karbon tidak terbakar dan bergetar pada panjang gelombang tertentu sehingga api berwarna merah kekuningan.

Warna merah kekuningan menandakan terbentuknya jelaga dari proses pembakaran difusi. Jelaga terbentuk pada daerah yang mengandung bahan bakar berlebih atau kaya bahan bakar. Pembentukan jelaga ini disebabkan karena bahan bakar yang belum terbakar habis terus bereaksi dengan udara dari lingkungan sekitar. Semakin banyak jumlah bahan bakar yang berlebih maka semakin tinggi jelaga yang dihasilkan.

### 2.5.3 Tinggi Api

Tinggi api mencapai nilai tertinggi pada kondisi stoikiometri, dan semakin memendek jika campuran reaktan semakin jauh dari stoikiometri. Pada api campuran miskin ujung api cenderung menutup (menguncup) sedangkan pada campuran kaya ujung api cenderung terbuka.

Tinggi api juga dipengaruhi oleh konsentrasi bahan bakar ( $\text{CH}_4$ ). Semakin tinggi konsentrasi bahan bakar ( $\text{CH}_4$ ) api yang dihasilkan akan semakin tinggi karena semakin banyak udara yang disuplai untuk setiap kilogram bahan bakar.

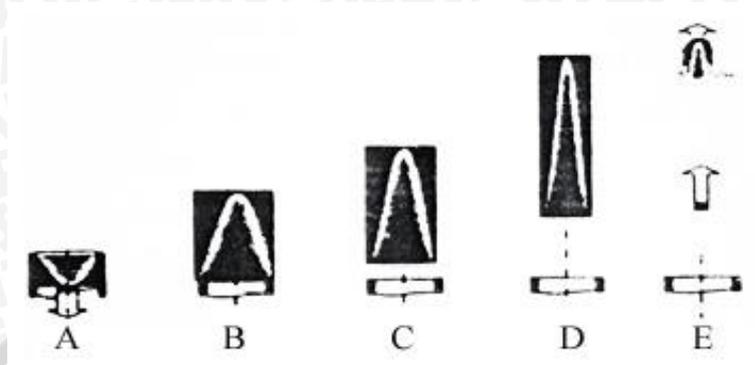
Massa alir juga mempengaruhi tinggi api yang dihasilkan pada *burner*. Besarnya massa alir berbanding lurus dengan tinggi api. Semakin besar massa alir reaktan semakin tinggi juga api yang dihasilkan. Semakin besar massa alir reaktan juga menyebabkan api yang dihasilkan menjadi turbulen.

Diameter dalam *burner* juga mempengaruhi tinggi api yang dihasilkan. Dengan massa alir reaktan yang sama, semakin kecil diameter *burner* semakin tinggi api yang dihasilkan. Kenaikan tinggi api terjadi karena kecepatan reaktan meningkat akibat perubahan luas penampang saluran yang semakin kecil.

### 2.5.4 Kestabilan Api

Dalam proses pembakaran, kestabilan nyala api memegang peranan yang sangat penting. Tingkat kestabilan nyala api sangat berhubungan dengan fenomena *flashback*,

*lift off*, dan *blow off* seperti terlihat pada gambar 2.7 dimana mekanisme kestabilan api juga berkaitan erat dengan kecepatan reaktan dan kecepatan pembakaran laminer. Oleh karena itu, perencanaan dalam proses pembakaran gas menjadi sangat penting.



Gambar 2.7 (A) *flashback*, (B) stabil, (C) *lift off*, (D) *lifted*, (E) *blow off*  
Sumber: Wardana (2008:169)

*Flashback* adalah api merambat masuk kembali ke dalam tabung *burner* seperti terlihat pada Gambar 2.7 (A). *Flashback* terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih cepat dari kecepatan reaktan. Fenomena ini dinamakan *back fire* atau *light back*. *Flashback* sangat berbahaya karena api bergerak mendekati sumber bahan bakar dan dapat menyebabkan terjadinya ledakan.

*Lift off* adalah permukaan bawah api tidak menyentuh ujung *burner*, tapi stabil pada jarak tertentu dari ujung *burner* seperti terlihat pada Gambar 2.7 (C). Kondisi ini sangat tergantung pada sifat aliran di dekat ujung *burner*. Pada kecepatan rendah, api mendekati ujung *burner* dan menyentuhnya. Peningkatan kecepatan reaktan lebih lanjut menyebabkan jarak permukaan bawah api semakin jauh dari ujung *burner* dan terus bergerak ke atas (*lifted*).

*Blow off* adalah suatu keadaan dimana nyala api sebelum padam akibat dari kecepatan aliran reaktan lebih besar dari kecepatan pembakaran. Kondisi seperti ini disebabkan karena campuran bahan bakar yang miskin.

### 2.5.5 Massa Alir Gas

Massa alir gas adalah banyaknya massa gas yang mengalir setiap satuan waktu. Massa alir gas dipengaruhi oleh debit dan densitas gas. Gas memiliki besar nilai densitas yang berbeda antara satu gas dengan gas yang lain. Hubungan antara debit dan densitas gas terhadap besarnya nilai massa alir tersebut ditunjukkan seperti pada persamaan 2-8 dibawah ini.

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (2-8)$$

Keterangan :

$\dot{m}$  = massa alir gas (kg/s)

$Q$  = debit gas (m<sup>3</sup>/s)

$\rho$  = densitas gas (kg/m<sup>3</sup>)

Nilai densitas :

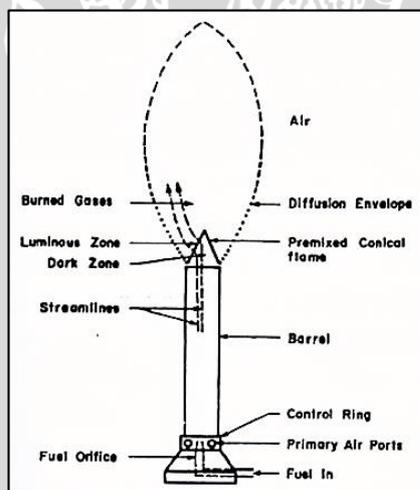
$\rho$  Metana = 0.6560 kg/m<sup>3</sup>

$\rho$  Karbon dioksida = 1.7994 kg/m<sup>3</sup>

( Sumber : Cengel and Cimbula "Fluid Mechanics fundamental and Application" Table A-10 Page 895)

## 2.6 Burner

Pada sekitar tahun 1855 pembakaran api dengan media *burner* dikenalkan oleh Bunsen. *Bunsen burner* merupakan pengembangan dari Robert William Bunsen (1811-1899) yang memiliki prinsip kerja menggunakan pengaturan aliran udara campuran udara dan bahan bakar gas secara kontinyu. Skema *bunsen burner* ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Bunsen burner  
Sumber: Kuo (1992:190)

Bahan bakar gas masuk kedalam *burner* melalui saluran masuk di bagian bawah *burner*. Terdapat dua buah saluran input yang akan digunakan untuk memasukkan dua gas yang berbeda. Dalam penelitian ini gas yang dimasukkan ke saluran bawah *burner* adalah gas CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub>. Saat aliran campuran CH<sub>4</sub> dan CO<sub>2</sub> diberi energi panas yang cukup (*minimum ignition energi*), maka campuran dengan konsentrasi atau disebut

dengan kualitas campuran tertentu akan mulai bereaksi dan seterusnya menyala dengan menghasilkan cahaya luminous yang dapat terlihat sebagai nyala api (*flames*). Selama laju perubahan reaksi konsentrasi reaktan (*rate of reaction*) serta laju aliran gas  $\text{CH}_4$  dan  $\text{CO}_2$  dipertahankan konstan, maka nyala api akan tetap stabil.

Pada daerah luminous terjadi reaksi dan pelepasan energi panas (*eksoterm*) sebagai entalpi gas yang terbakar, sedangkan dibawahnya terdapat daerah gelap (*dark zone*), yaitu tempat dimana molekul gas yang belum terbakar berubah alirannya dari arah sejajar sumbu tabung pembakar kearah luar tegak lurus permukaan batas daerah gelap. Selanjutnya gas yang belum terbakar mendapat energi panas sepanjang daerah pemanasan awal (*preheating zone*:  $\eta_0$ ) sampai temperatur nyala (*ignition temperature*:  $T_i$ ) tercapai dan kemudian bereaksi dengan cepat sepanjang tebal daerah (*reaction zone*:  $\eta_R$ ), disertai pelepasan energi panas yang lebih besar hingga mencapai temperature nyala api (*flame temperature*:  $T_F$ ).

## 2.7 Hipotesa

Pada proses pembakaran bahan bakar gas metana ( $\text{CH}_4$ ) dengan penambahan gas karbondioksida ( $\text{CO}_2$ ) sebagai inhibitor, jika kadar  $\text{CO}_2$  yg dicampur pada bahan bakar jumlahnya sedikit (kaya bahan bakar) maka api yang dihasilkan akan berwarna kuning, jika kadar  $\text{CO}_2$  terus ditambah maka warna api akan semakin biru sampai pada batas mampu nyala maksimal kemudian akan mengalami *lift off* sampai padam.

Campuran  $\text{CH}_4$  dan  $\text{CO}_2$  yang dilewatkan ke *gas mixer* dan *heater* sebelum dibakar akan meningkatkan energi kinetik dari molekul-molekul kedua gas tersebut dan membuat densitasnya semakin kecil serta meningkatkan gaya apung sehingga api kuning dan biru yang dihasilkan akan lebih tinggi karena adanya peningkatan laju reaktan.