

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Dhiputra et al (2008) melakukan penelitian mengenai temperatur *ring* pada fenomena *flame lift-up*. Dari penelitian tersebut menggunakan dua jenis material yang berbeda yakni keramik dan *stainless steel* dan empat variasi ketinggian yakni 10 mm, 20 mm, 30 mm dan 40 mm dari *lip burner*. Hasil dari penelitian tersebut dapat disimpulkan bahwa temperatur pada *ring* juga mempengaruhi fenomena *flame lift-up*. Temperatur ring dengan bahan *stainless steel* lebih tinggi dibandingkan dengan *ring* dengan bahan keramik. Diketahui juga jika temperatur pada *ring* berpengaruh pada AFR terjadinya *flame lift-up* yakni AFR pada aliran bahan bakar sebanding dengan pada temperatur *ring*. Semakin dekat posisi *ring* pada *burner* maka AFR semakin tinggi. Selain itu laju aliran bahan bakar cenderung tidak mempengaruhi temperatur *ring* karena telah diimbangi dengan laju aliran udara.

Janwar (2016) melakukan penelitian mengenai karakteristik nyala api laminar pada proses pembakaran *premix* menggunakan metode *bunsen burner* dan *slot burner* dengan bahan bakar LPG. Pada penelitian tersebut, ukuran dari diameter *bunsen burner* adalah 6 mm dan ukuran celah dari *slot burner* adalah 3 mm × 9 mm. *Equivalence ratio* campuran bahan bakar dan udara yang digunakan dalam penelitian tersebut sebesar 0,67; 0,81; 0,89; 1,07; 1,34 dan 2,2. Hasil dari penelitian tersebut menunjukkan bahwa kecepatan nyala api laminar pada *slot burner* lebih tinggi dari *bunsen burner*, tinggi nyala api pada *bunsen burner* lebih tinggi dari *slot burner* dan temperatur yang dihasilkan pada nyala api *slot burner* lebih tinggi dari *bunsen burner*.

Hariato dan Kawono (2015) melakukan penelitian mengenai pengaruh pencampuran gas H₂O pada gas LPG secara *premix* terhadap bentuk nyala api *bunsen burner*. Pada penelitian tersebut menggunakan variasi pencampuran gas HHO pada gas LPG yakni sebesar 0%, 25% dan 50% volume *flowrate* dan menggunakan persamaan $\alpha = \text{HHO}/(\text{HHO} + \text{LPG})$. Hasil dari penelitian tersebut disimpulkan bahwa besarnya persentase campuran akan menyebabkan panjang nyala api berkurang dan lebar nyala api bertambah.

Pranoto (2012) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi *Air Fuel Ratio* (AFR) terhadap karakteristik nyala api pada pembakaran *premix* dengan bahan minyak kapuk pada *burner*. Hasil dari penelitian tersebut didapatkan kesimpulan bahwa *Air Fuel Ratio* (AFR) mempengaruhi struktur nyala api pada pembakaran *premixed*. Dalam penelitian tersebut

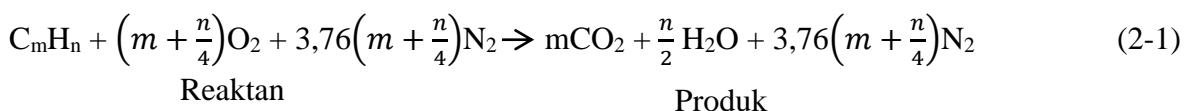
AFR diatur dengan cara mengkondisikan massa aliran bahan bakar dalam keadaan konstan dan massa aliran udara ditambah sesuai variasi sehingga mempengaruhi AFR. Dari variasi AFR tersebut dihasilkan struktur nyala api yang berbeda-beda dan mempengaruhi stabilitas nyala api.

2.2 Proses dan Reaksi Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia yang terjadi antara bahan bakar dan oksidator (oksigen atau udara) dengan bantuan energi aktivasi yang menghasilkan panas dan cahaya (Wardana, 2008). Energi aktivasi ini berupa panas yang didapat dari hasil pembakaran melalui proses radiasi. Energi aktivasi disini berfungsi untuk mengaktifkan molekul-molekul bahan bakar dengan cara memutus ikatan-ikatan atom bahan bakar sehingga molekul-molekul tersebut bermuatan, molekul-molekul yang bermuatan akibat dari pemutusan ikatan disebut radikal bebas. Radikal bebas atau molekul bermuatan tersebut sangat mudah bereaksi karena ketidak stabilan muatan sehingga radikal bebas tersebut akan mudah tertarik dan menghantam molekul lain secara periodik, hal ini menyebabkan terjadinya kelebihan energi dan meningkatkan temperatur.

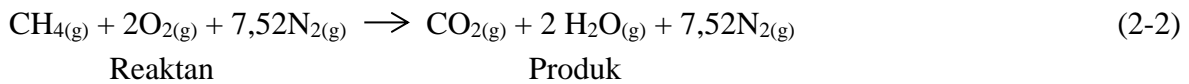
Dalam proses pembakaran terjadi beberapa fenomena-fenomena yang merupakan interaksi dari proses kimia dan fisika, pelepasan panas dari molekul-molekul bahan bakar karena energi aktivasi, proses perpindahan massa dan gerak fluida.

Proses pembakaran dikatakan sempurna jika bahan bakar dan oksidator bereaksi atau terbakar seluruhnya dan menghasilkan CO₂, H₂O dan N₂ sebagai produk dari proses pembakaran. Reaksi yang demikian disebut dengan reaksi stoikiometri, proses yang demikian akan menghasilkan panas sebagai produk pembakaran sehingga proses ini disebut proses oksidasi eksotermis. Reaksi stoikiometri pembakaran hidrokarbon murni C_mH_n dengan oksigen yang diperoleh dari udara, dimana komposisi udara terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen dapat ditulis dengan persamaan:

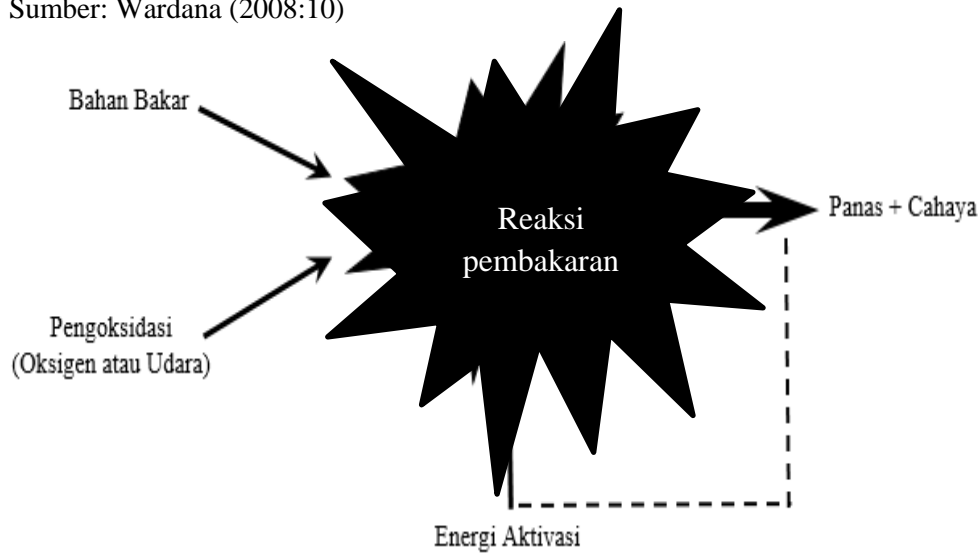


Sumber: Wardana (2008:9)

Persamaan reaksi diatas dianggap sebagai persamaan reaksi ideal, dimana kebutuhan oksigen untuk mengubah bahan bakar tercukupi sehingga proses pembakaran terjadi secara sempurna. Adapun dalam makalah ini bahan bakar yang digunakan adalah gas metana (CH₄), sehingga persamaan reaksi yang diperoleh adalah sebagai berikut.



Sumber: Wardana (2008:10)



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

2.2.1 Campuran Udara dan Bahan Bakar

Pada proses pembakaran, rasio campuran udara dan bahan bakar sangatlah penting untuk diperhatikan. Hal ini disebabkan campuran udara dan bahan bakar memegang peranan sebagai penentu hasil dari proses pembakaran pada saat reaksi dan setelah reaksi dalam bentuk produk proses pembakaran.

2.2.1.1 Air Fuel Ratio (AFR)

Air Fuel Ratio (AFR) merupakan metode yang sering digunakan dalam menentukan perbandingan antara massa udara dengan massa bahan bakar. Dalam menentukan AFR tidak lepas dari fraksi mol dan fraksi massa, untuk mengetahui secara matematis perbandingan stoikiometri dari AFR dapat dijelaskan dengan persamaan berikut.

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

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

Keterangan:

AFR_{stoic} : Perbandingan udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometri

N_{udara} : Jumlah mol udara yang dimasukkan (mol)

$N_{\text{bahan bakar}}$: Jumlah bahan bakar yang dimasukkan (mol)

M_{udara} : Massa udara yang dimasukkan (kg)

$M_{\text{bahan bakar}}$: Massa bahan bakar yang dimasukkan (kg)

Untuk proses pembakaran secara stoikiometri pada metana (CH_4) dengan menggunakan dasar Mol, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2-3 sebagai berikut.

$$\text{AFR} = \frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{CH}_4}} = \frac{2(1 + 3,76)}{1} = 9,52 \frac{\text{mol}_{\text{udara}}}{\text{mol}_{\text{bb}}}$$

Dengan massa molar udara sebesar 28,97 kg/kmol dan massa molar metana adalah 16 kg/kmol, maka dengan menggunakan persamaan 2-4 didapat AFR sebesar:

$$(\text{AFR})_{\text{stoi}} = \frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{CH}_4}} = 9,52 \times \frac{M_{W \text{ udara}}}{M_{W \text{ CH}_4}} = 9,52 \times \frac{28,97 \text{ Kg}_{\text{udara}}}{16 \text{ Kg}_{\text{bb}}}$$

$$\text{AFR} = 17,23 \frac{\text{Kg}_{\text{udara}}}{\text{Kg}_{\text{bb}}}$$

Setelah diketahui besar nilai massa dari udara dan metana, maka dapat dihitung AFR stoikiometri dalam satuan volume berdasarkan densitas dari udara dan metana.

Diketahui:

- Massa jenis metana $0,000716 \text{ gr/cm}^3$
- Massa jenis udara pada 27° C adalah $0,0012 \text{ gr/cm}^3$

Maka volume udara dan metana dapat dihitung dengan persamaan:

$$V = \frac{m}{\rho}$$

$$V_{\text{udara}} = \frac{m}{\rho} = \frac{9,52 \times 28,97}{0,0012} = \frac{275,57}{0,0012} = 229828,7 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{metana}} = \frac{m}{\rho} = \frac{1 \times 28,97}{0,000716} = \frac{16}{0,000716} = 22346,37 \text{ cm}^3$$

Dari hasil perhitungan tersebut didapat perbandingan volume antara udara dan metana sebagai berikut.

V_{udara} : $V_{\text{bahan bakar}}$

228800 cm^3 : $22346,37 \text{ cm}^3$

$10,283 \text{ mL}$: 1 mL

2.2.1.2 Equivalence Ratio (ϕ)

Equivalence ratio didefinisikan sebagai nilai perbandingan AFR stoikiometri dengan AFR aktual dari rasio udara dan bahan bakar. Jika nilai AFR aktual lebih besar dari nilai AFR stoikiometri, maka kandungan udara dalam campuran jumlahnya melebihi dari yang dibutuhkan oleh proses pembakaran sehingga campuran dikatakan miskin, sedangkan jika AFR stoikiometri lebih besar dari AFR aktual maka kandungan bahan bakar dalam

campuran melebihi dari yang dibutuhkan dalam proses pembakaran sehingga disebut dengan campuran kaya. Secara matematis dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$\Phi = \frac{(AFR)_{stoi}}{(AFR)_{act}} \quad (2-5)$$

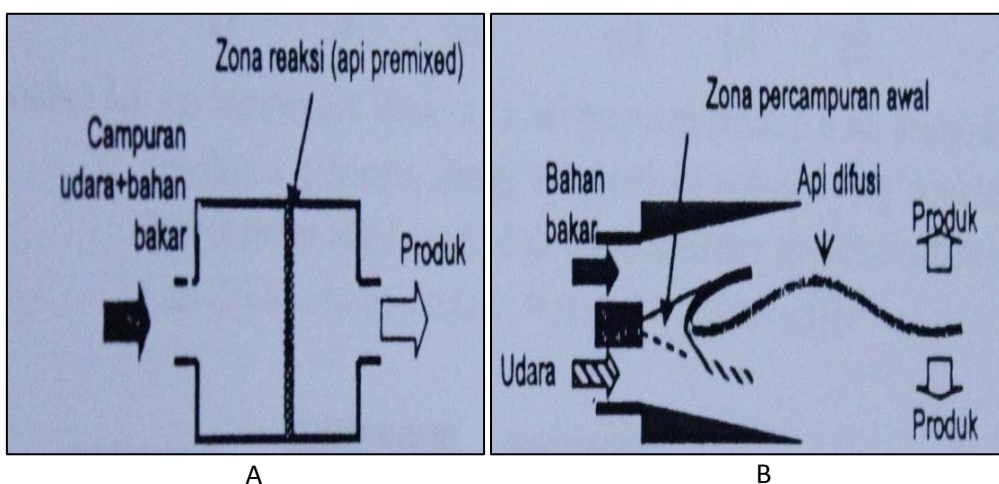
Fungsi dari *equivalence ratio* adalah digunakan untuk menentukan jenis campuran udara dan bahan bakar, apakah tergolong dalam campuran kaya, miskin, atau stoikiometri.

1. $\Phi > 1$, disebut campuran kaya karena terdapat kelebihan bahan bakar
2. $\Phi = 1$, disebut sebagai campuran stoikiometrik
3. $\Phi < 1$, disebut campuran miskin karena kurang bahan bakar

2.3 Klasifikasi Pembakaran

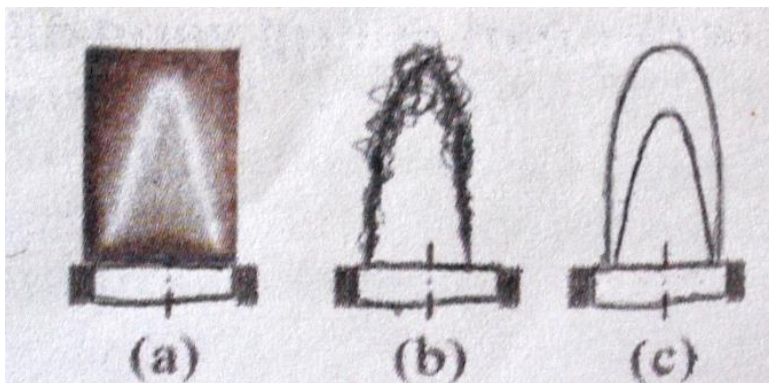
Umumnya pembakaran diklasifikasikan atas tiga karakter, yakni pertama karakter berdasarkan cara reaktan terbakar atau bereaksi didalam zona reaksi, kedua keadaan aliran reaktan pada saat melintasi zona reaksi apakah dalam keadaan laminar atau turbulen dan ketiga berdasarkan bentuk fisik awal dari bahan bakar apakah berbentuk gas, cair atau padat.

Pada karakter pertama yakni tentang cara reaktan terbakar dalam zona reaksi. Cara reaktan bereaksi dapat dikelompokkan menjadi dua jenis yakni pembakaran *premix* dan pembakaran difusi. Pada pembakaran *premix*, reaktan bercampur sebelum memasuki zona reaksi yakni terjadi pencampuran antara bahan bakar dan udara terlebih dahulu sebelum memasuki zona reaksi atau area pembakaran. Sedangkan pada pembakaran difusi, reaktan bercampur didalam zona reaksi yakni dimana pencampuran bahan bakar dan udara dilakukan bersamaan dengan proses pembakaran yang terjadi didalam zona reaksi.



Gambar 2.2 Zona pembakaran (a) Pembakaran *Premix* (b) Pembakaran Difusi
Sumber: Wardana (2008:149)

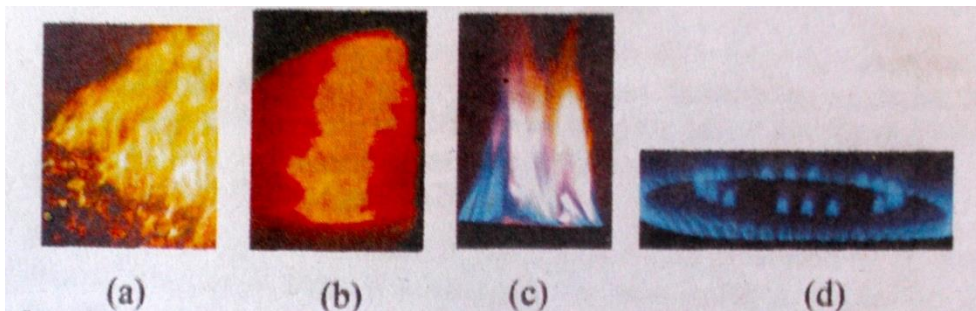
Karakter pembakaran kedua berdasarkan keadaan aliran reaktan pada saat melintasi zona reaksi apakah dalam keadaan laminar atau turbulen. Saat aliran reaktan melintasi zona reaksi dalam keadaan laminar maka proses pencampuran bahan bakar, udara dan proses penjalaran reaktan dan panas berlangsung secara molekuler. Sedangkan pada aliran turbulent dalam proses pencampuran bahan bakar, udara dan proses penjalaran reaktan dibantu oleh pusaran-pusaran aliran turbulen.



Gambar 2.3 Nyala api: (a) Api *premix* aliran laminar, (b) Api *premix* aliran turbulen, (c) Api *premix* turbulen dengan *shuter speed* tinggi
Sumber: Wardana (2008:151)

Karakter pembakaran ketiga berdasarkan bentuk fisik awal dari bahan bakar apakah berbentuk gas, cair atau padat. Hal ini berkaitan dengan ada atau tidaknya proses perubahan fase pada proses pembakaran. Pada proses pembakaran dengan bahan bakar padat proses pembakaran akan berlangsung cukup panjang dimana sebelum terbakar bahan bakar akan berubah fase terlebih dahulu, mulai dari bahan bakar padat berubah menjadi cair, kemudian melalui proses penguapan dari cair berubah menjadi gas lalu terbakar. Dari banyaknya perubahan fase tersebut mengakibatkan banyak energi yang dibutuhkan dalam proses pembakaran.

Jumlah energi yang digunakan akan berpengaruh pada energi yang dimiliki molekul-molekul untuk berdifusi. Semakin banyak energi yang digunakan maka semakin sedikit energi yang terdapat dalam molekul-molekul yang digunakan untuk berdifusi. Hal ini menyebabkan suhu yang dihasilkan rendah dan nyala api berwarna merah, begitu juga sebaliknya.



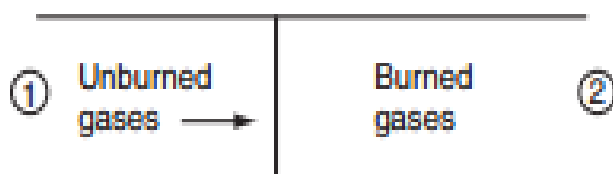
Gambar 2.4 (a) Pembakaran *biomassa* (padat), (b) Pembakaran batubara (padat), (c) Pembakaran minyak jarak (cair), (d) Pembakaran LPG (gas)

Sumber: Wardana (2008:151)

2.4 Pembakaran *Premix*

Proses pembakaran dapat dilakukan dengan dua cara, yakni pembakaran secara *premix* dan pembakaran secara difusi. Perbedaan antara pembakaran *premix* dan pembakaran difusi terletak pada proses pencampuran bahan bakar dan udara, dimana pada pembakaran *premix* pencampuran bahan bakar dan udara dilakukan sebelum memasuki zona reaksi atau area pembakaran. Untuk pembakaran difusi pencampuran bahan bakar dan udara dilakukan didalam zona reaksi bersamaan dengan proses pembakaran.

Apabila menggunakan *bunsen burner* pada pembakaran *premix* bahan bakar dan udara dicampurkan didalam *bunsen burner* lalu dialirkan menuju *lip burner* kemudian dilakukan proses pembakaran. Sedangkan untuk pembakaran difusi pada *bunsen burner* bahan bakar yang dialirkan kedalam *bunsen burner* belum tercampur dengan udara, namun pencampuran tersebut terjadi pada ujung atau *lip burner* bersamaan dengan proses pembakaran. Dalam hal ini yang menjadi topik pembahasan adalah pembakaran *premix*.



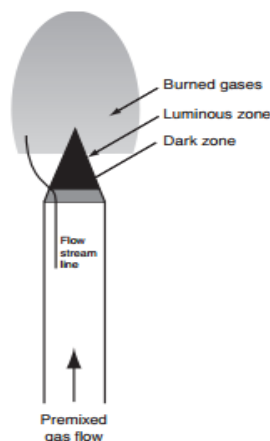
Gambar 2.5 Skema aliran campuran gas bahan bakar pada pembakaran *premix*

Sumber: Glassman (2008:148)

Nilai efisiensi yang dimiliki pembakaran *premix* lebih tinggi jika dibandingkan dengan pembakaran difusi. Hal ini disebabkan pencampuran bahan bakar udara terjadi secara sempurna sebelum memasuki zona reaksi pembakaran, sehingga dalam kondisi stoikiometri bahan bakar dapat terbakar seluruhnya dan tidak meninggalkan bahan bakar sisa pada produk hasil pembakaran.

2.5 Nyala Api Laminar

Pada pembakaran *premix*, bahan bakar dan udara tercampur secara sempurna sebelum dilakukan pembakaran didalam zona reaksi. Pada nyala api *premix* terdiri atas dua daerah yakni daerah terang, daerah gelap dan daerah schlieren. Daerah terang merupakan tempat terjadinya reaksi pembakaran dan pelepasan energi energi panas, warna terang bergantung pada rasio udara dan bahan bakar sehingga dapat berubah-ubah. Daerah gelap dan daerah schlieren merupakan daerah transisi, pada daerah ini terjadi perubahan dari molekul gas yang belum terbakar menjadi gas siap bereaksi dalam jarak daerah pemanasan awal.



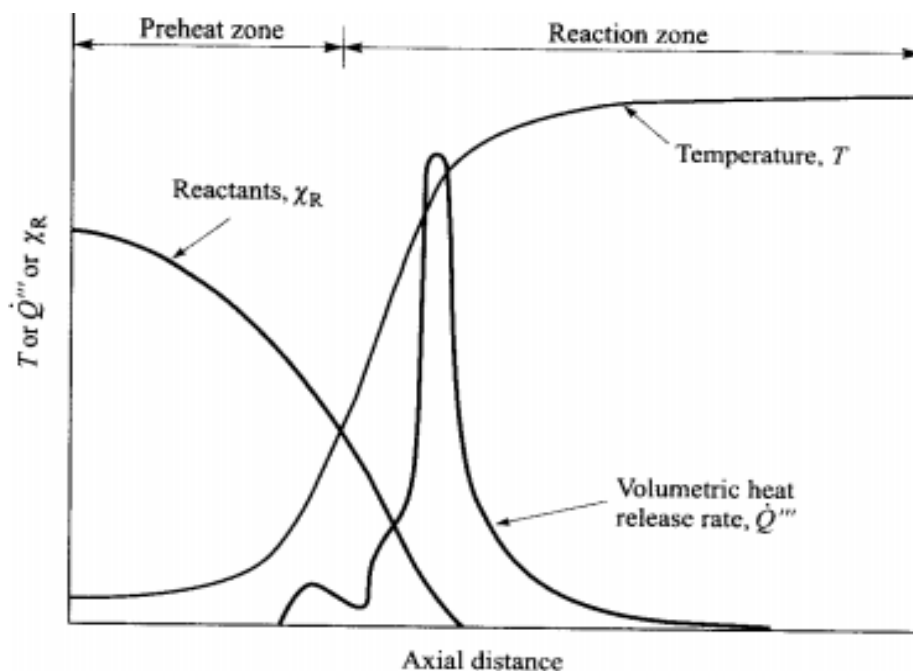
Gambar 2.6 Skema nyala api pada *bunsen burner*
Sumber: Glassman (2008:152)

Visualisasi api laminar berbentuk teratur dimana bentuknya mengikuti *streamline* aliran tanpa adanya gerakan tidak beraturan atau turbulen. Bentuk nyala api merupakan hasil dari kombinasi kecepatan perambatan nyala api (*flame propagation*) dan hilangnya panas karena penyerapan panas oleh dinding *burner* (*flame quenching*). Pada gambar 6 memperlihatkan bagaimana nyala api dihasilkan pada *bunsen burner*. Meskipun pada proses pembakaran yang dilakukan menggunakan gas *premix*, tetapi nyala api yang dihasilkan tidak hanya nyala api *premix* saja, juga ada nyala api difusi yang terletak mengelilingi nyala api *premix*. Nyala api difusi pada *bunsen burner* terjadi akibat dari bahan bakar yang tidak habis terbakar pada nyala api *premix* dan bercampur dengan udara sekitar dengan cara difusi molekuler sehingga dapat terbakar kembali dan menghasilkan nyala api difusi. Namun, Wardana (2008) menyatakan bahwa secara ideal api difusi dianggap tidak ada sebab diasumsikan bahan bakar telah terbakar sempurna pada zona reaksi *premix*.

Pada pembakaran *premix* terdapat dua zona pembakaran berdasarkan reaksi campuran bahan bakar dan udara dalam gas *premix*, yaitu:

1. *Preheat zone* adalah zona dimana masih banyak campuran bahan bakar dan udara yang belum terbakar, sehingga panas yang dihasilkan sangat sedikit.

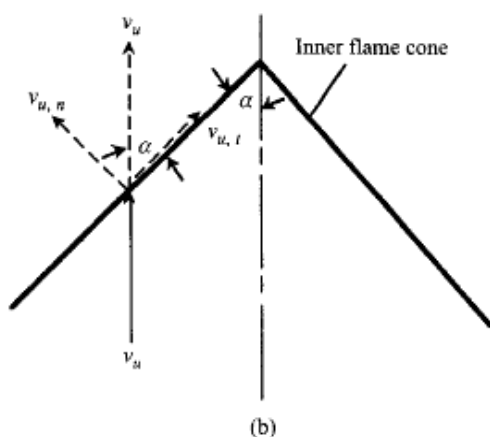
2. *Reaction zone* adalah zona dimana sebagian besar campuran bahan bakar dan udara bereaksi, sehingga sebagian besar energi dapat dilepaskan.



Gambar 2.7 Profil nyala api laminar

Sumber: Turn (2000:255)

Supaya nyala api stasioner, maka kecepatan nyala api harus sama dengan kecepatan aliran campuran bahan bakar dan udara yang belum terbakar disetiap lokasi. Kecepatan pembakaran didefinisikan sebagai kecepatan dari campuran bahan bakar dan udara yang searah dan tegak lurus terhadap daerah reaksi.



Gambar 2.8 Diagram vektor kecepatan nyala api laminar

Sumber: Turn, (2000:257)

Pada gambar 2.8 adalah diagram vektor yang menjelaskan bagaimana hubungan kecepatan reaktan terhadap kecepatan nyala api laminar, sehingga kecepatan api laminar dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$S_L = v_u \sin \alpha \quad (2-6)$$

Keterangan:

S_L = kecepatan api laminar (cm/s)

v = kecepatan reaktan (cm/s)

α = sudut api yang terbentuk ($^\circ$)

Dan nilai kecepatan reaktan dari proses pembakaran dapat ditentukan dengan persamaan berikut.

$$v = \frac{Q_{fuel} + Q_{air}}{Ab} \quad (2-7)$$

Dengan:

Q_{fuel} = debit aliran bahan bakar (cm^3/s)

Q_{air} = debit aliran udara (cm^3/s)

Ab = luas bagian melintang *burner* (cm^2)

2.6 Laju Nyala Api Laminar

Nyala api pada proses pembakaran merupakan hasil gabungan dari proses reaksi kimia, perpindahan panas, perpindahan massa, momentum difusi dan pola aliran, proses-proses tersebut saling mempengaruhi, jika salah satu proses tersebut tidak ada maka nyala api dalam proses pembakaran tidak dapat dihasilkan. Bentuk dan ukuran nyala api dari proses pembakaran ditentukan oleh tahapan proses yang terjadi, sehingga dimensi satu dari bentuk nyala api dapat dibagi atas empat daerah tahapan proses, yakni:

1. Daerah dengan tahapan gas belum terbakar
2. Daerah dengan tahapan pemanasan awal
3. Daerah dengan tahapan reaksi
4. Daerah tahapan gas terbakar.

Pada pembakaran *premix*, daerah dengan tahapan gas belum terbakar memiliki kecepatan, temperatur dan konsentrasi yang sama pada setiap titik dengan bentuk fisik tetap. Dalam daerah pemanasan awal terjadi konduksi energi panas, sehingga temperatur meningkat dan gas *premix* menerima energi panas dengan persentase yang lebih besar dibandingkan daerah lain, sehingga pada daerah tahapan reaksi terbagi menjadi dua daerah yakni, daerah reaksi primer dan dua daerah setelah proses atau laju pembakaran.

Daerah reaksi primer yaitu daerah dimana gas *premix* bereaksi dengan energi panas yang mengakibatkan terjadinya laju pembakaran serta temperatur yang meningkat secara cepat. Sedangkan daerah setelah proses atau laju pembakaran, yaitu daerah dimana gas *premix* berubah menjadi produk pertengahan dengan kenaikan temperatur yang rendah.

2.7 Karakteristik Nyala Api

Karakteristik nyala api merupakan hal yang sangat penting karena berfungsi sebagai pembanding antar variabel satu dengan variabel lainnya dalam suatu penelitian. Oleh karena itu, perlu adanya pemahaman terhadap parameter-parameter yang dijadikan acuan sebagai pembeda dari hasil percobaan. Dalam proses pembakaran acuan yang digunakan untuk membedakan karakteristik nyala api adalah sebagai berikut.

1. Temperatur nyala api

Temperatur nyala api adalah temperatur tertinggi yang dihasilkan dalam percobaan pada masing-masing variabel pembeda. Didapat dari pengukuran di daerah pusat nyala api pada saat pembakaran berlangsung. Selain daerah pengukuran, temperatur nyala api juga dipengaruhi oleh nilai kalor yang terkandung dalam bahan bakar, karena nilai kalor merupakan jumlah energi yang dilepaskan bahan bakar pada saat terjadi reaksi pembakaran.

2. Dimensi nyala api

Dimensi nyala api adalah tampilan nyala api yang didapat secara visual. Dari dimensi nyala api yang diamati bisa didapat kesimpulan apakah proses pembakaran yang terjadi berlangsung secara cepat atau lambat. Hal ini berhubungan dengan kecepatan aliran reaktan pada proses pembakaran

2.7.1 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Karakteristik Nyala Api

Pada proses pembakaran, karakteristik nyala api yang dihasilkan tidak selalu sama dan bergantung pada faktor fisik dan kimia yang mempengaruhi. Faktor fisik yang mempengaruhi proses pembakaran diantaranya adalah temperatur, tekanan dan kecepatan aliran reaktan. Sedangkan faktor kimia yang mempengaruhi adalah rasio campuran antara bahan bakar dan udara, penambahan gas *inert* dan struktur hidrokarbon pada bahan bakar.

Temperatur pada proses pembakaran dipengaruhi oleh nilai kalor yang terkandung dalam bahan bakar, hal ini dikarenakan pada saat proses pembakaran bahan bakar akan bereaksi secara kimia dengan oksidator dan melepaskan sejumlah energi kalor yang besarnya sama dengan nilai kalor yang tersimpan dalam bahan bakar.

Dimensi nyala api pada proses pembakaran dipengaruhi oleh kecepatan reaksi, sedangkan kecepatan reaksi sendiri bergantung pada seberapa cepat reaktan mengalir dan seberapa cepat reaktan dapat bereaksi dengan temperatur. Apabila kecepatan aliran dan reaksi bahan bakar semakin cepat, maka dimensi nyala api yang dihasilkan semakin kecil

dan jika kecepatan aliran dan reaksi bahan bakar semakin lambat, maka dimensi nyala api yang dihasilkan semakin besar. Hal ini dikarenakan bahan bakar memerlukan waktu untuk bereaksi.

2.7.2 Batas Mampu Nyala Api

Proses pembakaran dapat tercapai jika komposisi bahan bakar dan udara yang diberikan tepat. Pada proses pembakaran terdapat batasan yang dikenal sebagai *lower and upper flammability limit*. Pada *lower flammability limit* adalah batas dimana api bisa menyala, pada batas ini konsentrasi bahan bakar dalam campuran kecil dan biasanya disebut dengan campuran miskin. Sedangkan pada *upper flammability limit* konsentrasi bahan bakar dalam campuran cenderung besar sehingga disebut dengan campuran kaya, namun dengan seiring bertambahnya konsentrasi bahan bakar kecepatan pembakaran turun sehingga nyala api akan padam. Hal ini dikarenakan seiring bertambahnya bahan bakar maka tekanan parsial campuran bahan bakar dan udara meningkat, kapasitas panas yang dibutuhkan dalam proses pembakaran meningkat dan temperatur nyala api semakin menurun.

Experimen dalam mendapatkan batas bawah dan batas atas nyala api pernah dilakukan oleh US Bureau of Mines dengan menggunakan tabung api dengan ukuran panjang 0,5 m dan diameter dalam sebesar 0.05 m. Tujuan dilakukan experimen tersebut adalah untuk menentukan batas bawah dan batas atas dari mampu nyala api. Skema dari *experimen* dapat dijelaskan sebagai berikut, pada kondisi awal dengan campuran miskin akan terjadi nyala api kecil hal ini disebut sebagai batas bawah, kemudian dilakukan penambahan pada aliran bahan bakar dari *handling system*. Seiring dilakukannya penambahan maka nyala api mulai meredup yang kemudian disebut batas atas mampu nyala api. Sebagai hasil dari percobaan, batas-batas tersebut dapat didefinisikan secara matematis dengan persamaan sebagai berikut.

$$L = \frac{1}{2}(L_W + L_r) \quad (2-8)$$

$$U = \frac{1}{2}(U_W + U_r) \quad (2-9)$$

Dimana:

L = batas bawah mampu nyala api

U = batas atas mampu nyala api

L_W = konsentrasi bahan bakar banyak tidak mampu nyala

L_r = konsentrasi bahan bakar kecil mampu nyala

U_W = konsentrasi bahan bakar banyak mampu nyala

U_r = konsentrasi bahan bakar kecil tidak mampu nyala

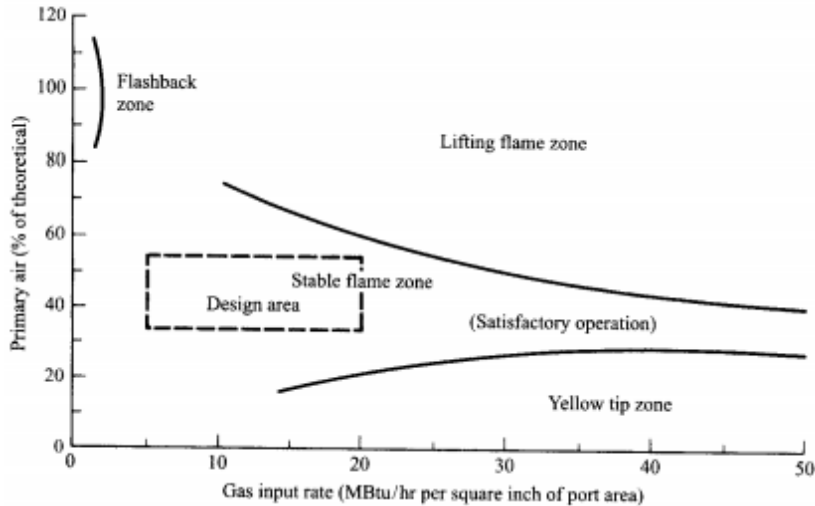
Persamaan tersebut adalah persamaan sederhana yang digunakan untuk mendapatkan batas bawah dan batas atas dari konsentrasi bahan bakar pada campuran agar terjadi nyala api. Berikut didapat data tabel batas mampu nyala api hasil dari *experiment* yang lebih modern.

| | Lower flammability limit (L) ^a | | | $\frac{L}{C_u}$ | Upper flammability limits (U) ^a | | $\frac{U}{C_u}$ | S_u^b (m/s) | Minimum ignition energy ^b (mJ) | Minimum quenching distance ^b (mm) |
|---------------------|--|------------------|-------------------|-----------------|---|------------------|-----------------|------------------|--|---|
| | % Vol | g/m ³ | kJ/m ³ | | % Vol | g/m ³ | | | | |
| Hydrogen | 4.0 ^c | 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 | 5.0 | 36 | 1906 | 0.53 | 15 | 126 | 1.6 | 0.37 | 0.26 | 2.0 |
| Ethane | 3.0 | 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 |
| <i>n</i> -Butane | 1.8 | 48 | 2200 | 0.58 | 8.4 | 240 | 2.7 | 0.42 | 0.26 | 1.8 |
| <i>n</i> -Pentane | 1.4 | 46 | 2090 | 0.55 | 7.8 | 270 | 3.1 | 0.42 | 0.22 | 1.8 |
| <i>n</i> -Hexane | 1.2 | 47 | 2124 | 0.56 | 7.4 | 310 | 3.4 | 0.42 | 0.23 | 1.8 |
| <i>n</i> -Heptane | 1.05 | 47 | 2116 | 0.56 | 6.7 | 320 | 3.6 | 0.42 | 0.24 | 1.8 |
| <i>n</i> -Octane | 0.95 | 49 | 2199 | 0.58 | — | — | — | — | — | — |
| <i>n</i> -Nonane | 0.85 | 49 | 2194 | 0.58 | — | — | — | — | — | — |
| <i>n</i> -Decane | 0.75 | 48 | 2145 | 0.56 | 5.6 | 380 | 4.2 | 0.40 | — | — |
| 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 | 0.50 | 9.7 | 270 | 2.9 | 0.48 | — | — |
| Acetylene | 2.5 | 29 | 1410 | — | (100) | — | — | 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 | 0.50 | 19 | 480 | 2.9 | — | — | — |
| <i>n</i> -Propanol | 2.2 | 60 | 1874 | 0.49 | 14 | 420 | 3.2 | 0.38 | — | — |
| Acetone | 2.6 | 70 | 2035 | 0.52 | 13 | 390 | 2.6 | 0.50 | 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 |

Gambar 2.9 Tabel data batas mampu nyala api
Sumber: Dougal Drysdale (2003:77)

2.8 Stabilitas Nyala Api

Kestabilan nyala api memegang peranan yang sangat penting dalam proses pembakaran. Pada posisi tertentu api dikatakan stabil jika tetap dalam kondisi stasioner dan posisi tersebut dipengaruhi oleh kecepatan aliran gas reaktan terhadap kecepatan rambat api. Jika kecepatan rambatan api lebih besar dari kecepatan aliran gas reaktan maka nyala api akan mendekati mulut nozel dan ini akan mengakibatkan *flash back*, sedangkan jika kecepatan rambatan api lebih kecil dari kecepatan aliran gas reaksi maka nyala api akan menjauhi nozel dan akan mengakibatkan *blow off*. Dengan demikian daerah stabilitas nyala api dibatasi oleh daerah *flash back*, *yellow tip* dan *blow off*.



Gambar 2.10 Diagram stabilitas nyala api, *flashback*, *lift-off* dan *yellow tipping* untuk bahan bakar gas natural

Sumber: Turns (2000:297)

2.8.1 *Flashback*

Fenomena *flashback* ditandai dengan pergerakan nyala api yang mendekati mulut nozel, hal ini dapat terjadi karena kecepatan rambat api lebih besar dari kecepatan aliran reaktan. Dari sisi keamanan *flashback* sangat berbahaya karena dapat mengakibatkan ledakan jika perambatan nyala api sampai masuk kedalam tabung pembakaran dan sampai pada sumber bahan bakar.

Fenomena *flashback* biasanya terjadi akibat dari pengurangan aliran gas reaktan, sehingga kecepatan rambat nyala api lebih besar dari kecepatan aliran gas reaktan ($S_L > v$), sehingga gerak perambatan nyala menjauhi api

2.8.2 *Lift-Off*

Fenomena *lift-off* sama seperti halnya dengan fenomene *flashback* dimana fenomena *lift-off* juga berhubungan dengan kecepatan rambat nyala api dan kecepatan aliran reaktan. Namun, visualisasi dari fenomena *lift-off* tidak sama dengan fenomena *flashback*, visualisasi pada fenomena *lift-off* ditandai dengan nyala api yang tidak menyentuh permukaan mulut *burner* dan agak stabil pada jarak tertentu dari mulut *burner*.

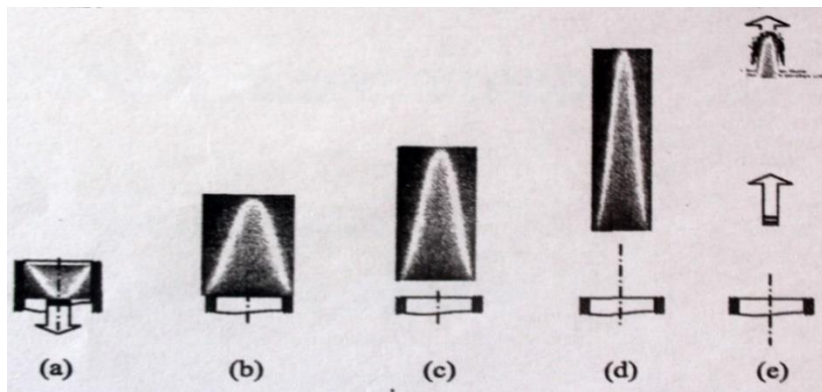
Pengaruh kecepatan aliran gas reaktan terhadap fenomena *lift-off* adalah ketika kecepatan aliran gas reaktan rendah sehingga bagian bawah nyala api akan sangat dekat dengan permukaan mulut *burner*. Apabila kecepatan aliran gas reaktan dinaikkan maka ujung nyala akan sedikit bergeser kebawah dan sudut kerucut pada nyala api akan menurun, hal ini dapat dijelaskan dengan persamaan berikut.

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{S_L}{v_u}\right) \quad (2-10)$$

Ketika kecepatan aliran gas reaktan terus dinaikkan maka ujung nyala akan bergerak menjauh dari ujung mulut *burner* hal ini akan berakibat pada padamnya nyala api. Keseimbangan dari fenomena *lift-off* dapat terjadi jika kecepatan aliran gas reaktan dan kecepatan rambat nyala api dapat berjalan seimbang.

2.8.3 Blow-Off

Fenomena *blow-off* merupakan kondisi dimana nyala api bergerak menjauhi mulut *burner* dan akhirnya padam, hal ini terjadi akibat dari kecepatan aliran gas reaktan lebih besar dari kecepatan rambat nyala api ($v_u > S_L$). Terjadinya fenomena *blow-off* sangat dihindari karena pada kondisi ini terlalu banyak menghabiskan bahan bakar dan untuk menghindarinya maka diperlukan pengaturan kecepatan aliran gas reaktan dan kecepatan perambatan nyala api yang seimbang.



Gambar 2.11 Mekanisme kestabilan api, (a) *Flashback*, (b) *Stabil*, (c) *Lift-off*, (d) *Lifted*, (e) *Blow-off*

Sumber: Wardana (2008:169)

2.9 Bahan Bakar

Bahan bakar merupakan salah satu komponen utama yang diperlukan dalam proses pembakaran, karena bahan bakar berperan sebagai sumber energi yang diperlukan dalam proses pembakaran. Dari jenis bahan bakar yang digunakan bahan bakar dapat dibedakan berdasarkan wujudnya yakni bahan bakar berwujud gas seperti metana, cair seperti minyak bumi dan padat seperti batubara. Dalam proses pembentukannya pun bahan bakar terbagi menjadi dua yakni terbentuk secara alamiah seperti batubara, gas alam dan buatan seperti briket, premium, *cracking* gas.

Saat ini dalam penggunaan bahan bakar harus berdasarkan efisiensi dan keekonomisan guna menyelamatkan keadaan ekonomi negara. Penggunaan bahan bakar mulai beralih dari

bahan bakar cair menuju bahan bakar gas, hal ini karena penggunaannya sangat mudah dan kebutuhan akan udara lebih rendah dibandingkan bahan bakar cair maupun padat, apabila mempertimbangkan peran udara sebagai oksidator dalam proses pembakaran.

2.9.1 Sifat Fisik dan Sifat Kimia Bahan Bakar

Pada umumnya bahan bakar yang digunakan dalam proses pembakaran dipilih berdasarkan pada properti fisik dan kimia dari bahan bakar. Berdasarkan properti fisik dan kimia dari bahan bakar dapat diketahui juga kualitas bahan bakar sehingga dapat memperkirakan untung dan rugi dari penggunaan bahan bakar yang dipilih.

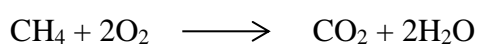
Berikut beberapa properti fisik dan kimia dari bahan bakar yang biasa digunakan sebagai dasar dalam memilih bahan bakar:

1. Nilai kalor adalah jumlah kalor yang dapat dihasilkan dari 1 kg bahan bakar padat atau 1 m³ bahan bakar cair atau gas dengan pembakaran sempurna
2. Kandungan air dalam bahan bakar, baik yang terikat secara kimia maupun yang hanya menempel pada permukaan bahan bakar. Efek yang diberikan oleh kandungan air dalam bahan bakar adalah menurunkan nilai kalor bahan bakar karena kalor digunakan untuk menguapkan air. Selain itu kandungan air dapat menurunkan titik nyala bahan bakar sehingga memperlambat reaksi pembakaran.
3. Viskositas atau kekentalan bahan bakar. Pada bahan bakar cair semakin tinggi viskositas bahan bakar maka bahan bakar sukar untuk mengalir sehingga menyebabkan sulit bercampur dengan udara, hal ini menyebabkan campuran tidak bisa mendekati homogen.
4. *Flash point* adalah kondisi suhu dimana bahan dapat terbakar dengan sendirinya.

2.9.2 Metana

Metana adalah salah satu bahan bakar berwujud gas dan merupakan senyawa hidrokarbon sederhana dengan rumus kimia CH₄. Sifat metana murni salah satunya tidak berbau, sehingga apabila digunakan dalam keperluan komersial perlu dilakukan penambahan sedikit belerang guna mendeteksi kemungkinan adanya kebocoran yang terjadi.

Sebagai komponen utama penyusun gas alam, metana menjadi sumber energi cukup besar dalam pembakaran. Dalam proses pembakaran satu senyawa metana (CH₄) dengan oksigen (O₂) sebagai oksidator akan menghasilkan satu senyawa karbondioksida (CO₂) dan dua senyawa air (H₂O) dan dapat dijelaskan dalam persamaan reaksi kimia sebagai berikut.



Tabel 2.1
Properti Metana

| | |
|--|--------------------------------|
| Rumus Senyawa | : CH ₄ |
| Massa Molekul | : 16,04 g/mol |
| Temperatur penyalan | : 580 °C |
| Kecepatan rambatapi pada campuran stoikiometri | : 43,4 cm/detik |
| Batas konsentrasi mampu bakar di udara, terting | : 15% |
| Batas konsentrasi mampu bakar di udara, terendah | : 5% |
| Densitas | : 0,0007168 gr/cm ³ |
| Nilai kalor tinggi | : 9510 kcal/m ³ |
| Nilai kalor rendah | : 8570 kcal/m ³ |

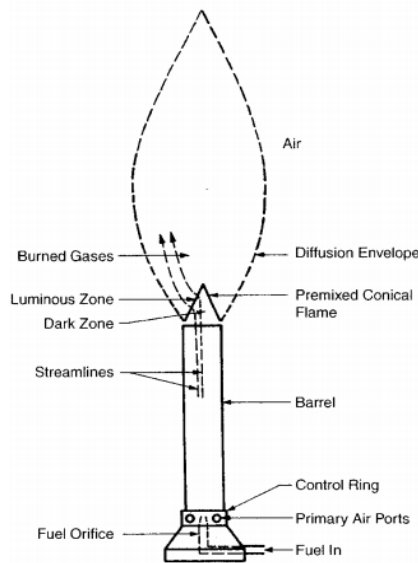
Sumber: Wardana (2008)

Sebagai komponen utama penyusun gas alam, metana banyak ditemukan didalam area pengeboran minyak atau pengeboran gas dan dalam proses pengolahannya fase metana diubah dalam bentuk cair yang dibekukan yang biasanya disebut dengan LNG (*Liquid Natural Gas*), sehingga massa jenisnya lebih besar dari udara.

2.10 *Bunsen Burner*

Bunsen burner adalah salah satu metode yang digunakan dalam proses pembakaran yang ditemukan oleh Robert William Bunsen (1811-1899) pada tahun 1855. Alat ini bekerja dengan prinsip pengaturan massa aliran campuran bahan bakar dan udara secara kontinyu, sehingga nyala api yang dihasilkan pada *bunsen burner* adalah nyala api *premix*. Cara kerja dari *bunsen burner* adalah dengan cara mengalirkan massa alir bahan bakar dan udara masuk kedalam saluran dasar pipa atau tabung *burner* secara bersamaan, sehingga massa alir bahan bakar dan udara dapat bercampur dengan baik mendekati homogen sepanjang tabung *burner (barrel)* sebelum keluar melalui ujung *burner*.

Ketika massa alir campuran bahan bakar dan udara yang keluar secara kontinyu melalui ujung *burner* diberi sejumlah energi panas yang mencukupi, maka aliran campuran gas dan udara akan bereaksi membentuk nyala api *premix* yang menghasilkan panas dan cahaya secara kontinyu. Seiring berjalannya reaksi pembakaran dan laju aliran campuran bahan bakar dengan udara dijaga secara konstan, maka nyala api *premix* yang dihasilkan akan tetap.



Gambar 2.12 Skema Bunsen Burner
Sumber: Kuo (2005:439)

Nyala api *premix* yang dihasilkan pada *bunsen burner* terbagi atas beberapa daerah, dimana pada tiap-tiap daerah terjadi proses yang berbeda-beda. Pada daerah *luminous* campuran bahan bakar dengan udara bereaksi dan melepaskan energi panas sebagai entalpi dari reaksi gas yang terbakar. Dibawah daerah *luminous* terdapat daerah gelap (*dark zone*), pada daerah ini gas campuran bahan bakar dengan udara yang belum terbakar mengalami perubahan aliran yang semula sejajar sumbu tabung beralih tegak lurus menuju permukaan batas daerah gelap. Selanjutnya gas campuran bahan bakar dengan udara tersebut mendapatkan energi panas dalam daerah *preheating* hingga mencapai temperatur nyala. Kemudian bereaksi dengan cepat didalam daerah reaksi (*reaction zone*) dan terjadi secara berulang diiringi pelepasan energi panas yang lebih besar .

Warna daerah *luminous* bisa berubah-ubah tergantung dari rasio campuran bahan bakar dan udara yang diberikan. Jika rasio campuran gas reaktan yang diberikan miskin bahan bakar maka kerucut nyala api yang dihasilkan berwarna ungu, dikarenakan banyaknya gas CH radikal yang dihasilkan. Sedangkan jika rasio campuran gas reaktan yang diberikan kaya bahan bakar maka kerucut nyala api yang dihasilkan akan berwarna hijau mendekati kebiruan, hal ini menandakan banyaknya konsentrasi molekul C_2 yang diberikan.

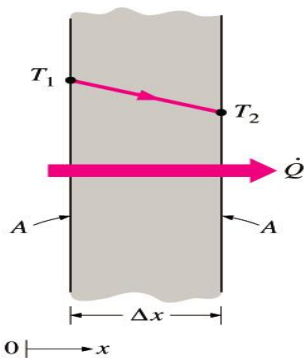
2.11 Perpindahan Panas (*Heat Transfer*)

Proses perpindahan panas adalah fenomena yang biasa terjadi dalam proses pembakaran. Dimana panas yang dihasilkan dalam proses pembakaran akan merambat melalui media tertentu yang temperaturnya lebih rendah dari panas yang dihasilkan untuk mencapai kesetimbangan energi.

Pada umumnya perpindahan kalor bisa dibagi menjadi tiga cara yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Pada proses pembakaran dengan metode *bunsen burner* cara atau proses perpindahan panas didominasi oleh konveksi dan konduksi, dimana proses konduksi terjadi pada *barrel bunsen* dengan *ring* yang terpasang pada *bunsen* dan konveksi terjadi pada permukaan *ring bunsen* dengan lingkungan. Kedua proses perpindahan panas tersebut dapat dijelaskan dengan persamaan sebagai berikut.

1. Perpindahan panas secara konduksi

Perpindahan panas secara konduksi merupakan proses perpindahan energi panas yang terjadi antara medium-medium yang saling bersinggungan tanpa disertai perpindahan molekul dalam medium. Pada zat padat energi panas dihantarkan melalui interaksi antar molekul yang bergetar akibat dari kenaikan temperature, tanpa adanya perpindahan molekul didalam zat padat.



Gambar 2.13 Perpindahan panas konduksi
Sumber: Cengel (2003:18)

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{T_2 - T_1}{dx} = -k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{dx} \quad (2-11)$$

Dimana:

Q = Perpindahan kalor (Watt)

k = Konduktifitas termal material (Watt/mK)

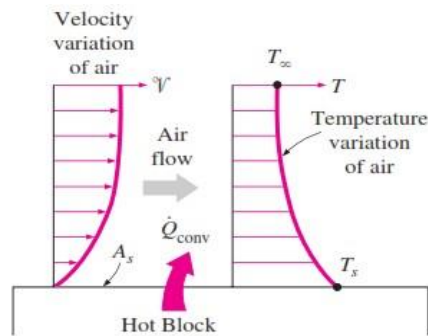
A = Luas Penampang (m²)

ΔT = Perbedaan temperatur (K)

dx = Ketebalan material (m)

2. Perpindahan panas secara konveksi

Perpindahan panas secara konveksi merupakan perpindahan panas yang terjadi pada medium-medium yang saling bersinggungan dengan disertai perpindahan atau pergerakan molekul didalam medium. Perpindahan panas secara konveksi merupakan perpaduan dari perpindahan panas secara konduksi dengan gerakan dari fluida, dimana energi panas yang diterima molekul fluida dihantarkan ke molekul fluida disekitarnya.



Gambar2.14 Perpindahan panas konveksi
Sumber: Cengel (2003:6)

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2-12)$$

Dimana:

Q = Perpindahan kalor (Watt)

h = Koefisien konveksi (Watt/m²K)

A = Luas Penampang (m²)

ΔT = Perbedaan temperatur (K)

2.12 Hipotesa

Semakin turun posisi ketinggian *ring burner* dari ujung *bunsen burner*, maka ketinggian nyala api semakin meningkat, kecepatan api laminarnya menurun dan temperatur nyala api yang dihasilkan semakin menurun. Hal ini dikarenakan semakin turun posisi *ring pemanas* pada *bunsen burner* menyebabkan reaksi pembakaran serentak pada campuran reaktan semakin menurun sehingga tinggi nyala api yang dihasilkan semakin meningkat, kecepatan api laminar semakin menurun dan temperatur nyala api semakin menurun.