

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Pada penelitian terdahulu Buffam dan Cox (2008) melakukan penelitian dengan campuran metana dan udara pada *slot burner* dan *bunsen burner* untuk mengukur kecepatan api laminernya. Maksud dari penelitian ini adalah untuk merancang dua apparatus pembakaran untuk mengevaluasi kecepatan api laminar dengan berbagai macam ukuran api dengan jenis burner yang berbeda. Dimana *slot burner* menggunakan 4 jenis ukuran yang berbeda beda. Dalam *bunsen burner* didapat kecepatan pembakaran yang tinggi dengan *equivalence ratio* mendekati kondisi stokiometrinya.

Syamsul Bahri La Muhaya (2015) meneliti tentang “Pembakaran *Premixed* Minyak Nabati pada *Bunsen Burner Type Silinder*”. Dari penelitian beliau bertujuan untuk mengetahui karakteristik api laminar dan *equivalence ratio* (Φ) dengan menggunakan 3 jenis minyak nabati (kelapa murni, jarak pagar dan biji kapuk). Kesimpulan yang didapat adalah semakin banyak udara maka bentuk api yang terlihat menjadi semakin mengecil dan dapat mengakibatkan hingga *blow off*.

Dimas Aditya (2016) yang meneliti tentang pengaruh variasi *equivalence ratio* (Φ) pada *bunsen burner* dan *slot burner* terhadap kecepatan api laminar (SL) dengan menggunakan bahan bakar metana. (CH_4). Hasil penelitian tersebut menunjukkan kecepatan api laminar dan tinggi api *bunsen burner* lebih tinggi dari *slot burner*, tetapi temperatur pada *slot burner* lebih tinggi dari *bunsen burner*. Dan apabila semakin besar *equivalence ratio* maka kecepatan api laminar akan turun, tinggi api juga menurun, tetapi temperatur meningkat.

Selanjutnya penelitian mengenai *Bunsen burner* dilanjutkan oleh Firdaus Sutra (2017) tentang variasi *equivalence ratio* (Φ) pada *bunsen burner* dengan pemasangan variasi diameter ring pada bibir *bunsen burner*. Hasil penelitian tersebut menunjukkan temperatur api laminar akan semakin meningkat seiring dengan nilai *equivalence ratio* mendekati 1 dan temperatur api laminar akan mengalami penurunan seiring meningkatnya variasi diameter ring. Tinggi api laminar dan difusi pembakaran *premixed* gas metana akan semakin menurun seiring dengan berkurangnya nilai *equivalence ratio*. Tinggi api laminar dan difusi akan mengalami kenaikan seiring meningkatnya variasi diameter *ring* yang dipasangkan pada *bunsen burner*. Kecepatan

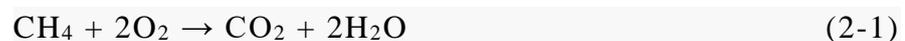
api laminar pembakaran *premixed* gas metana akan semakin meningkat seiring dengan berkurangnya nilai *equivalence ratio* dan mengalami penurunan seiring meningkatnya variasi diameter *ring* yang dipasangkan pada *bunsen burner*.

2.2 Bahan Bakar

Secara umum bahan bakar dibagi menjadi dua jenis, yaitu bahan bakar primer dan bahan bakar sekunder. Bahan bakar primer adalah bahan bakar yang dapat langsung digunakan seperti kayu dan gas alam, sedangkan bahan bakar sekunder adalah bahan bakar yang penggunaannya diolah dahulu. Yang termasuk bahan bakar sekunder adalah bensin, minyak diesel, minyak tanah, dll. Unsur utama dari bahan bakar yaitu karbon (C) dan hydrogen (H), sedangkan unsur minoritas dari bahan bakar sendiri berupa nitrogen (N), sulphur (S), oksigen (O₂), karbondioksida (CO₂) dan air (H₂O).

2.2.1 Metana

Metana merupakan senyawa gas hidrokarbon sederhana dengan rumus kimia CH₄. Sifat umum yang terdapat pada metana yaitu tidak berbau, tidak berwarna, dan mudah terbakar. Metana merupakan gas yang banyak terdapat di alam. Pembakaran satu molekul metana dengan oksigen akan melepaskan satu molekul CO₂ dan dua molekul H₂O :



Berikut sifat-sifat atau karakteristik gas metana yang dikutip dari bukunya Wardana (2008) adalah sebagai berikut :

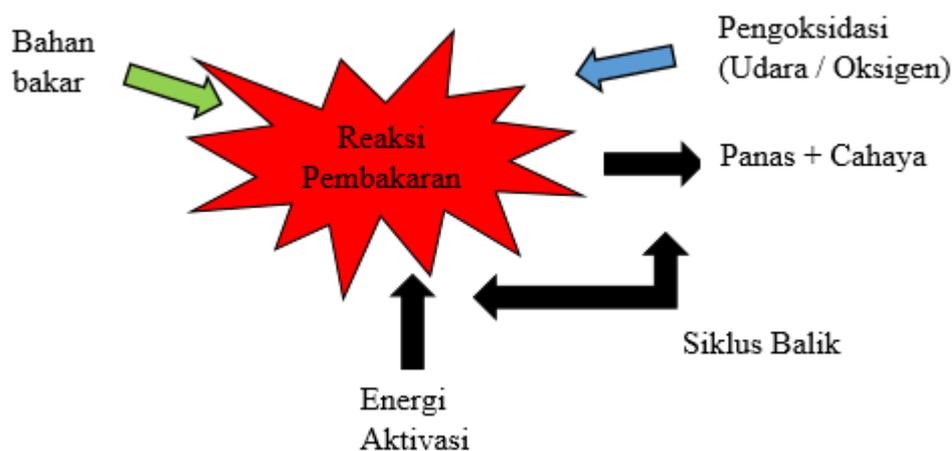
- Massa Molekul : 16,04 gr/mol
- Temperatur Penyalaan : 580°C
- Kecepatan rambat api pada stokiometri : 43,4 cm/detik
- Batas konsentrasi mampu bakar diudara : 5% - 15%
- Densitas : 0,0007168 gr/cm³
- Nilai kalor rendah : 8570 kcal/m³
- Nilai kalor tinggi : 9510 kcal/m³

2.3 Pembakaran

Pembakaran adalah reaksi kimia eksotermis. Dengan demikian secara mendasar dapat didefinisikan bahwa pembakaran adalah proses lepasnya ikatan-ikatan kimia lemah bahan bakar akibat pemberian energi tertentu dari luar menjadi atom-atom bermuatan yang aktif kemudian bereaksi dengan oksigen membentuk ikatan molekul-molekul kuat yang menghasilkan panas dalam jumlah sangat besar dan cahaya.

Syarat terjadinya pembakaran yaitu:

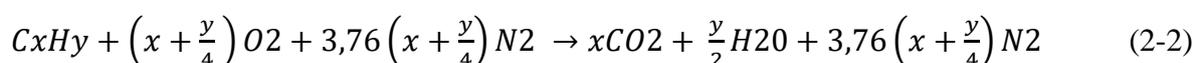
1. Bahan Bakar
2. Pengoksidasi (Oksigen / Udara)
3. Panas atau Energi Aktivasi



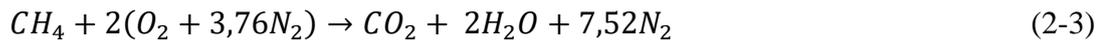
Gambar 2.1 Ilustrasi Proses Pembakaran
Sumber: Wardana (2008)

Secara umum bahan bakar mengandung unsur-unsur seperti Hidrogen (H), Karbon (C), Oksigen (O), Sulfur (S), dan Nitrogen (N). Terdapat sekitar 21% oksigen dan 78% nitrogen yang ada di udara, sedangkan sisanya merupakan elemen lainnya. Berbagai macam proses konversi energi yang terjadi di pembakaran adalah proses fisika dan kimia, pelepasan panas dari energi kimia, perpindahan panas, gerakan fluida, dan proses perpindahan massa.

Oksidasi eksotermis adalah menghasilkan panas yang terjadi di pembakaran. Oksigen untuk pembakaran didapat dari udara kering, udara kering terdiri 21% oksigen dan 78% nitrogen. Maka C_xH_y merupakan reaksi Stoikiometrik pembakaran Hidrokarbon dengan persamaan :

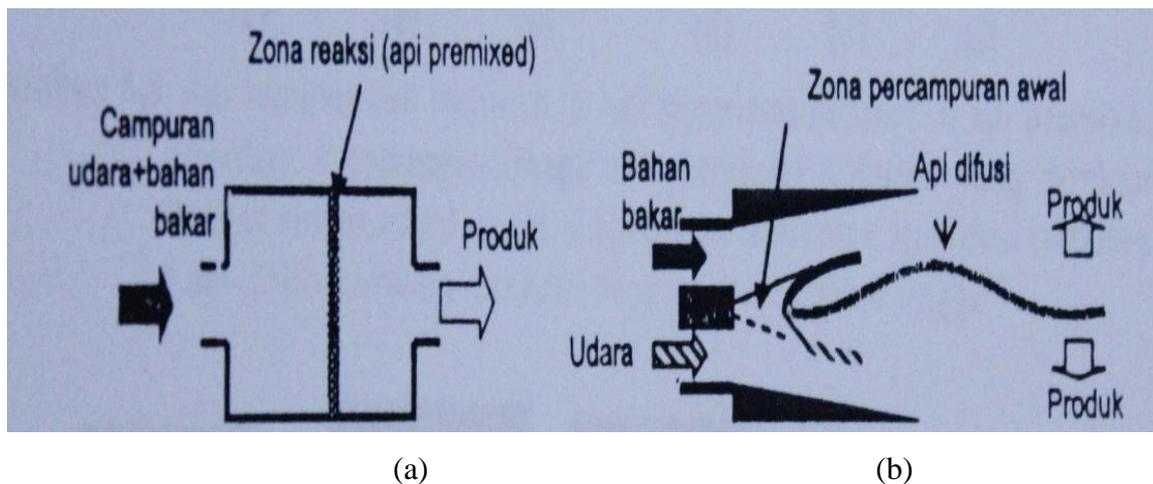


Persamaan diatas adalah persamaan yang ideal dimana hasil dari pembakaran yang sempurna. Pada penelitian menggunakan bahan bakar metana, dimana terdapat beberapa tahapan yang dilewati. Hasil awal yang didapat adalah formaldehida (H_2CO). Oksidasi formaldehida menghasilkan radikal formil (HCO) yang nantinya akan menghasilkan karbon monoksida (CO). Sebagai contoh pembakaran antara CH_4 dan Udara pada gambar 2.3 dapat dituliskan dalam persamaan sebagai berikut :



2.3.1 Klasifikasi Pembakaran

Pada umumnya terdapat beberapa jenis pembakaran. Pertama, pembakaran berdasarkan pencampuran bahan bakar dan udara yaitu pembakaran *premixed* dan difusi. Kedua, pembakaran berdasarkan jenis aliran pembakaran yaitu pembakaran *laminar* dan pembakaran *turbulent*.



Gambar 2.2 Cara reaktan terbakar (a) Pembakaran *Premixed* (b) Pembakaran Difusi
Sumber : Wardana (2008:149)

Berdasarkan gambar 2.2a udara dan bahan bakar bercampur di zona reaksi dan telah bercampur secara sempurna kemudian terbakar secara sempurna, sedangkan pada gambar 2.2b menunjukkan pencampuran udara dan bahan bakar sebelum masuk kedalam ruang bakar lalu terbakar di dalam zona reaksi. Dalam proses raksinya berlangsung pada tekanan tetap dan sangat cepat.

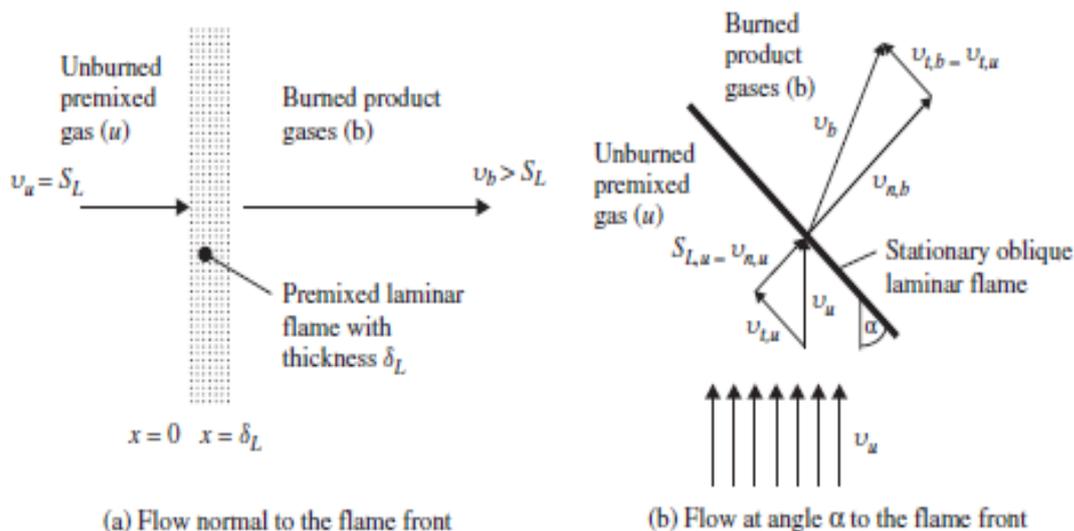
2.3.2 Pembakaran *Premixed*

Pembakaran *premixed* adalah proses pembakaran dimana bahan bakar dan oksidator dicampur terlebih dahulu secara mekanik, kemudian dibakar (Wardana, 2008). Contoh pembakaran *premixed* dapat dilihat pada pembakaran motor bensin, pembakaran roket, dll. Proses reaksi pembakaran ini berlangsung sangat cepat dan berlangsung pada tekanan tetap.

Dibandingkan dengan pembakaran difusi, pembakaran *premixed* memiliki keuntungan lebih dimana efisiensi pembakaran yang tinggi, disebabkan bahan bakar dan udara sudah tercampur secara mekanik sebelum masuk ke dalam reaksi pembakaran. Kemudian kalor atau energi yang dihasilkan lebih besar dikarenakan pembakaran yang terjadi sangat cepat. Temperatur bahan bakar merupakan faktor dalam pembuatan polutan, dimana dapat diatur dengan cara mengatur perbandingan antara bahan bakar dan udara.

2.4 Kecepatan Api Laminar

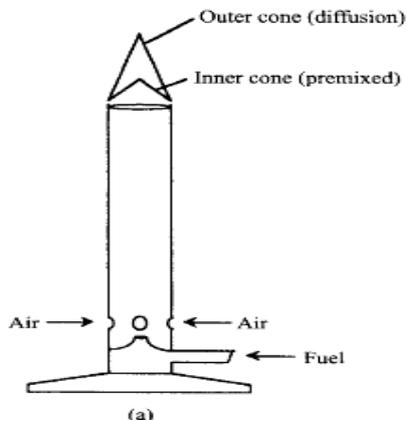
Kecepatan api laminar bisa didefinisikan sebagai kecepatan normal reaktan *premixed* yang mengalir ke dalam zona api ditunjukkan pada gambar 2.3 (a), dimana arah aliran reaktan tegak lurus dengan bagian *flame front*. Kecepatan api merupakan nilai yang bisa diukur dari perluasan api dalam reaksi pembakaran.



Gambar 2.3 (a) Aliran normal pada arah depan api, (b) Aliran pada sudut α pada bagian depan api

Sumber : Keneth (2005:46)

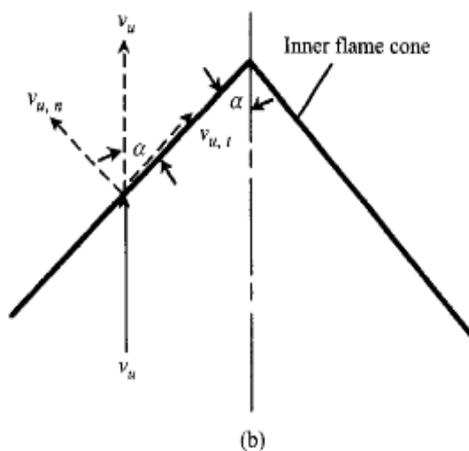
Kecepatan api laminar didefinisikan sebagai kecepatan gas yang tidak terbakar melalui gelombang pembakaran dengan arah normal menuju ke permukaan (K.Keneth, 2005).



Gambar 2.4 Skema *bunsen burner* dan nyala api
Sumber : Turn (2010:257)

Pada *bunsen burner* dapat dihasilkan nyala api laminar yang dapat diamati lebih lanjut. Dimana pada *bunsen burner* yang muncul tidak hanya api *premixed* melainkan juga terdapat api difusi di sekitar api laminar.

Gambar 2.4 menunjukkan skema dan bagaimana nyala api dihasilkan. Jenis nyala *bunsen burner* merupakan *dual – flame*, dimana bagian yang kaya akan bahan bakar akan dikelilingi oleh api difusi. Api difusi sendiri dihasilkan ketika Karbon Monoksida dan Hidrogen dihasilkan dari bagian dalam api yang bersentuhan langsung dengan udara sekitar. Agar api yang dihasilkan; tetap stasionaris, kecepatan api harus sama dengan kecepatan normal komponen dari gas yang tidak terbakar pada tiap tiap bagiannya. Hal ini dapat dijelaskan dengan penggambaran vektor diagram.



Gambar 2.5 Vektor diagram kecepatan nyala api laminar
Sumber : Turn, (2010:257)

Sehingga didapatkan kecepatan api laminar pada metode *bunsen burner* dapat dihitung dengan persamaan:

$$S_L = V_u \cdot \sin \alpha \quad (2-4)$$

Dengan:

S_L = Kecepatan api laminar (cm/s)

V_u = Kecepatan reaktan (cm/s)

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

Nilai dari kecepatan reaktan/kecepatan pembakaran sendiri dapat ditentukan dengan persamaan berikut:

$$v = \frac{Q_{fuel} + Q_{air}}{A_b} \quad (2-5)$$

Dengan:

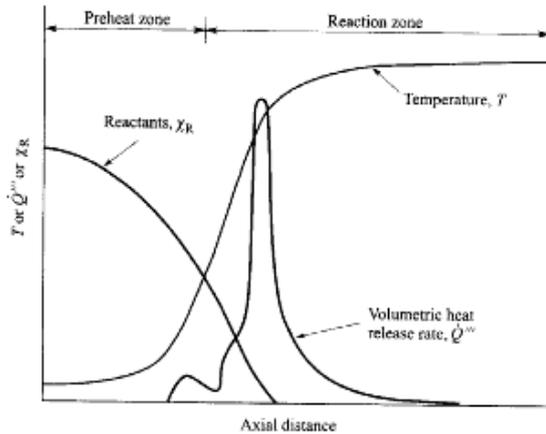
Q_{fuel} = Debit aliran bahan bakar [cm^3/s]

Q_{air} = Debit aliran udara [cm^3/s]

A_b = Luas bagian melintang *burner* [cm^2]

2.5 Klasifikasi Nyala Api

Nyala api dari hasil pembakaran dapat dibedakan berdasarkan aspek yang berbeda. Berdasarkan kondisi udara dan bahan bakar mencapai daerah reaksi nyala maka nyala api dapat dikategorikan menjadi *non premix*, *partially premix*, dan *fully premix*. Pada pembakaran premix perbandingan campuran/*mixing* antara bahan bakar dan udara sangat penting dalam menentukan hasil pembakarannya.



Gambar 2.6 Struktur Temperatur dan Heat Release Rate Nyala Api Laminar
Sumber : Turn (2010:255)

Berdasarkan gambar grafik diatas terdapat dua bagian nyala api laminar:

- *Zona pre-heat*

Pada temperature gas yang tidak mengalami pembakaran meningkat sampai pada suatu titik yang berubah ubah dan melepaskan sedikit kalor.

- *Zona Reaksi*

Dimana daerah tempat terjadinya pembakaran langsung dan sebagian besar energi dilepaskan, dalam bentuk panas.

2.6 *Air-Fuel Ratio (AFR)*

Air-fuel ratio atau rasio udara dan bahan bakar merupakan perbandingan jumlah mol bahan bakar dengan mol udara. Perbandingan antara bahan bakar dan udara sangat berpengaruh terhadap hasil pembakarannya. Berikut rumus mencari stokiometrik AFR:

$$AFR = \frac{N_{udara}}{N_{bahan\ bakar}} \quad (2-6)$$

$$AFR = \frac{M_{udara}}{M_{bahan\ bakar}} \quad (2-7)$$

Keterangan:

AFR = *Rasio* udara dan bahan bakar dalam kondisi stoikiometrik

$N_{bahan\ bakar}$ = Jumlah mol bahan bakar (mol)

N_{udara} = Jumlah mol udara (mol)

$M_{bahan\ bakar}$ = Massa bahan bakar (kg)

M_{udara} = Massa udara (kg)

Untuk proses pembakaran stokiometri CH_4 dapat diperoleh:

$$AFR = \frac{N_{\text{udara}}}{N_{\text{bahan bakar}}} = \frac{2(1+3,7)}{1} = 9,52 \frac{\text{mol}_{\text{udara}}}{\text{mol}_{\text{bahan bakar}}}$$

Karena massa mol udara = 28,95 kg/kmol dan massa molal CH_4 = 16 kg/kmol, AFR juga dapat dinyatakan dengan dasar massa sebagai berikut:

$$AFR = \frac{M_{\text{udara}}}{M_{\text{CH}_4}} = 9,52 \times \frac{Mr_{\text{udara}}}{Mr_{\text{CH}_4}}$$

$$AFR = 9,52 \times \frac{28,97}{16} = 17,2 \frac{\text{kg}_{\text{udara}}}{\text{kg}_{\text{bahan bakar}}}$$

Sumber: (Wardana, 2008:58-59)

2.7 Equivalence Ratio

Equivalence Ratio merupakan perbandingan stokiometrik antara udara dan bahan bakar $(AFR)_{\text{stoic}}$ terhadap perbandingan aktual udara dan bahan bakar $(AFR)_{\text{aktual}}$.

- Jika $\Phi > 1$ kelebihan bahan bakar sehingga campuran kaya akan bahan bakar (*fuel-rich mixture*)
- Jika $\Phi = 1$ merupakan campuran stokiometrik
- Jika $\Phi < 1$ merupakan campuran yang miskin akan bahan bakar (*fuel-lean mixture*)

2.8 Stabilitas Nyala Api

Pada bunsen burner penyebaran nyala api dan bentuk kestabilan nyala api dipengaruhi oleh kesetimbangan antara laju aliran massa bahan bakar dan udara. Keadaan yang berkaitan dengan kestabilan nyala api berdasarkan aliran reaktannya adalah *flashback*, *lift-off*, dan *blow-off*. Batas pengukuran lain yang dapat menggambarkan stabilitas nyala api adalah kecepatan nyala api, daerah stabilitas nyala, dan batas mampu nyala api.

Ada beberapa kesetidakstabilan dalam pembakaran *bunsen burner* adalah:

1. Ketidakstabilan Taylor adalah perubahan densitas pada percepatan fluida.
2. Ketidakstabilan difusivitas termal adalah gubungan reaksi difusi dan energi kalor dengan nyala primer.
3. Ketidakstabilan akustik adalah interaksi gelombang suara dalam proses pembakaran.
4. Ketidakstabilan sistem adalah interaksi aliran dalam komposisi reaksi sistem yang tidak sama.

5. Ketidakstabilan Landau, ketidakstabilan bentuk proses pembakaran yang tidak meliputi *bouyancy* maupun akustik tetapi meliputi penurunan kerapatan yang di hasilkan oleh proses pembakaran aliran yang tidak mampu dipadatkan (*incompressible*).

2.8.1 Blow-off

Blow-off merupakan suatu fenomena dimana nyala api yang padam diakibatkan dari kecepatan aliran reaktan melebihi kecepatan pembakaran. Pada kondisi ini lebih cepat menghabiskan bahan bakar dan dapat merusak bibir *nozle* jika dilakukan dengan intensitas yang tinggi. Untuk menghindari fenomena blow-off sebaiknya dilakukan pengaturan kecepatan reaktan dan kecepatan pembakaran yang baik.

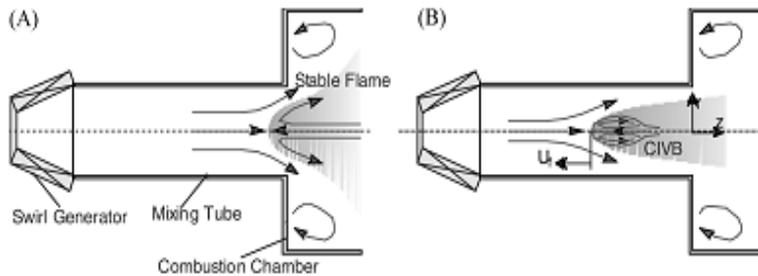
2.8.2 Lift-off

Lift-off merupakan fenomena dimana nyala api tidak menyentuh bibir tabung *burner*, tetapi nyala api akan stabil pada jarak tertentu dari tabung *burner*. Seperti *flashback*, fenomena ini berhubungan dengan kecepatan api laminar dan kecepatan aliran yang sebanding.

Fenomena *lift-off* ini tergantung pada nyala api dan aliran fluida yang ada di mulut *burner*. Pada saat nyala api berada pada bagian bawah yang dekat dengan bibir *burner* itu disebabkan oleh kecepatan aliran yang rendah. Dan sebaliknya apabila meningkatnya kecepatan aliran hingga mencapai kecepatan kritis, api akan terangkat dan menjauh dari ujung *burner*. Dan jika kecepatan terus ditambah maka api akan padam.

2.8.3 Flashback

Fenomena ini disebabkan ketika kecepatan pembakaran lebih cepat dari kecepatan aliran udara dan bahan bakar, sehingga api akan masuk dan masuk ke tabung pembakaran. Fenomena *flashback* sangat mengganggu dan berbahaya dari sisi keamanan. *Flashback* biasanya terjadi apabila kecepatan aliran bahan bakar dikurangi atau bahkan ditutup. Ketika kecepatan nyala api melebihi kecepatan aliran, perambatannya menyala menjahui api. Sehingga saat aliran bahan bakar dikurangi atau dihentikan nyala akan merambat ke selang dan menuju tabung.

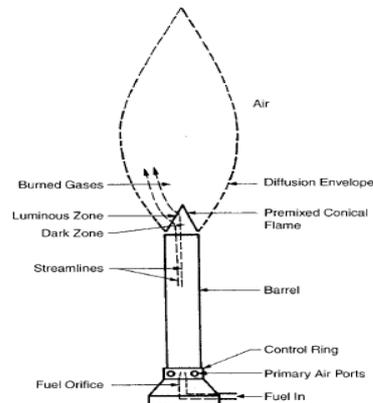


Gambar 2.7 Fenomena *Flashback*
Sumber : Leuwen (2008,1178)

2.9 *Bunsen Burner*

Bunsen burner merupakan alat pembakaran yang ditemukan oleh Robert Bunsen (1811-1899) dimana dapat menghasilkan nyala api premix (*premix flame*). Prinsip *bunsen burner* adalah menggunakan pengaturan aliran campuran udara-bahan bakar gas secara terus-menerus dan menghasilkan nyala api.

Ketika bahan bakar dan campuran udara diberi energi panas yang cukup, maka akan terjadi reaksi pembakaran diikuti dengan nyala api. Nyala api akan tetap stabil selama laju bahan bakar dan aliran udara dipertahankan secara konstan.



Gambar 2.8 Skema *Premixed Flame* Pada *Bunsen Burner*
Sumber : Haber, 2007

2.10 *Perpindahan Panas*

Pada dasarnya prinsip perpindahan panas adalah berpindahnya kalor dari benda bersuhu tinggi ke benda yang suhu lebih rendah. Ada tiga cara perpindahan kalor antara lain konduksi (hantaran), konveksi (aliran), dan radiasi (pancaran). Pada *bunsen burner* perpindahan kalor yang banyak terjadi yaitu dengan cara konduksi dan konveksi. Secara konduksi perpindahan panas terjadi pada sisi *bunsen burner* dan sisi *ring*. Sedangkan perpindahan panas secara konveksi terjadi pada permukaan *ring* yang dipanaskan dengan suhu ruangan sekitar.

1. Perpindahan panas konduksi

$$Q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{dx} \quad (2-8)$$

Dimana :

- Q : Kalor (Watt)
 k : Konduktivitas Thermal (Watt/mK)
 A : Luas penampang (m²)
 ΔT : Suhu (K)
 dx : Panjang logam (m)

2. Perpindahan panas konveksi

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T \quad (2-9)$$

Dimana :

- Q : Kalor (Watt)
 h : Koefisien konveksi (Watt/m²K)
 ΔT : Suhu (K)
 A : Luas penampang (m²)

2.11 Bilangan *Reynolds*

Dalam mekanika fluida, bilangan Reynolds adalah rasio antara gaya inersia (ρv^2) terhadap gaya viskos (μ/L) yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu. Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasikan jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar, turbulen atau transisi. Namanya diambil dari Osborne Reynolds (1842–1912) yang mengusulkannya pada tahun 1883.

Bilangan Reynold merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang paling penting dalam mekanika fluida dan digunakan, seperti halnya dengan bilangan tak berdimensi lain, untuk memberikan kriteria untuk menentukan dynamic similitude. Jika dua pola aliran yang mirip secara geometris, mungkin pada fluida yang berbeda dan laju alir yang berbeda pula,

memiliki nilai bilangan tak berdimensi yang relevan, keduanya disebut memiliki kemiripan dinamis. Berikut adalah persamaan umum dari billangan *Reynolds* :

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \text{ atau } Re = \frac{V d}{\nu} \quad (2-10)$$

(Cimbala & Cengel, 2002, p.324)

Dimana:

Re = bilangan *Reynolds*

V = kecepatan fluida, (ms^{-1})

d = diameter pipa, (m)

μ = viskositas absolut fluida dinamis, (1 cp = 0.1 g/dm s)

ρ = kerapatan (densitas) fluida. (kg/m^3)

ν = viskositas fluida kinematis (m^2/s)

Aliran fluida juga di pengaruhi oleh massa alir dan *flow rate*. Untuk mencari nilai dari kedua hal tersebut dapat digunakan persamaan :

$$Q = V \cdot A \text{ atau } V = \frac{Q}{A} \quad (2-11)$$

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A \text{ atau } \dot{m} = \rho \cdot Q \quad (2-12)$$

(Cimbala & Cengel, 2002, p. 174)

Pada aliran yang saling bertemu pada T ataupun sambungan lainnya, *flow rate* dapat di ketahui dengan persamaan :

$$\sum_{in} Q = \sum_{out} Q \text{ maka } V = \frac{Q_1 + \dots + Q_n}{A} \quad (2-13)$$

(Cimbala & Cengel, 2002, p. 178)

Dimana :

Q = *Flow rate* / debit aliran fluida (m^3)

V = Kecepatan aliran fluida (ms^{-1})

A = Luas penampang aliran fluida (m^2)

ρ = kerapatan (densitas) fluida. (kg/m^3)

2.12 Hipotesis

Meningkatnya diameter *ring* pada bibir *bunsen*, maka semakin menurun temperatur api laminar, hal ini dikarenakan semakin luas permukaan perpindahan kalor semakin meningkat sehingga perpindahan kalor semakin cepat. Sedangkan tinggi api akan semakin menurun seiring berkurangnya nilai *equivalence ratio*. Kecepatan api laminar pembakaran akan semakin meningkat seiring dengan berkurangnya nilai *equivalence ratio* hingga batas tertentu sebelum terjadi *blow-off* ataupun *flashback*. Dan akan mengalami penurunan seiring meningkatnya variasi diameter *ring* yang dipasangkan pada *bunsen burner*.