

BAB 2

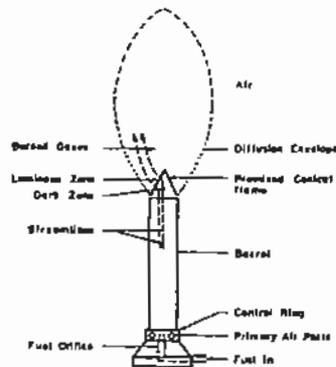
DASAR TEORI

2.1 BUNSEN'S BURNER

Bunsen Burner merupakan *burner* pertama yang dapat menghasilkan nyala api premix (*premix flame*). Alat ini ditemukan oleh Robert William Bunsen pada tahun 1855. Bunsen Burner ini menggunakan prinsip pengaturan aliran campuran udara-bahan bakar gas secara kontinyu. Bahan bakar gas masuk ke dalam Burner melalui saluran masuk pipa di dasar Burner yang ujung pipanya berbentuk nosel (*nozzle*) agar bahan bakar gas langsung dapat bercampur dengan baik dengan udara primer (*primary air*) yang masuk secara radial melalui *control ring*. Sepanjang melewati tabung pembakar (*barrel*), gas dan udara akan bercampur dengan baik mendekati campuran homogen dan mengalir keluar dari ujung tabung pembakar secara kontinyu.

Jika diberikan sejumlah energi panas minimum (*minimal ignition energy*) pada aliran campuran, 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 (*flame*). Selama besarnya laju perubahan reaksi konsentrasi reaktan : $\frac{d\varepsilon}{dt}$ atau *Rate of Reaction* (RR) yang terjadi adalah konstan, serta laju aliran campuran udara-bahan bakar juga dipertahankan konstan, maka nyala api premix akan tetap stabil (*steady*).

Pada daerah *luminous* terjadi reaksi dan pelepasan energi panas sebagai entalpi reaksi gas yang terbakar, sedangkan di bawahnya terdapat daerah gelap (*dark zone*), yaitu tempat di mana molekul gas yang belum terbakar berubah alirannya dari arah sejajar sumbu tabung pembakar ke arah luar tegak lurus permukaan batas daerah gelap.



Gambar 2.1 Nyala api pada Bunsen burner

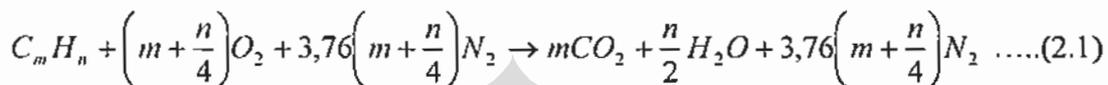
Selanjutnya gas yang belum terbakar mendapatkan energi panas sepanjang tebal daerah *Preheating Zone* (η_0) sampai temperatur nyala (*Ignition Temperature* : T_{ig}) tercapai dan kemudian bereaksi secara berulang dengan cepat sepanjang tebal daerah *Reaction Zone* (η_R), diiringi dengan pelepasan energi panas yang lebih besar lagi hingga mencapai temperatur nyala api (*Flame Temperature* : T_f). Warna dari daerah *luminous* biasanya berubah menurut rasio udara-bahan bakar yaitu jika rasio campuran kurus (*lean mixture*) maka warna permukaan kerucut nyala *luminous* adalah ungu, yang menandakan banyaknya dihasilkan CH radikal. Dan jika rasio campuran kaya bahan bakar (*rich mixture*), maka permukaan kerucut nyala *luminous* akan berwarna hijau mendekati kebiruan, yang menunjukkan konsentrasi molekul C_2 tinggi.

2.2 REAKSI PEMBAKARAN

Secara umum, pembakaran dapat didefinisikan sebagai proses reaksi kimia antara bahan bakar dan oksidator dengan melibatkan pelepasan energi sebagai panas yang signifikan. Bahan bakar (*fuel*) merupakan segala substansi yang melepaskan panas ketika dioksidasi dan secara umum mengandung unsur-unsur karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O), nitrogen (N), dan sulfur (S). Sementara oksidator adalah segala substansi yang mengandung oksigen (misalnya udara) yang akan bereaksi

dengan bahan bakar (*fuel*). Pada proses pembakaran hidrokarbon terjadi interaksi proses kimia dan fisika, pelepasan panas yang berasal dari energi ikatan-ikatan kimia, proses perpindahan panas, proses perpindahan massa, dan gerakan fluida.

Proses pembakaran selalu akan menghasilkan panas yang disebut sebagai proses oksidasi eksotermis. Jika oksigen yang dibutuhkan untuk proses pembakaran diperoleh dari udara, di mana udara terdiri dari 21% oksigen dan 78% nitrogen, maka reaksi stoikiometrik pembakaran hidrokarbon murni C_mH_n dapat ditulis dengan persamaan:



Persamaan ini telah disederhanakan karena cukup sulit untuk memastikan proses pembakaran yang sempurna dengan rasio ekivalen yang tepat dari udara. Jika terjadi pembakaran tidak sempurna, maka hasil persamaan di atas CO_2 dan H_2O tidak akan terjadi, akan tetapi terbentuk hasil oksidasi parsial berupa CO , CO_2 , dan H_2O . Juga sering terbentuk hidrokarbon tak jenuh, formaldehida dan kadang-kadang didapat juga karbon.

Pada temperatur yang sangat tinggi gas-gas pecah atau terdisosiasi menjadi gas-gas yang tak sederhana, dan molekul-molekul dari gas dasar akan terpecah menjadi atom-atom yang membutuhkan panas dan menyebabkan kenaikan temperatur. Reaksi akan bersifat endotermik dan disosiasi tergantung pada temperatur dan waktu kontak.

2.2.1 Rasio Volumetrik

Ada dua cara dalam mendefinisikan kuantitas dari suatu campuran yaitu berdasarkan beratnya (gravimetrik) atau berdasarkan volumenya (volumetrik). Simbol-simbol yang biasa digunakan antara lain:

χ_i = fraksi volumetrik (fraksi mol) dari unsur atau molekul i

Y_i = fraksi gravimetrik (fraksi massa) dari unsur atau molekul i

Jumlah dari fraksi mol atau fraksi massa untuk semua spesies dalam campuran harus merupakan sebuah kesatuan:

$$\sum_N \chi_i = \sum_N Y_i = 1 \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Dimana fraksi massa dari unsur ke i adalah :

$$Y_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{m_i}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_i + m_{i+1} + \dots + m_n} = \frac{m_i}{m_{total}} = \frac{m_i}{m_{camp}} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Fraksi mol untuk campuran yang tersusun atas N_1 mol komponen 1, N_2 mol komponen 2, N_3 mol komponen 3, ... N_i mol komponen i, ditulis sebagai berikut:

$$\chi_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} = \frac{N_i}{N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_i + N_{i+1} + \dots + N_n} = \frac{N_i}{N_{total}} = \frac{N_i}{N_{camp}} \quad \dots (2.4)$$

Hubungan antara fraksi massa dan mol dapat disederhanakan menjadi :

$$\chi_i = \frac{N_i}{N_{camp}} = \frac{\left(\frac{m_i}{M_i}\right)}{\left(\frac{m_{camp}}{M_{camp}}\right)} = \left(\frac{m_i}{m_{camp}}\right) \left(\frac{M_{camp}}{M_i}\right) = Y_i \left(\frac{M_{camp}}{M_i}\right) \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

2.2.2 Campuran Udara-Bahan Bakar

Dalam suatu proses pembakaran beberapa hal penting yang perlu diperhatikan antara lain bahan bakar, udara (oksigen), kalor, dan reaksi kimia. Selain itu, perbandingan campuran bahan bakar dan udara memegang peranan yang penting pula dalam menentukan hasil proses pembakaran itu sendiri yang secara langsung mempengaruhi reaksi pembakaran yang terjadi serta hasil keluaran (produk) proses pembakaran.

Beberapa metode yang dapat digunakan untuk menghitung rasio campuran bahan bakar dan udara antara lain AFR (*Air Fuel Ratio*), FAR (*Fuel Air Ratio*), dan Rasio Ekuivalen (Φ).

2.2.3. Rasio Udara-Bahan Bakar (*Air Fuel Ratio/AFR*)

Metode ini merupakan metode yang paling sering digunakan dalam mendefinisikan campuran dan merupakan perbandingan antara massa dari udara dengan bahan bakar pada suatu titik tinjau. Secara simbolis, AFR dihitung sebagai:

$$AFR = \frac{m_a}{m_f} = \frac{M_a N_a}{M_f N_f} \dots\dots\dots (2.6)$$

Jika nilai aktual lebih besar dari nilai AFR, maka terdapat udara yang jumlahnya lebih banyak daripada yang dibutuhkan sistem dalam proses pembakaran dan dikatakan miskin bahan bakar dan jika nilai aktual lebih kecil dari AFR stoikiometrik maka tidak cukup terdapat udara pada sistem dan dikatakan kaya bahan bakar.

2.2.4 Rasio Bahan Bakar-Udara (*Fuel Air Ratio/FAR*)

Rasio bahan bakar-udara merupakan kebalikan dari AFR yang dirumuskan sebagai berikut:

$$FAR = \frac{m_f}{m_a} = \frac{M_f N_f}{M_a N_a} \dots\dots\dots (2.7)$$

2.2.5 Rasio Ekuivalen (*Equivalent Ratio, Φ*)

Metode ini termasuk juga metode yang umum digunakan. Rasio ekuivalen didefinisikan sebagai perbandingan antara rasio udara-bahan bakar (AFR) stoikiometrik dengan rasio udara-bahan bakar (AFR) aktual atau juga sebagai perbandingan antara rasio bahan bakar-udara (FAR) aktual dengan rasio bahan bakar-udara (FAR) stoikiometrik.

$$\Phi = \frac{AFR_a}{AFR_s} = \frac{FAR_s}{FAR_a} \dots\dots\dots (2.8)$$

- $\Phi > 1$ terdapat kelebihan bahan bakar dan campurannya disebut sebagai campuran kaya bahan bakar (*fuel-rich mixture*)
- $\Phi < 1$ campurannya disebut sebagai campuran miskin bahan bakar (*fuel-lean mixture*)
- $\Phi = 1$ merupakan campuran stoikiometrik (pembakaran sempurna)

2.3.6 Udara Berlebih (*Excess Air – XSA*)

Dalam proses pembakaran sulit untuk mendapatkan pencampuran yang memuaskan antara bahan bakar dengan udara pada proses pembakaran aktual. Udara perlu diberikan dalam jumlah berlebih untuk memastikan terjadinya pembakaran secara sempurna seluruh bahan bakar yang ada.

Udara lebih (*excess air*) didefinisikan sebagai udara yang diberikan untuk pembakaran dalam jumlah yang lebih besar dari jumlah teoritis yang dibutuhkan bahan bakar. Udara lebih dapat dideduksi dengan pengukuran komposisi produk pembakaran dalam keadaan kering (*dry basis*). Jika produk merupakan hasil pembakaran sempurna, maka persentase udara lebih dapat dinyatakan sebagai:

$$\%XSA = \left[\frac{(X_{O_2})_{prod}}{(X_{N_2})_{prod} / 3,76 - (X_{N_2})_{prod}} \right] = \left[\frac{(N_{O_2})_{prod}}{(N_{N_2})_{prod} / 3,76 - (N_{N_2})_{prod}} \right] \dots\dots(2.9)$$

2.2.7 Beban Pembakaran (*Burning Load*)

Beban pembakaran didefinisikan sebagai perbandingan antara laju aliran gas yang dikalikan nilai kalornya dengan luas penampang tabung pembakar (*barrel*):

$$Burning\ Load(BL) = \frac{Q_f \times \rho_f \times LHV}{A_b} \dots\dots\dots (2.10)$$

Di mana

Q_f = kapasitas aliran gas (m^3/s)

ρ_f = densitas bahan bakar (kg/m^3)

LHV = nilai kalor bahan bakar (MJ/kg)

A_b = luas penampang barrel (m^2)

2.2.8 Viskositas Campuran Gas

Viskositas campuran dengan banyak komponen dapat dihitung dengan menggunakan persamaan Chapman-Enskog berikut:

$$\mu_{mix} = \frac{\sum_{\alpha} \chi_{\alpha} \mu_{\alpha}}{\sum_{\beta} \chi_{\beta} \Phi_{\alpha\beta}} \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

Dengan

$$\Phi_{\alpha\beta} = \frac{1}{8} \left(1 + \frac{M_{\alpha}}{M_{\beta}} \right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_{\alpha}}{\mu_{\beta}} \right)^{1/2} \left(\frac{M_{\beta}}{M_{\alpha}} \right)^{1/4} \right]^2 \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

Dimana :

μ_{mix} = viskositas kinematik campuran

χ_{α} = fraksi mol komponen α

χ_{β} = fraksi mol komponen β

M_{α} = berat molekul komponen α

M_{β} = berat molekul komponen β

2.2.9 Bilangan Froud

Bilangan froud merupakan bilangan yang menentukan apakah suatu nyala api dikendalikan oleh momentum dan gaya apung, maka bilangan Froud untuk nyala api (Fr) harus dievaluasi. Bilangan Froud secara fisik diartikan sebagai perbandingan antara momentum awal aliran terhadap gaya apung yang dialaminya. Untuk aliran yang mengalir pada burner, bilangan Froud didckati dengan persamaan :

$$Fr = \left(\frac{V^2}{d \cdot g} \right) \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana :

V = kecepatan aliran (m/s)

d = diameter barel (m)

g = gravitasi ($9,8 \text{ m}^2/\text{s}$)

2.2.10 Bilangan Reynold

Bilangan Reynold merupakan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya geserannya (viscous force), dinyatakan dengan persamaan :

$$Re = \frac{\rho V d}{\mu} \dots\dots\dots (2.14)$$

2.2.11 Bilangan Lewis

Bilangan Lewis merupakan perbandingan antara difusitas panas terhadap difusitas massa. Untuk menghitung bilangan Lewis pada aliran yang melewati barel didekati dengan persamaan :

$$Le = \frac{\alpha}{D} = \frac{\frac{k}{\rho C_p}}{0,5 \bar{u} d} \dots\dots\dots (2.15)$$

Dimana:

k = konduktivitas panas (W/m.C)

ρ = rapat massa (kg/m^3)

C_p = kapasitas panas (J/kg.C)

\bar{u} = kecepatan molekuler rata-rata (m/s)

d = diameter barel (m)

2.3 BAHAN BAKAR GAS

Bahan bakar (*fuel*) merupakan materi atau zat yang ditambahkan proses pemanasan atau pembakaran (sampai mencapai temperatur yang dapat menyebabkan terjadinya reaksi kimia dengan oksidator) akan melepaskan energi berupa panas dan cahaya. Bahan bakar yang digunakan saat ini memiliki komposisi kimia utama,

seperti karbon, hidrogen serta senyawanya (senyawa hidrokarbon/senyawa organik) yang dapat berfase gas, cair, maupun padat.

Bahan bakar gas (BBG) mempunyai beberapa keuntungan bila dibandingkan dengan bahan bakar yang lain, yaitu bahan bakar padat dan cair. Bahan bakar gas dapat terbakar dengan tanpa adanya asap dan abu karena proses pembakarannya dapat lebih sempurna dengan lebih sedikit menggunakan udara luar dan nyala api relatif dapat lebih mudah dikontrol. Namun, terdapat juga beberapa kelemahan, yaitu sulitnya menyimpan bahan bakar gas dalam jumlah yang besar dibanding dengan bahan bakar yang lain.

Bahan bakar gas dapat diklasifikasikan menjadi dua bagian, yaitu bahan bakar gas alam dan bahan bakar gas buatan. Gas alam secara umum dapat diperoleh dari hasil sampingan tempat pengeboran minyak dan pertambangan batubara. Namun, terkadang dapat juga dijumpai di sumber gas alam. Gas buatan dapat diperoleh dari kayu, gambut, batubara, minyak, oli dsb, dan juga sebagai hasil sampingan. Komponen utama bahan bakar gas yang dapat digunakan untuk proses pembakaran, yaitu metana, sedangkan untuk karbonmonoksida dan hidrogen jumlahnya relatif lebih sedikit.

2.3.1 Gas Alam (*Natural Gas*)

Gas alam sebagian besar merupakan campuran dari senyawa hidrokarbon dengan sedikit jumlah materi nonhidrokarbon yang berfase gas. Sebagai bahan bakar, gas alam sangat ideal karena umumnya bebas dari kandungan gas tidak terbakar atau residu padat. Pada saat dibakar umumnya menghasilkan nyala berwarna biru dan sangat mudah terbakar jika tercampur udara pada komposisi yang tepat.

Komposisi kimia gas alam sebagian besar terdiri dari metana (CH_4) dan sejumlah yang lebih sedikit etana (C_2H_6), propana (C_3H_8), butana (C_4H_{10}), serta pentana (C_5H_{12}). Kadang-kadang terkandung pula sulfur, namun jumlahnya dapat diabaikan. Karbondioksida dan nitrogen merupakan komponen tak terbakar yang sering terdapat dalam gas alam dalam jumlah sangat kecil. Jumlah komposisi yang terdapat pada gas alam yang diperoleh dari pengeboran minyak, yaitu :

Metana 68 – 96 %

Etana 3 – 30 %

Sedangkan pada pertambangan batubara biasanya berkisar :

Metana 93 – 99 %

Etana > 3 %

Karbondioksida > 4 %

Nitrogen, dll > 6 % [sp sharma]

2.3.2 Gas Buatan

Bahan bakar gas buatan banyak diproduksi melalui proses gasifikasi atau karbonisasi bahan bakar padat (terutama batubara), dan beberapa proses lainnya. Kadang-kadang gas-gas ini diberi perlakuan tertentu untuk meningkatkan nilai kalornya. Jenis-jenis BBG buatan meliputi *Liquified Petroleum Gas (LPG)* dan *refinery oil gas, producer gas, water gas, blast furnace gas, wood gas, peat gas, coal gas, coke oven gas, dan bio gas.*

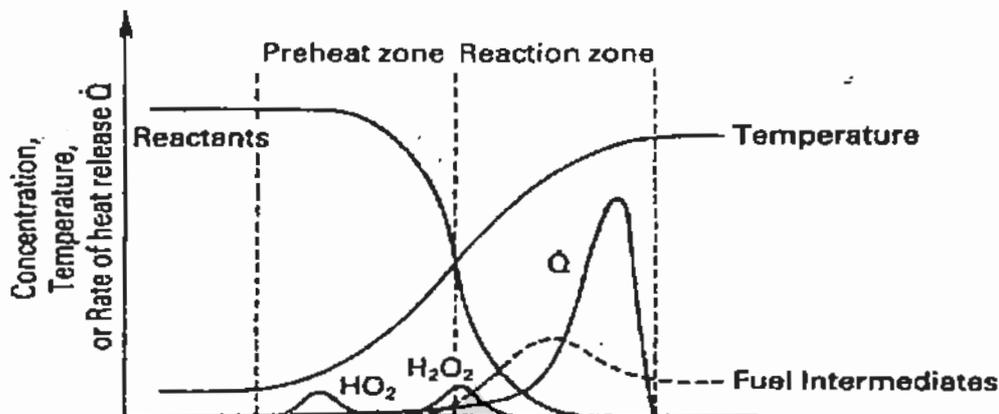
LPG (*Liquified Petroleum Gas*) yang populer di Indonesia dengan nama Elpiji didapat dari proses pengolahan gas alam atau dari minyak mentah (*Crude Oil*). Dari gas alam selain dihasilkan LNG juga didapat LPG, sedangkan dari pengolahan minyak mentah sebagian besar produk ringan dapat menghasilkan LPG dengan proses fraksinasi, *nafta reforming, thermal/catalytic cracking.*

2.4 NYALA API (FLAME)

Suata nyala api adalah penyebaran sendiri secara terus menerus yang dibatasi oleh daerah pembakaran dengan kecepatan *subsonic* (di bawah kecepatan suara), atau dengan kata lain nyala api (*flame*) merupakan gelombang panas yang terjadi akibat reaksi kimia eksotermis yang cepat.

Terdapat dua klasifikasi utama dari nyala api yaitu nyala api *premix (premixed flame)* dan nyala api difusi (*diffusion flame*) . Nyala api *premix (premixed flame)* adalah jenis di mana bahan bakar dan udara bercampur sebelum terjadinya proses

pembakaran. Nyala api difusi timbul sewaktu udara berdifusi ke bahan bakar di dalam nyala api (*flame*).



Gambar 2.2 Profil Nyala Api

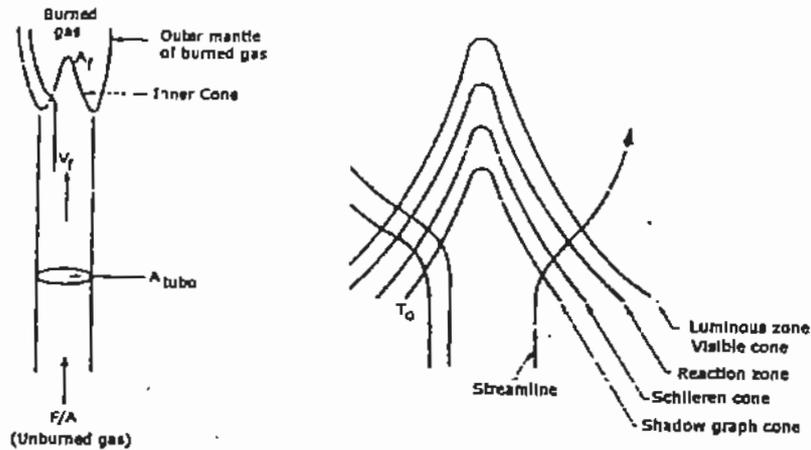
Dari gambar di atas terlihat bahwa nyala terdiri dari 2 daerah, yaitu:

1. Zona pra pemanasan (*preheat zone*)
Daerah di mana sedikit panas yang dilepaskan dan masih banyak bahan bakar yang belum terbakar (*unburn fuel*).
2. Zona Pemanasan (*reaction zone*)
Daerah di mana sebagian besar energi kimia dilepaskan.

2.4.1 Nyala api *premix* (*premixed flame*)

Nyala api *premix* (*premixed flame*) terbentuk jika bahan bakar dan oksidator (udara) sudah tercampur sebelum masuk ke dalam daerah reaksi, sedangkan nyala api difusi terbentuk karena bahan bakar dan oksidator saat memasuki daerah reaksi belum tercampur.

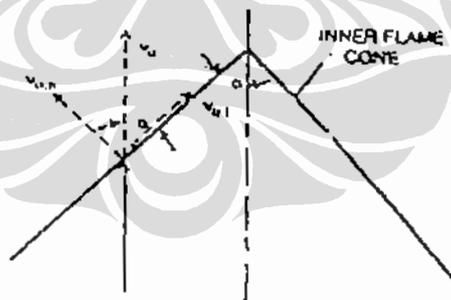
Nyala api *premix* (*premixed flame*) terdiri atas daerah terang, menunjukkan tempat terjadinya reaksi dan energi panas dilepaskan daerah reaksi (*reaction zone*) yang mempunyai ketebalan ± 1 mm. Warna terang ini dapat berubah-ubah tergantung rasio udara dan bahan bakar. Daerah Schlieren (*Schlieren zone*) dan daerah gelap (*Dark zone*), merupakan daerah transisi terjadinya perubahan molekul gas menjadi gas yang siap bereaksi pada jarak daerah pemanasan awal (*Preheating zone*).



Gambar 2.3 Struktur Nyala Api *Premix*

Sumber : Kuo, Kenneth K. *Principle of Combustion* (Canada: John Willey and Sons, 1986)

Gambar di atas menunjukkan secara skematik suatu struktur nyala api yang dihasilkan oleh suatu *Bunsen burner*. Nyala api khas hasil *Bunsen burner* adalah nyala rangkap, yaitu inti nyala *premix* yang kaya akan bahan bakar dikelilingi dengan nyala difusi. Bentuk nyala api sangat ditentukan oleh kombinasi pengaruh profil kecepatan perambatan nyala api (*Flame Propagation*) dan pengaruh hilangnya panas ke dinding tabung (*Flame Quenching*).



Gambar 2.4 Vektor Diagram Kecepatan Nyala Laminar

Supaya kontur struktur nyala api tidak berubah, maka kecepatan nyala api harus sama dengan kecepatan normal komponen dari campuran udara-bahan bakar

yang belum terbakar pada setiap lokasinya, dan khususnya pada kondisi aliran gas laminar dengan bilangan $Re < 2300$ maka kecepatan nyala api termasuk kecepatan nyala api laminar (S_L) tidak dipengaruhi oleh bilangan Reynold dan dapat dituliskan persamaannya sebagai berikut:

$$S_L = V_u \sin \alpha \quad \dots\dots\dots (16)$$

2.4.2 Laju Nyala Api Laminar

Proses reaksi pembakaran dalam suatu nyala api adalah gabungan dari reaksi kimia, perpindahan panas (konduksi, konveksi, dan radiasi), perpindahan massa dan momentum dengan difusi dan pola aliran sehingga bentuk dan ukuran nyala sangat dipengaruhi oleh tahapan proses yang terjadi, sehingga bentuk nyala api dimensi satu dibagi menjadi empat daerah tahapan proses yaitu:

- Daerah gas yang belum terbakar (*Unburned gas zone*)
- Daerah pemanasan awal (*Preheating zone*)
- Daerah reaksi (*Reaction zone*)
- Daerah gas terbakar (*Burned gas*)

Gas *premix* yang akan berubah menjadi nyala *premix* memiliki kesamaan pada kecepatan, temperatur, dan konsentrasi dengan bentuk fisik yang tetap dalam daerah gas yang belum terbakar (*unburned gas zone*). Dalam daerah *preheating* temperatur naik akibat konduksi energi panas dan pada daerah ini gas *premix* menerima energi panas lebih besar dibandingkan daerah lain.

Daerah reaksi dibagi menjadi dua daerah yaitu:

1. Daerah reaksi primer, di mana sebagian besar hidrokarbon bereaksi, akibatnya laju reaksi dan temperatur naik secara cepat.
2. Daerah setelah pembakaran (*after-burning region*), di mana terjadi perubahan bentuk produk pertengahan seperti CO dan H₂ menjadi CO₂ dan H₂O dengan laju reaksi lebih lambat dan kenaikan temperatur yang rendah.

2.5 KARAKTERISTIK NYALA

2.5.1 Batas Mampu Nyala (*Flamability Limits*)

Campuran bahan bakar dan oksidator dapat mendukung terjadinya nyala api dalam daerah konsentrasi tertentu. Batas daerah tersebut disebut batas bawah dan batas atas mampu nyala (*flamability*). Sebagai contoh, campuran gas alam dan udara tidak akan menyebabkan nyala api jika proporsi dari gas kurang dari 4% atau lebih dari 15%.

Pada konsentrasi rendah, walaupun mungkin terjadi penyalaan lokal, energi yang disediakan tidak cukup untuk memanaskan lapisan gas dimdekatnya ke temperatur nyala. Seiring dengan naiknya tekanan parsial dari bahan bakar gas, energi juga ikut naik ke titik yang akan menyalakan bahan bakar gas di dekatnya dan menyebarkan nyala api.

Dengan menaikkan tekanan parsial bahan bakar gas, kapasitas panas dari campuran udara-bahan bakar juga naik dan temperatur nyala api berkurang. Dengan menaikkan konsentrasi bahan bakar melebihi batas atas mampu nyala api yang lebih dingin tidak akan menyalakan gas di dekatnya dan nyala api berhenti menyebar.

Untuk bahan bakar yang terdiri atas campuran beberapa jenis gas, batas mampu nyala dapat dirumuskan dari persamaan Le Chatelier's sebagai berikut:

$$L = \frac{a + b + c}{\frac{a}{l_a} + \frac{b}{l_b} + \frac{c}{l_c}} \dots\dots\dots (2.17)$$

Di mana: N a, b, c = persentase komposisi gas dalam campuran
la, lb, lc = komposisi dari campuran maksimum tiap gas

Tabel 2.1 Tabel Batas Mampu Nyala *)

	Lower flammability limit (L)			L _c	Upper flammability limit (U)			U _c	S _c (m/s)	Minimum ignition energy (mJ)	Minimum quenching distance (mm)
	% Vol	g/m ³	kJ/m ³		% Vol	g/m ³					
Hydrogen	4	36	435	0.13	75	67	3.5	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	7	
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	3.4	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	0.23	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	0.43	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	1993	0.5	9.7	270	2.9	0.48			
Acetylene	2.5	29	1410					3.7	0.02		
Methanol	6.7	103	2141	0.55	26	810	2.9	0.52	0.14	1.5	
Ethanol	3.3	70	1943	0.5	19	480	2.9				
n-Propanol	2.2	60	1874	0.49	14	420	3.2	0.38			
Acetone	2.6	70	2025	0.52	13	390	2.6	0.5	1.1		
Methyl ethyl ketone	1.9	63	1974	0.52	10	350	2.7				
Diethyl ketone	1.6	63	2121	0.53							
Benzene	1.3	42	1910	0.48	7.9	300	2.9	0.45	0.22	1.8	

*) Sumber : Drysdale, Dougal, *An Introduction To Fire Dynamics*, John Willey & Sons, England, 1998

2.5.2 Faktor-faktor yang Mempengaruhi Karakteristik Nyala

Faktor dan kimia diketahui dapat mempengaruhi karakteristik nyala, variabel-variabel fisik diantaranya adalah temperatur dan tekanan, sedangkan variabel kimia diantaranya adalah rasio campuran, penambahan *inert* dan struktur hidrokarbon.

Pengaruh komposisi campuran sangat penting bagi kecepatan pembakaran, nyala hanya akan merambat pada konsentrasi campuran tertentu. Konsentrasi bahan bakar minimum dalam campuran yang sudah dapat menyala dinamakan batas nyala terbawah, dan biasanya konsentrasi bahan bakar dan udara dikondisikan pada keadaan standar yaitu campuran stoikiometri. Dengan penambahan konsentrasi bahan bakar pada campuran, maka campuran akan kaya dan oksigen berkurang, kecepatan pembakaran turun dan api akan padam, hal ini juga berkaitan dengan batas nyala yang dinamakan batas nyala atas.

2.6 STABILITAS NYALA API

Pergerakan penjalaran api dan bentuk dari kestabilan nyala api selalu dipengaruhi oleh kesetimbangan antara laju aliran massa dinamik gas yang

melibatkan perhitungan kekekalan massa, kekekalan momentum, dan kekekalan energi.

Ada beberapa ketidakstabilan dalam *Bunsen burner* yaitu:

1. Ketidakstabilan sistem, meliputi interaksi aliran pada komposisi reaksi sistem yang berbeda.
2. Ketidakstabilan akustik, meliputi interaksi gelombang suara dengan proses pembakaran.
3. Ketidakstabilan Taylor, meliputi efek gaya apung atau percepatan pada fluida dengan perubahan densitas.
4. Ketidakstabilan Landau, Ketidakstabilan hidrodinamika dari bentuk pembakaran yang diasosiasikan tidak meliputi akustik ataupun buoyancy tetapi hanya meliputi penurunan kerapatan yang dihasilkan oleh pembakaran aliran tak mampu mampat (*incompressible*).
5. Ketidakstabilan diffusivitas termal, meliputi hubungan reaksi difusi dan kalor dengan nyala primer.

Suatu hal yang sangat penting dalam perencanaan pembakaran gas adalah mencegah terjadinya *flashback* dan *lift-off*. Batas kestabilan nyala berhubungan erat dengan fenomena *flashback*, *lift-off*, *blow-off*, dan warna nyala pada tabung pembakar (*burner*).

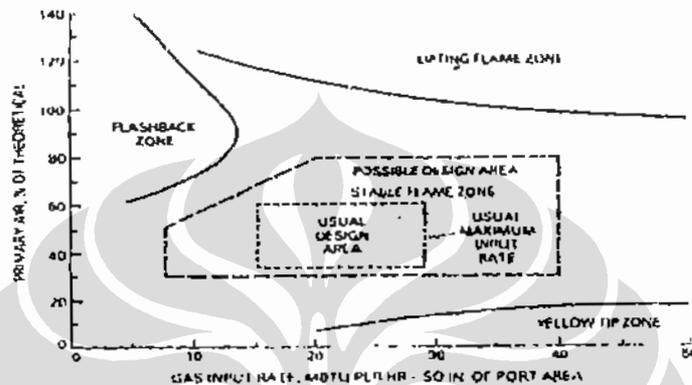
2.6.1 Fenomena *Flashback*

Flashback terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih cepat daripada kecepatan campuran udara-bahan bakar sehingga nyala api masuk balik dan merambat kembali ke dalam tabung pembakar, dapat disebut juga sebagai *back fire* atau *light back*.

Flashback tidak hanya mengganggu, tetapi juga dari sisi keamanan bisa menjadi berbahaya. Fenomena *flashback* berhubungan dengan kecepatan nyala laminar lokal dan kecepatan aliran lokal sebanding. *Flashback* secara umum merupakan kejadian sesaat di mana apabila terjadi, aliran bahan bakar dikurangi atau ditutup. Ketika kecepatan nyala lokal melebihi kecepatan aliran lokal, perambatan

nyala menjauh melalui tabung. Saat aliran bahan bakar dihentikan, nyala akan membalik atau *flashback* melalui tabung dan lebih besar dari jarak *quenching*.

Gambar di bawah menunjukkan daerah stabilitas nyala dengan bahan bakar industri yang berisi hidrogen. Bekerja pada daerah kiri *flashback* mengakibatkan terjadinya *flashback*, sementara itu untuk menghindari terjadinya *flashback* daerah kerja dirancang pada sisi kanannya yaitu pada daerah stabilitas nyala.



Gambar 2.5 Diagram stabilitas *flashback*, *lift-off*, dan *yellow tipping* untuk bahan bakar gas industri

2.6.2 Fenomena Lift Off

Lift-off adalah kondisi di mana nyala api tidak menyentuh permukaan mulut tabung pembakar, tetapi agak stabil pada jarak tertentu dari tabung pembakar. Sama seperti halnya *flashback*, fenomena *lift-off* juga berhubungan dengan kecepatan nyala api laminar lokal dan kecepatan aliran lokal yang sebanding.

Fenomena nyala api terangkat (*lift-off*) sangat tergantung pada nyala api lokal dan sifat aliran dekat ujung (mulut) tabung pembakar. Apabila kecepatan aliran cukup rendah, ujung bawah nyala api berada sangat dekat dengan ujung tabung pembakar dan hal ini dikatakan menempel. Jika kecepatan dinaikkan, maka sudut kerucut nyala

turun sesuai dengan kondisi $\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{S_L}{V_n} \right)$ dan ujung nyala bergeser sedikit ke

bawah.

Dengan meningkatkan kecepatan aliran hingga tercapai kecepatan kritis, ujung nyala akan meloncat ke posisi jauh dari ujung (mulut) pembakar dan nyala dikatakan terangkat. Kondisi nyala terangkat inilah yang dinamakan sebagai *lift-off*, dan jika kecepatan aliran terus dinaikkan, maka nyala secara kasar akan padam dan kondisi ini tidak diinginkan.

2.6.3 Fenomena *Blow-Off*

Blow-off merupakan suatu keadaan di mana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran. Kondisi seperti ini juga sangat dihindari.

2.6.4 Fenomena *Lift-up* dan Daerah Stabilitas Nyala

Secara umum daerah stabilitas nyala api adalah daerah yang dibatasi oleh garis *lift-off* di bagian atas, garis nyala kuning di bagian bawah, dan garis *flashback* di sisi kiri. Nyala kuning ditunjukkan oleh terbentuknya jelaga di dalam nyala. Daerah stabilitas nyala tersebut merupakan daerah perencanaan, pada grafik antara perbandingan udara-bahan bakar (AFR) dengan laju aliran panas input yang ditunjukkan oleh laju gas mengalir tiap luasan area (*burning load*).

Kecepatan aliran campuran udara-bahan bakar yang sangat cepat akan cenderung menyebabkan terjadinya *blow-off*. Penambahan *ring stabilizer* akan memperlambat kecepatan aliran campuran udara-bahan bakar di atas *ring* sehingga nyala api tidak akan langsung padam, melainkan berpindah kedudukan dari mulut *barrel* menuju *ring*. Selain itu, penggunaan *ring* juga dapat menyebabkan terjadinya resirkulasi aliran dingin sehingga nyala tidak akan cepat padam, melainkan akan “mengejar” kembali aliran tersebut dan tetap stabil. *Ring stabilizer* juga dapat menyimpan panas yang masih memungkinkan terjadi nyala di atas *ring* tersebut. Fenomena ini disebut fenomena nyala api *lift-up*. Hal tersebut terjadi karena pada *ring* kecepatan aliran campuran udara-bahan bakar sudah menjadi sama kembali dengan kecepatan nyala. Fenomena nyala *lift-up* dapat didefinisikan sebagai suatu kondisi di mana nyala terangkat seluruhnya dari mulut *barrel* dan “duduk” di atas *ring stabilizer*.