

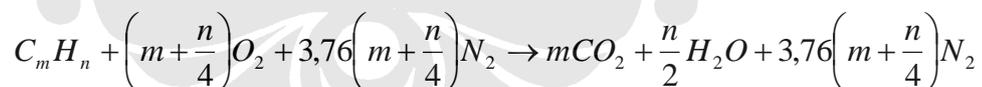
BAB 2 DASAR TEORI

2.1 Proses Dan Reaksi Pembakaran

Secara umum, pembakaran dapat didefinisikan sebagai proses atau reaksi oksidasi yang sangat cepat antara bahan bakar (*fuel*) dan oksidator dengan menimbulkan panas atau nyala dan panas. 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*).

Dalam proses pembakaran fenomena-fenomena yang terjadi antara lain interaksi proses-proses kimia dan fisika, pelepasan panas yang berasal dari energi ikatan-ikatan kimia, proses perpindahan panas, proses perpindahan massa, dan gerakan fluida.

Seperti telah diuraikan sebelumnya, proses pembakaran akan terjadi jika unsur-unsur bahan bakar teroksidasi. Proses ini akan menghasilkan panas sehingga akan 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 ekuivalen 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.

2.1.1 Rasio Volumetrik

Dua metode fundamental dalam mendefinisikan kuantitas dari suatu campuran adalah 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

ψ_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:

$$\sum_N \chi_i = \sum_N \psi_i = 1 \quad (2.1)$$

2.1.2 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).

2.1.2.1 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:

$$AFR = \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} = \frac{M_a \dot{N}_a}{M_f \dot{N}_f} \quad (2.2)$$

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.

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

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

$$FAR = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_a} = \frac{M_f \dot{N}_f}{M_a \dot{N}_a} \quad (2.3)$$

2.1.2.3 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.

$$\Phi = \frac{AFR_s}{AFR_a} = \frac{FAR_a}{FAR_s} \quad (2.4)$$

- $\Phi > 1$ 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)

2.1.2.4 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:

$$\% XSA = \left[\frac{(\chi_{O_2})_{prod}}{(\chi_{N_2})_{prod}/3,76 - (\chi_{N_2})_{prod}} \right] \quad (2.5)$$

Atau,

$$\% XSA = \left[\frac{(N_{O_2})_{prod}}{(N_{N_2})_{prod}/3,76 - (N_{N_2})_{prod}} \right] \quad (2.6)$$

2.1.3 Fraksi Mol dan Fraksi Massa

2.1.3.1 Fraksi Mol

Fraksi mol sebuah komponen (spesies) pada suatu campuran adalah perbandingan jumlah mol komponen tersebut dengan jumlah mol total campuran. Pada suatu campuran yang tersusun atas N_1 mol komponen 1, N_2 mol komponen 2, N_3 mol komponen 3, ... N_i mol komponen i, dan seterusnya, didefinisikan fraksi mol komponen (spesies) i sebagai:

$$\chi_i = \frac{N_i}{\sum_{i=1}^n N_i} = \frac{N_i}{N_1 + N_2 + N_3 + \dots + N_i + N_{i+1} + \dots + N_n} = \frac{N_i}{N_{total}} = \frac{N_i}{N_{camp}} \quad (2.7)$$

Menurut definisi di atas maka:

$$\sum_{i=1}^n \chi_i = 1 \quad (2.8)$$

2.1.3.2 Fraksi Massa

Fraksi massa sebuah komponen (spesies) pada suatu campuran adalah perbandingan jumlah massa komponen tersebut dengan jumlah massa total campuran. Pada suatu campuran yang tersusun atas m_1 kg komponen 1, m_2 kg komponen 2, m_3 kg komponen 3, ... m_i kg komponen i, dan seterusnya, didefinisikan fraksi massa komponen (spesies) i sebagai:

$$\psi_i = \frac{m_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{m_i}{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_i + m_{i+1} + \dots + m_n} = \frac{m_i}{m_{total}} = \frac{m_i}{m_{camp}} \quad (2.9)$$

Menurut definisi di atas maka:

$$\sum_{i=1}^n \psi_i = 1 \quad (2.10)$$

2.1.3.3 Hubungan Fraksi Mol - Fraksi Massa - Massa Molekular

Relasi antara fraksi mol dengan fraksi massa suatu komponen campuran dapat diperoleh dengan melibatkan massa molekul komponen (M_i) tersebut dan massa molekul campuran (M_{camp}) sebagai berikut:

$$\chi_i = \frac{N_i}{N_{camp}} = \frac{\left(\frac{m_i}{M_i}\right)}{\left(\frac{m_{camp}}{M_{camp}}\right)} = \left(\frac{m_i}{m_{camp}}\right) \left(\frac{M_{camp}}{M_i}\right) = \psi_i \left(\frac{M_{camp}}{M_i}\right) \quad (2.11)$$

Massa molekul campuran M_{camp} dapat dihitung dengan salah satu dari dua relasi berikut:

$$M_{camp} = \sum_{i=1}^n \chi_i M_i \quad (2.12)$$

$$M_{camp} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\psi_i}{M_i}\right)} \quad (2.13)$$

2.1.4 Beban Pembakaran (*Burning Load*)

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

$$Burning\ Load(BL) = \frac{Q_f \times \rho_f \times LHV}{A_b} \quad (2.14)$$

Di mana

- Q_f = kapasitas aliran gas (m^3/s)
- ρ_f = densitas bahan bakar (kg/m^3)
- LHV = *lower heating value* bahan bakar (MJ/kg)
- A_b = luas penampang barrel (m^2)

2.2 Pembakaran Premix

Pembakaran dapat dilakukan secara premix maupun secara difusi. Pembakaran secara premix adalah pembakaran dimana bahan bakar (*fuel*) bercampur secara sempurna di dalam *burner* sebelum dialirkan ke mulut burner dan mulai dibakar sedangkan proses pembakaran sistem difusi merupakan proses pembakaran yang terjadi dimana bahan bakar yang dialirkan melalui *burner* belum tercampur dengan udara, namun pencampuran tersebut terjadi pada saat di ujung *burner* dan menyala di tempat yang sama. Dalam hal ini pembakaran premix lah yang menjadi topik.

Pada pembakaran premix terdapat tiga macam gelombang (*wave*), dimana ketiga gelombang ini dibedakan dari cepat rambat gelombang terhadap reaksi campuran dalam gas premix, ketiganya yaitu:

Zona dari gelombang pembakaran terbagi dua, yaitu :

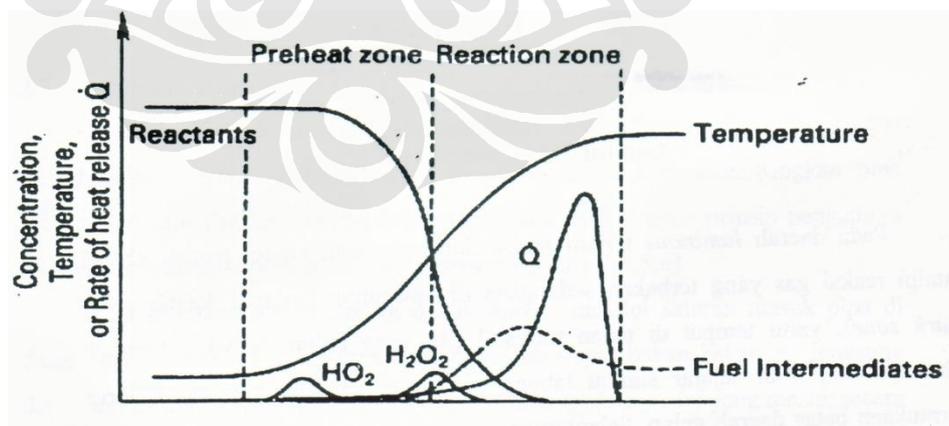
1. Zona pra pemanasan (*preheat zone*)

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.

Seperti yang terlihat dari gambar di bawah ini



Gambar 2.1 Profil Nyala Api

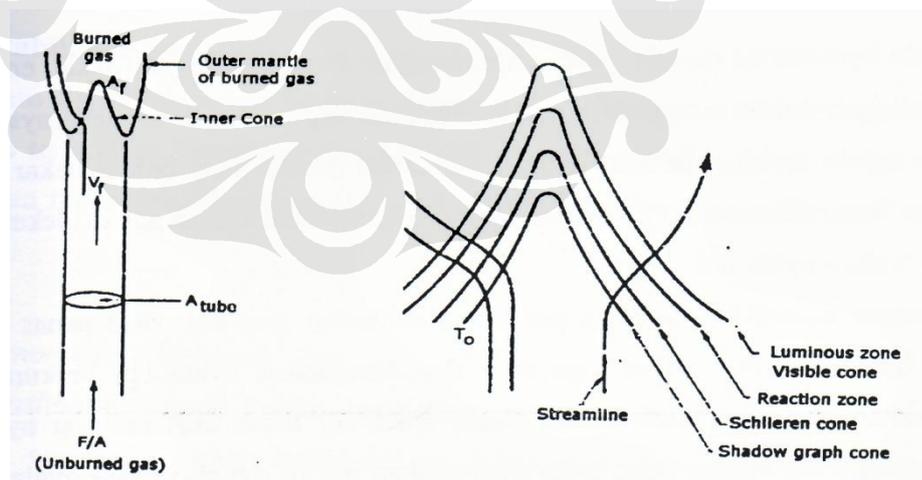
(Sumber : Dougal Drysdale, *An Introduction To Fire Dynamics*, England)

2.2.1 Nyala Api Premix (*Premix Flame*)

Pada gambar 2.2 terlihat bentuk dari nyala api premix. Pada daerah yang berbentuk kerucut atau segitiga biasa disebut juga *luminous flame* 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. Selanjutnya gas yang belum terbakar mendapatkan energi panas sepanjang tebal daerah *Preheating Zone* (η_0) sampai temperatur nyala (*Ignition Temperature* : T_i) 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 menandakan banyaknya konsentrasi molekul C_2 .

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*).

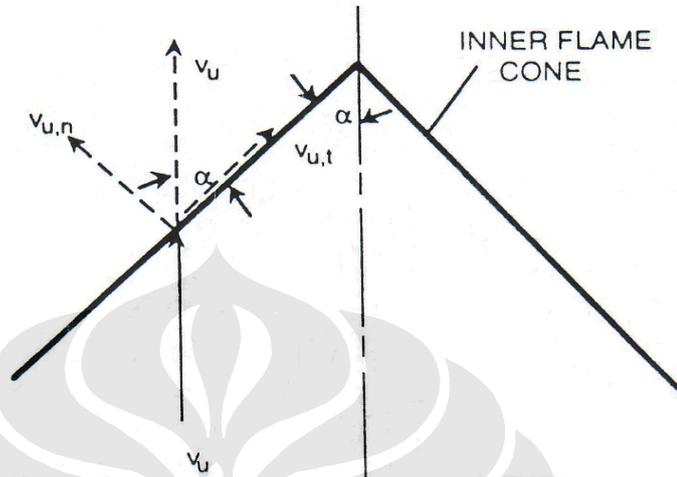


Gambar 2.2 Struktur Nyala Api *Premix*

(Sumber : Kenneth K. Kuo, *Principle of Combustion*, Canada)

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 2.3 Vektor Diagram Kecepatan Nyala Laminar

(Sumber : Stephen R. Turns. *An Introduction to Combustion Concepts and Applications*, Pennsylvania)

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:

$$S_L = V_u \sin \alpha \quad (2.15)$$

2.2.2 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 nyal 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.

2.3 Karakteristik Nyala

2.3.1 Batas Mampu Nyala (*Limits of Flammability*)

Dalam kenyataannya terjadinya nyala api dapat tercapai jika terjadi campuran antara oksidator dan bahan bakar yang mendukung. Ada kisaran campuran bahan bakar dan oksidator yang dapat menyebabkan nyala api. Kisaran itu yaitu kisaran batas bawah mampu nyala dan batas atas mampu nyala atau yang lebih dikenal sebagai *lower and upper flammability limits*. Contohnya untuk kasus gas metana, nyala api hanya akan terjadi pada kisaran campuran gas methana terhadap volume udara total sebesar 5-15%.

Salah satu metode untuk mendapatkan batas bawah dan atas mula-mula dilakukan dengan menggunakan tabung api yang dikembangkan oleh US Bureau of Mines. Pada metoda ini experiment dilakukan untuk mendeterminasikan batas bawah dan atas dari mampu nyala api. Skema terlihat seperti di bawah berikut, terdiri dari tabung vertikal sepanjang 0.5 m dan dengan diameter dalam sebesar 0.05 m.

Pada kondisi campuran awal akan terjadi spark atau nyala api kecil, ini kemudian diebut sebagai batas bawah, dengan ditambahkannya aliran gas dari *handling system* hingga nyala api mulai meredup yang kemudian disebut sebagai batas atas mampu nyala api. Batas-batas tersebut didefinisikan dengan persamaan berikut sebagai hasil dari percobaan yang telah dilakukan, yaitu:

$$L = \frac{1}{2}(L_w + L_r)$$

$$U = \frac{1}{2}(U_w + U_r)$$

Dimana L_w dan U_r adalah terbanyak dan termiskin konsentrasi dari bahan bakar di udara yang tidak mampu nyala (*non-flammable*), dan L_r dan U_w adalah termiskin dan terbanyak konsentrasi bahan bakar di udara yang mampu nyala (*flammable*). Persamaan tersebut merupakan persamaan sederhana untuk mendeterminasikan batas atas dan bawah dari konsentrasi gas di udara agar terjadi nyala api. Dari hasil experiment berikutnya yang lebih modern didapat data tabel batas mampu nyala seperti tabel di bawah ini.

Tabel 2.1 Tabel batas mampu nyala

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

(Sumber : Dougal Drysdale, *An Introduction To Fire Dynamics*, England)

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:

$$L = \frac{a + b + c}{\frac{a}{l_a} + \frac{b}{l_b} + \frac{c}{l_c}} \quad (2.16)$$

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

2.3.2 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.

2.4 Kestabilan 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.

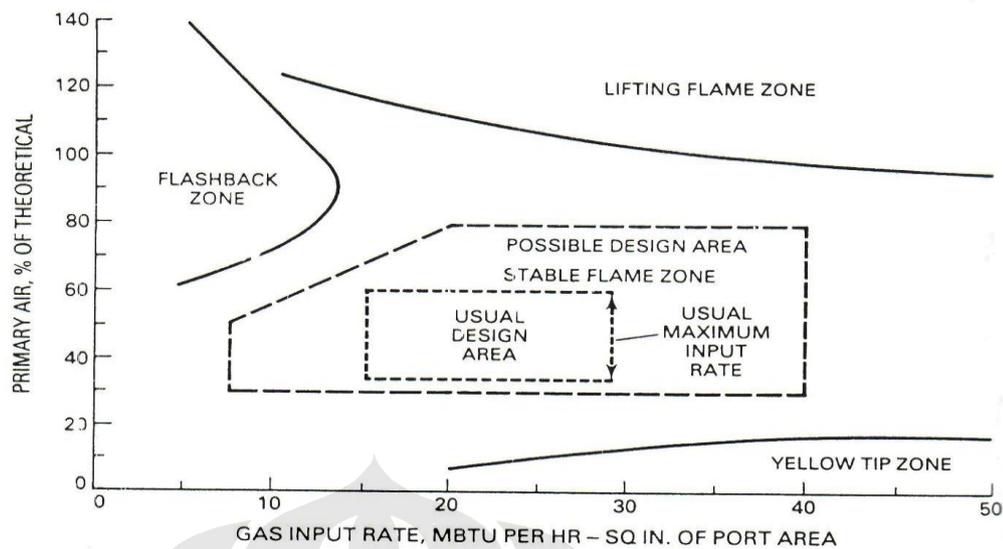
Suatu hal yang sangat penting dalam perencanaan pembakaran gas adalah mencegah terjadinya *flashback* dan *lift-off*. Batas kestabilan nyala berhubungan erat dengan fenomena *flashback*, *lift-off*, *blow-off*, dan warna nyala pada tabung pembakar (*burner*).

2.4.1 Fenomena *Flashback*

Flashback terjadi ketika kecepatan pembakaran lebih cepat daripada kecepatan campuan 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 manjauh 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 2.4 Diagram stabilitas *flashback*, *lift-off*, dan *yellow tipping* untuk bahan bakar gas industri

(Sumber : Stephen R. Turns, *An Introduction to Combustion Concepts and Applications*, Pennsylvania)

2.4.2 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 $\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{S_L}{V_u}\right)$ 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.

2.4.3 Fenomena *Blow-Off*

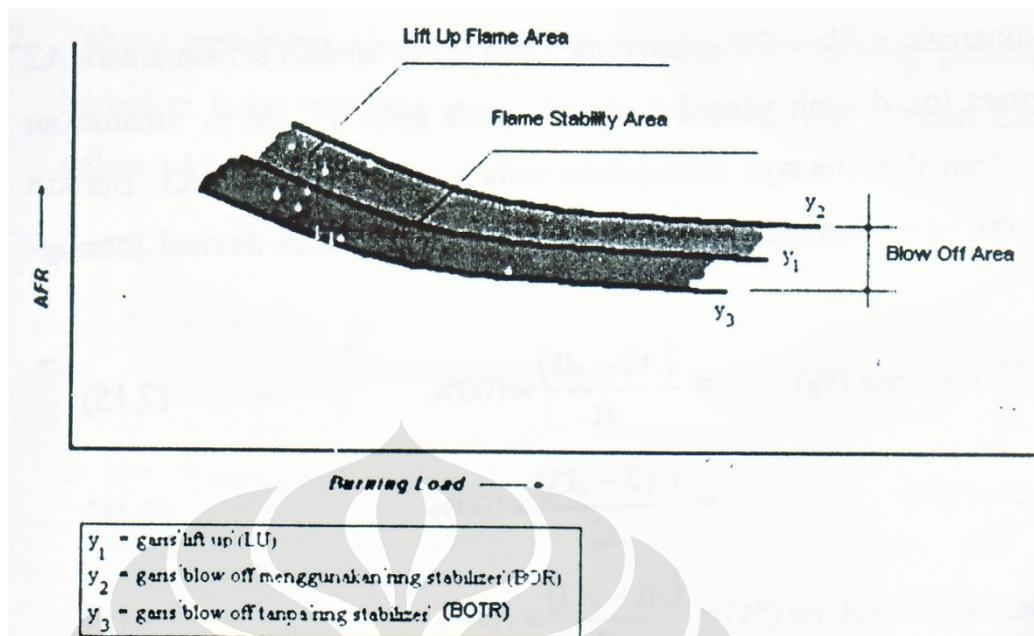
Blow-off merupakan suatu keadaan di mana nyala api padam akibat dari batas kecepatan aliran lebih besar dari laju nyala atau kecepatan pembakaran. Kondisi seperti ini juga sangat dihindari.

2.4.4 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*.

Sementara itu, daerah stabilitas nyala yang berhubungan dengan fenomena nyala *lift-up* dan *blow-off* dapat digambarkan ke dalam suatu grafik seperti di bawah ini:



Gambar 2.5 Grafik Perbandingan AFR dan BL [13]

Semua garis menggambarkan perbandingan antara *Air Fuel Ratio* (AFR) dan *Burning Load* (BL) untuk semua fenomena yang terjadi. Garis BOTR (*Blow-off Tanpa Ring*) menggambarkan perbandingan AFR dan BL saat fenomena *blow-off* terjadi pada percobaan tanpa menggunakan *ring stabilizer*. Persamaan dari garis ini dinotasikan sebagai y_3 . Garis LU (*Lift-up*) menggambarkan perbandingan AFR dan BL saat fenomena *Lift-up* terjadi dan persamaan garis ini dinotasikan sebagai y_1 . Sementara itu, garis BOR (*Blow-off dengan Ring*) menggambarkan perbandingan AFR dan BL saat fenomena *blow-off* terjadi pada percobaan yang menggunakan *ring stabilizer*. Persamaan garis BOR ini dinotasikan sebagai y_2 .

Persamaan y_1 , y_2 , dan y_3 digunakan untuk mencari luas daerah nyala, luas ini menggambarkan energi dan luas ini juga akan menggambarkan apakah terjadi peningkatan stabilitas nyala. Daerah yang berada di antara sumbu X dan garis y_1 dinamakan daerah A1. Daerah yang berada di antara sumbu X dan garis y_2 dinamakan sebagai daerah A2, sedangkan daerah yang berada di antara sumbu X dan garis y_3 dinamakan sebagai daerah A3. Luas daerah-daerah ini dapat dicari dengan mengintegrasikan persamaannya masing-masing (dengan batas atas dan bawah adalah nilai maksimum dan minimum BL), yaitu:

$$A_i = \int_{BL_{\min}}^{BL_{\max}} (y_i) dx \quad (2.17)$$

Daerah yang berada di antara garis y_1 dan y_2 dinamakan *Lift-up Flame Area* yang luasnya merupakan selisih antara A_2 dan A_1 . Daerah yang berada di antara garis y_3 dan y_2 dinamakan *Blow Off Area* yang luasnya merupakan selisih antara A_2 dan A_3 . Sementara itu, daerah yang berada di antara garis y_3 dan y_1 dinamakan *Flame Stability Area* dan luasnya merupakan selisih antara A_1 dan A_3 . Berikut merupakan persamaan-persamaan yang digunakan untuk mencari deviasi masing-masing daerah:

- Deviasi *Lift Up Flame Area* (%) = $\frac{(A_2 - A_1)}{A_1} \times 100\%$ (2.18)

- Deviasi *Blow Off Area* (%) = $\frac{(A_2 - A_3)}{A_3} \times 100\%$ (2.19)

- Deviasi *Flame Stability Area* (%) = $\frac{(A_1 - A_3)}{A_3} \times 100\%$ (2.20)

2.5 Tinggi Nyala

Pembakaran bahan bakar gas akan membentuk nyala api, ketika terbakar dengan oksigen di atmosfer, suatu nyala nyata yang merupakan aliran cahaya dari pijaran gas. Nyala api mempunyai bentuk geometri dan dimensi yang diperlukan untuk ketepatan tungku pembakaran atau daerah kerja tungku. Kesalahan dalam optimasi bentuk geometri akan menyebabkan rendahnya efisiensi tungku serta menjadikan umur pakai tungku lebih pendek, berpolusi, dan akibat lainnya.

Tinggi nyala dapat didefinisikan sebagai suatu jarak aksial nyala api dari mulut tabung pembakar sampai kepada suatu titik dimana ujung nyala api tersebut mencapai garis sumbunya.

Persamaan dari Becker dan Liang menghasilkan prediksi yang berlebihan terhadap tinggi nyala rata-rata, demikian pula yang dihasilkan Kalghati yang memodifikasi konstanta persamaan Becker dan Lian. Sedangkan persamaan Hustad dan Sϕnju lebih difokuskan pada nyala difusi jet yang besar untuk propana dan metana dengan ketinggian visible hingga 8 meter. Sedangkan persamaan yang

dihasilkan oleh N.A Røkke et al memfokuskan persamaannya untuk mengukur tinggi nyala teoritis pada nyala api premix laminar dengan memodifikasi persamaan sebelumnya yang dilakukan oleh Hustad dan Sonju, dengan percobaan propana berdasarkan fraksi massa (Y_f) yang berbeda pada kisaran antara 1,0 hingga 0,15.

Tabel 2.2 Persamaan tinggi nyala

Becker dan Liang	$\psi = 0,165 + 0,022\xi \quad (1 \leq \xi \leq 11)$ $\xi = \frac{L}{d_0} \left(\frac{\rho_x Fr}{\rho_0} \right)^{-1/3}, \psi = \left[\frac{46,67 \sqrt{\rho_0 / \rho_x}}{L / d_0} \right]^{2/3}$
Kalghati	$\psi = 0,2 + 0,024\xi \quad (2 \leq \xi \leq 11)$
Hustad dan Sonju	$\frac{L}{d_0} = 27 Fr^{1/5}$
N.A Røkke et al	$\frac{L}{d_0} = 33 Y_f^{2/5} Fr^{1/5}$

Berdasarkan persamaan-persamaan dari tabel 2.3, tampak bahwa variasi campuran bahan bakar-udara sebagai faktor stabilitas internal yang berperan terhadap tinggi nyala, sedangkan faktor lain yang mempengaruhi stabilitas internal yaitu difusi thermal dalam hal ini akan mempengaruhi laju reaksi pembakaran, difusi massa yang mempengaruhi besar tinggi nyala tidak secara jelas terdapat sebagai faktor penentu tinggi nyala dalam persamaan-persamaan tersebut.

Hasil eksperimen dari N.A Røkke et al yang menghasilkan sebuah persamaan sederhana seperti pada tabel di atas dapat digunakan untuk memperkirakan tinggi nyala untuk nyala api premix. Persamaan N.A Røkke et al sebagai berikut:

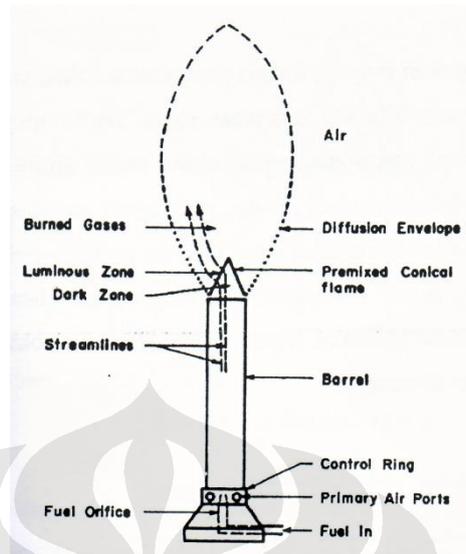
$$\frac{L}{d_0} = 33 Y_f^{2/5} Fr^{1/5} \quad (2.21)$$

- dimana : L : tinggi nyala (m)
 d_0 : diameter keluar
 Y_f : fraksi massa bahan bakar (kg bahan bakar/kg total)
 Fr : angka Froud ($\bar{u}^2 / g d_0$)
 \bar{u} : kecepatan aliran, $\bar{u} = \frac{(V_g + V_u)}{1/4\pi d^2}$

2.6 Bunsen Burner

Bunsen burner merupakan alat pembakar yang ditemukan oleh Robert William Bunsen (1811-1899) pada tahun 1855. Alat ini merupakan alat pertama yang dapat menghasilkan nyala api premix (*premix flame*), alat 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 *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.

Ujung burner ini langsung bersentuhan dengan lidah api sehingga sering terjadi korosi dan pengotoran pada bagian ini. Dengan adanya kerusakan seperti ini menjadikan kualitas nyala api yang dihasilkan tidak baik sehingga proses pembakaran menjadi kurang baik. Laju perubahan konsentrasi reaktan atau *Rate of Reactan (RR)* yang konstan setelah terciptanya awal nyala api yang stabil serta laju aliran campuran bahan bakar yang konstan, akan menjaga nyala api premix tersebut tetap stabil.



Gambar 2.6 Bunsen burner

(Sumber : Dougal Drysdale, *An Introduction To Fire Dynamics*, England)

2.7 Bahan Bakar Gas

Dalam setiap pembakaran baik difusi maupun premix dibutuhkan bahan bakar. Bahan bakar inilah yang menjadi sumber energi pada proses pembakaran. Wujud bahan bakar terdiri dari gas, cair, dan udara dalam kaca mata keadaan atau wujudnya, namun jika ditinjau dari aspek lain seperti proses pembentukannya bahan bakar terbentuk secara alamiah dan buatan.

Bahan bakar alami adalah bahan bakar yang telah tersedia di alam dan tanpa ada campur tangan manusia dalam meningkatkan nilai kalor dari bahan bakar tersebut. Bahan bakar padat alami seperti :kayu, batubara, lignit, antrasit, dedaunan, dan sebagainya, bahan bakar cair umumnya merupakan bahan bakar nonalamiah walaupun saat ini sedang hangat-hangatnya isu bahan bakar dari air (H_2O) namun masih dalam penelitian, sedangkan bahan bakar gas alami seperti gas alam. Bahan bakar buatan adalah bahan bakar yang telah melalui berbagai macam proses kimia maupun fisika untuk menambah nilai kalornya. Bahan bakar padat buatan seperti: kokas, briket batubara, arang dan bris. Bahan bakar cair buatan seperti olahan dari minyak bumi berupa kerosene, petramax, premium, solar dan lain sebagainya. Bahan bakar gas buatan seperti cracking gas.

Penggunaan bahan bakar tergantung pada kebutuhan akan efisiensi dan keekonomisannya, dulu hampir seluruh perumahan di Indonesia menggunakan bahan bakar cair berupa kerosin namun dengan kebijakan menggunakan bahan bakar gas dari pemerintah penggunaan bahan bakar kerosin menjadi berkurang. Hal ini perlu diterapkan guna menyelamatkan keadaan ekonomi negara dari isu Internasional kenaikan harga bahan bakar minyak dunia. Bahan bakar gas memang sedikit lebih mahal dari bahan bakar cair namun dalam penanganannya mudah dan lebih sederhana serta kebutuhan akan udara lebih rendah dari bahan bakar lain.

2.7.1 Gas Alam (*Natural Gas*)

Bahan bakar gas dapat diklasifikasikan atas gas alam (*natural gas*) maupun gas buatan (*manufactured gas*). Biasanya gas alam dijumpai pada deposit minyak dan batubara. 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.

2.7.2 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 bahan bakar gas buatan meliputi *Liquified Petroleum Gas* (LPG), *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*.

Pada titik didih yang rendah kondensat gas telah dipisahkan dari kandungan etana dan metana, sedangkan pada titik didih yang tinggi gasolin berisi sebagian besar hidrokarbon jenuh (propana), bagian kecil lainnya adalah C₄ jenuh, isobutana dan n-butana, perbandingan produk ini bervariasi tergantung pada sumber kondensatnya.

Elpiji yang diproduksi dan dipasarkan di Indonesia oleh PT. Pertamina terdapat tiga jenis yaitu:

- Bahan bakar gas elpiji untuk kebutuhan rumah tangga, industri dan komersial yaitu elpiji campuran propana dan butana, selanjutnya disebut elpiji campuran.
- Bahan bakar gas elpiji untuk kebutuhan khusus dan komersial yaitu bahan bakar elpiji propana selanjutnya disebut elpiji propana.
- Bahan bakar gas elpiji untuk kebutuhan komersial yaitu bahan bakar elpiji butana selanjutnya disebut elpiji butana.

2.7.3 Gas Propana

Propana merupakan hidrokarbon alkana berkarbon tiga. Wujud umumnya adalah gas, namun dapat dikompres sampai menjadi bentuk cair untuk kemudahan transportasi. Propana diturunkan dari minyak jenis lain melalui proses distilasi minyak mentah maupun dari gas alam (*natural gas*). Untuk keperluan komersial gas propana dicampur dengan gas lainnya seperti *propylene*, *butane*, dan *butylene* untuk mendapatkan produk baru seperti pada gas LPG.

Propana melalui reaksi pembakaran yang sama dengan reaksi pada hidrokarbon lainnya. Dengan adanya kelebihan udara (*excess air*), propana terbakar dan membentuk uap air dan karbon dioksida. Maka reaksinya akan seperti ini:



Namun jika tidak terdapat kelebihan udara (*excess air*), maka propana akan menghasilkan uap air dan karbon monoksida seperti pada reaksi berikut:



Tidak seperti gas alam, propana lebih berat atau memiliki densitas lebih besar dari udara. Pada kondisi standar dan bebas, propana cenderung untuk jatuh akibat gravitasi karena beratnya. Propana cair akan berubah menjadi uap pada tekanan atmosfer dan berwujud putih karena pengembunan dari udara.

Pembakaran propana jauh lebih bersih dari bensin, tetapi tidak sebersih gas alam. Kehadiran ikatan molekul C-C ditambah ikatan berlipat-lipat dari *propylene* dan *butylene*, menghasilkan gas buang organik disamping karbon dioksida dan uap air selama pembakaran khusus. Ikatan ini juga menyebabkan pembakaran propana menghasilkan nyala api yang dapat terlihat secara visual.

Propana bisa digunakan sebagai bahan bakar industri, bahan bakar kendaraan, dan sebagai refrigeran pada sistem refrigerasi.

Tabel 2.3 Tabel karakteristik bahan bakar

Name of matter, chemical formula	Molecular mass M , kg/mol	Density ρ , kg/m ³	Gas constant R , J/(kg·°C)	Heat of combustion			
				Q_h^{vol}	Q_l^{vol}	Q_h^m	Q_l^m
				kJ/m ³		kJ/kg	
Carbon on combustion to CO (C)	12.01	—	—	—	—	9295	9295
Carbon on combustion to CO ₂ (C)	12.01	—	—	—	—	32908	32908
Carbon monoxide (CO)	28.01	1.25	297	12644	12644	10132	10132
Hydrogen (H ₂)	2.016	0.09	412	12770	10760	141974	119617
Methane (CH ₄)	16.04	0.717	518	39853	35797	56103	49404
Ethane (C ₂ H ₆)	30.07	1.34	276	70422	64351	51958	47436
Propane (C ₃ H ₈)	44.09	1.96	187	101823	93573	50409	46348
Butane (C ₄ H ₁₀)	58.12	2.59	143	134019	123552	49572	45720
Pentene (C ₅ H ₁₀)	70.13	3.13	—	150723	140928	48575	45025
Pentane (C ₅ H ₁₂)	72.14	3.22	115	148213	137143	48358	44661
Benzol (C ₆ H ₆)	78.11	3.48	—	146287	140383	42035	40340
Ethylene (C ₂ H ₄)	28.05	1.25	296	64016	14320	50786	47562
Propylene (C ₃ H ₆)	42.08	1.88	198	94370	88216	49279	46055
Butylene (C ₄ H ₈)	56.10	2.50	148	114509	107015	48692	45469
Acetylene (C ₂ H ₂)	26.03	1.16	320	58992	56940	50367	48651
Hydrogen sulfide (H ₂ S)	34.07	1.52	242	25707	23697	16705	15407
Sulfur (S)	32.06	—	—	—	—	9261	9261

(Sumber : Kazantsev, E.I. *Industrial Furnaces*, Moscow)