

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 SEJARAH PEMBAKARAN

Berdasarkan bukti penemuan tempat archaeologi, penggunaan api pertama sekali sekitar 600.000 tahun lalu dan penggunaan api secara *artificial* sekitar 30.000 tahun lalu pada zaman batu (*paleolithic era*). Nyala api diterapkan secara menonjol pada kerajaan-kerajaan kuno dan pada acara keagamaan (contoh legenda Yunani *Prometheus*).

Pemikiran secara ilmiah pertama sekali mengenai nyala api dilakukan oleh filosofi *Heraclitus* (500 tahun sebelum masehi), yang membuat dalil (*pustulated*) menyatakan bahwa nyala api adalah unsur dasar (*fundamental substance*). *Empodocles* (500 tahun sebelum masehi) menyatakan bahwa nyala api merupakan salah satu dari empat unsur yang membentuk alam semesta, yaitu air, udara, tanah dan api, pendapat ini berlangsung sampai zaman *Renaissance*. Namun pada tahun 1600 *Francis Bacon* melakukan langkah penting dalam permasalahan pembakaran. *Francis Bacon* melakukan observasi tentang struktur nyala api lilin. Observasi ini dilanjutkan oleh *Boyle* (1627-1697), *Hooke* (1631-1703), dan *Maynow* (1641-1679).

Observasi yang luar biasa mengenai pembakaran dimulai dengan hadirnya teori *Phlogiston* oleh *Becher* (1635-1682) dan diperjuangkan oleh *Stahl* (1660-1734). Teori *Phlogiston* ini merupakan ide ilmu kimia kuno, bahwa nyala api disebabkan oleh aliran *substance* yang tidak dapat diukur. Dengan dimulainya investigasi nyala api secara ilmu kimia, sehingga ditemukan sejumlah elemen gas oleh *Black* (1728-1799), *Cavendish* (1731-1810), *Scheele* (1724-1786), *Priestley* (1733-1804) dan *Lavoisier* (1734-1810).

Sejumlah ahli kimia terkenal melakukan penelitian nyala api periode 1776-1815, antara lain : *Volta*, *Bartholet*, *Berzelius* dan *Dalton*. Kemudian *Robert Bunsen* yang terkenal dengan *burner*-nya yang ditemukan disetiap laboratorium kimia. *Robert Bunsen* telah memberikan kemajuan yang besar dalam penelitian nyala api, meliputi bidang kimia, pisika dan thermodynamika. Hal ini

meningkatkan pemahaman teori modern tentang nyala api. Teori modern pertama nyala api adalah perambatan api (*flame propagation*) oleh *Mallard* dan *Le Chatelier*. Observasi ini diikuti analisis *hydrodynamic* oleh *Chapman* dan *Jouguet* pertama sekali yang dapat membedakan antara nyala api dengan ledakan.

Dalam periode antara perang dunia I dan II sejumlah pusat-pusat penelitian nyala api berkembang di Inggris, Prancis, Jerman, USA dan USSR. Pada akhir perang dunia ke II, era baru memasuki Amerika, Pemerintah sangat mendukung pengembangan ilmu pengetahuan. Jawatan militer yang dipelopori oleh kantor *Naval Research* mensponsori program investigasi fenomena pembakaran dalam skala besar. Sebagai hasil banyak paper dipublikasikan mengenai pembakaran [1].

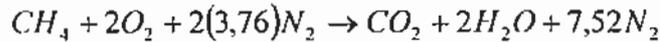
2.2 RUANG LINGKUP PEMBAKARAN

Suatu pertanyaan mendasar mengenai nyala api. Apakah nyala api itu dan bagaimana membedakannya dengan reaksi lainnya? Nyala api adalah suatu reaksi pembakaran yang dapat merambat sendiri dengan kecepatan *subsonic* melalui suatu ruang rambat. Reaksi pembakaran akan kelihatan dan menghasilkan emisi. Propertis ruang rambat adalah suatu yang penting untuk membedakan nyala api dengan reaksi pembakaran lainnya. Suatu reaksi nyala api akan kontinu merambat sampai yang dikonsumsi nyala api habis. Reaksi pembakaran non-nyala api akan membutuhkan penyalaan awal untuk mengkonsumsi sesuatu [2].

Ruang rambatan nyala api adalah suatu hasil dari penggabungan antara reaksi kimia, proses transportasi difusi massa dan konduksi panas. Reaksi kimia suatu pembakaran berlangsung sempurna bila bahan bakar dan oksidator berada dalam jumlah tertentu, yang dikenal dengan istilah stokiometri pembakaran.

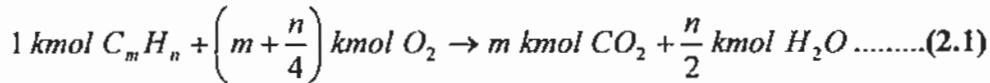
2.3 STOKIOMETRI PEMBAKARAN

Suatu proses pembakaran biasanya diartikan sebagai proses oksigen *exothermic*. Oksigen didalam udara bereaksi dengan karbon dan hidrogen yang terdapat dalam bahan bakar untuk membentuk karbon monoksida, karbon dioksida dan uap air. Sebagai contoh pembakaran metana dengan udara stokiometri, dengan reaksi sebagai berikut [3]:

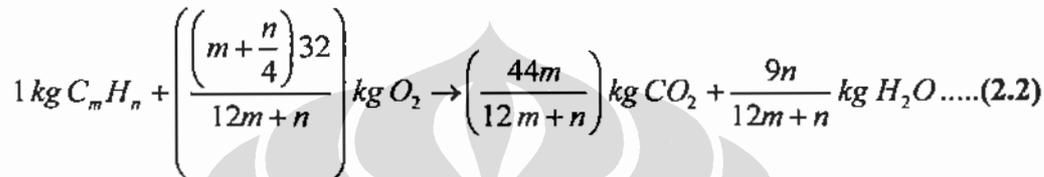


Untuk mengetahui kebutuhan oksigen pembakaran stokiometri karbon dan hidrogen murni C_mH_n dapat dihitung dengan metode mol dan metode kesetimbangan massa, sebagai berikut :

Metode mol :



Metode Kesetimbangan massa :



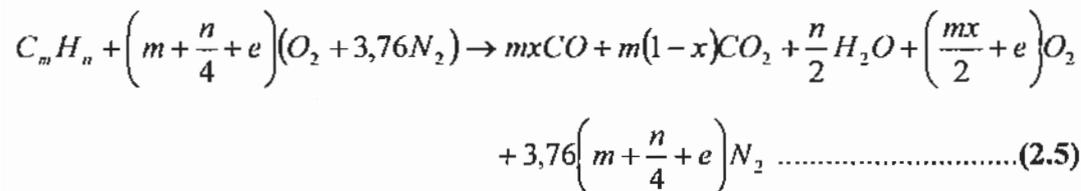
Hubungan antara bahan bakar dan udara biasanya diberikan dalam istilah *ratio* udara-bahan bakar (AFR) atau bahan bakar-udara (FAR). *Ratio* udara-bahan bakar mengacu pada suplai massa udara per unit massa bahan bakar, sedangkan *ratio* bahan bakar-udara mengacu pada suplai massa bahan bakar per unit massa udara atau :

$$AFR = \frac{\text{Massa udara}}{\text{Massa bahan bakar}} \dots\dots\dots(2.3)$$

Dan

$$FAR = \frac{\text{Massa bahan bakar}}{\text{Massa udara}} \dots\dots\dots(2.4)$$

Dalam proses pembakaran aktual, kita harus mempunyai *e* mole *excess air* per mole C_mH_n , maka kebutuhan udara :



2.4 KLASIFIKASI NYALA API SECARA UMUM

Nyala api secara umum di bedakan berdasarkan 3 klasifikasi, yaitu : Klasifikasi pertama berdasarkan apakah reaktan dicampur dengan oksidator sebelum memasuki daerah reaksi atau dipisahkan sebelum memasuki daerah reaksi. Jika reaktan atau bahan bakar dan oksidator dicampur sebelum memasuki daerah reaksi maka nyala api yang dihasilkan **nyala api premix (*premixed flame*)**, jika bahan bakar dan oksidator tidak dicampur sebelum memasuki daerah reaksi dihasilkan **nyala api difusi (*diffusion flame*)**.

Klasifikasi kedua berdasarkan laju aliran gas melalui daerah reaksi dalam fluida bergerak, apakah laminar atau turbulen. Untuk laju aliran laminar dihasilkan nyala api laminar dan laju aliran turbulen akan dihasilkan nyala api turbulen.

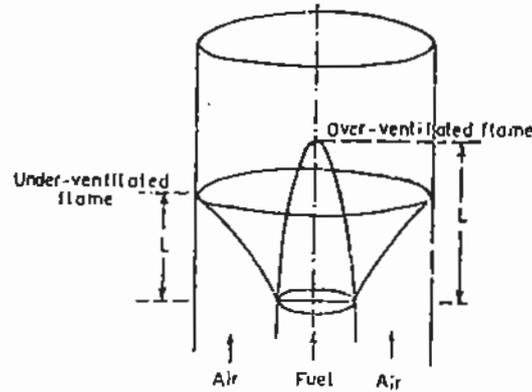
Klasifikasi ketiga adalah berdasarkan kondisi fisik awal bahan bakar, yaitu padat, liquid dan gas. Nyala api bahan bakar padat biasanya melalui partikel, *liquid* melalui *droplet* dan gas melalui semburan (*jet*) [4].

2.5 NYALA API DIFUSI BAHAN BAKAR GAS

Dalam pengertian luas nyala api difusi didefinisikan sebagai suatu nyala api dimana bahan bakar dan oksidator dalam keadaan awal dipisahkan (*non-premix*), contoh : pembakaran minyak dalam bentuk droplet, cahaya lilin dan pembakaran bahan bakar padat, menghasilkan nyala api difusi.

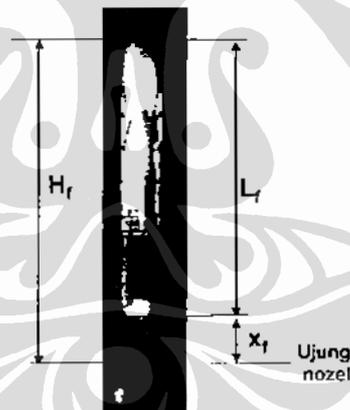
Dalam pengertian yang sempit nyala api difusi didefinisikan sebagai *non-premix, steady* dan *unsteady*, reaksi terjadi pada daerah yang sempit dan laju pencampuran lebih rendah dari reaksi kimia.

Burke dan *Schumman* (1928) pertama sekali mengobservasi nyala api difusi bahan bakar gas dalam sebuah tabung silinder *coaxial* yang dialirkan bahan bakar dikelilingi oleh aliran udara dengan kecepatan yang sama. *Burke* dan *Schumman* menyatakan bahwa nyala api *overventilated* akan terbentuk jika udara suplai melebihi dari udara yang dibutuhkan untuk pembakaran sempurna. Disisi lain jika suplai udara tidak mencukupi untuk kebutuhan pembakaran sempurna, dihasilkan nyala api *underventilated*. Bentuk nyala api difusi yang dihasilkan dari oksigen lebih dan oksigen kurang ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 2.1. *Overventilated* dan *underventilated* nyala api difusi.

Gambar 2.1 menunjukkan lapisan batas nyala api difusi *overventilated* konvergen ke arah sumbu silinder, sedangkan nyala api difusi *underventilated* mengembang menuju dinding tabung bagian luar. Variasi bentuk nyala api difusi ditentukan *ratio* bahan bakar-udara. Dengan demikian lapisan batas nyala api didefinisikan sebagai permukaan terjadinya pembakaran sempurna, *ratio* bahan bakar-udara berada dalam *ratio* stokiometri [5,6,7]. Gambar nyala api difusi bahan bakar propane ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 2.2. Nyala api difusi bahan bakar propana

Gambar 2.2 menunjukkan bahwa panjang nyala api difusi merupakan selisih dari tinggi nyala api difusi dengan jarak *lifted flame*, seperti ditunjukkan persamaan dibawah ini.

$$\bar{L}_f = \bar{H}_f - x_f \dots\dots\dots(2.6)$$

2.6 PANJANG NYALA API DIFUSI

Panjang nyala api difusi merupakan daerah reaksi (*reaction zone*) antara bahan bakar dan udara. dipengaruhi oleh : *burning load*, *lifted flame*, tinggi nyala

api difusi dan pola aliran bahan bakar-udara. Panjang nyala api difusi mempengaruhi profile temperatur *preheat zone* dan *reaction zone* dan kecepatan pembakaran (*burning velocity*).

2.6.1 Beban Pembakaran (*Burning Load*)

Beban pembakaran menyatakan kemampuan sistem pembakaran untuk menghasilkan energi thermal dalam satuan waktu persatuan luas nozel, yang didefinisikan sebagai perbandingan antara laju aliran gas dikalikan nilai kalor bawah bahan bakar dibagi luas penampang nozel, sesuai persamaan berikut [8]:

$$\text{Burning Load (BL)} = \frac{m_f \times LHV}{A_{\text{nozel}}} \dots\dots\dots(2.7)$$

2.6.2 *Lifted Flame*

Proses terangkatnya pangkal nyala api difusi dikenal dengan istilah fenomena *lifted flame*. Phenomena ini disebabkan oksigen yang terdapat pada udara tidak bercampur terlebih dahulu, yang mengakibatkan bahan bakar dan udara memerlukan waktu untuk berdifusi hingga terjadi campuran yang siap untuk proses pembakaran [9].

Observasi mengenai *lifted flame* diawali oleh *Wohl et al.* (1949) dalam *Third of Combustion* yang menyatakan bahwa nyala api difusi dapat terangkat jika gradien kecepatan rata-rata bahan bakar keluar dari mulut nozel melebihi nilai kritisnya dan akan mencapai kondisi stabil jika nilai *burning velocity* sama dengan kecepatan aliran bahan bakar [10].

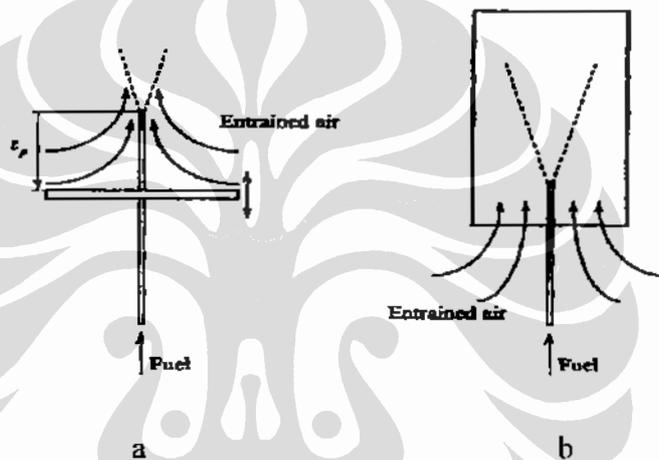
Eickhoff et al. pada *Twentieth Symposium of Combustion* (1984) menyatakan bahwa dalam pembakaran difusi sejumlah udara terinfiltrasi ke dalam semburan bahan bakar hingga terjadi kondisi *premix*. Kondisi *premix* yang memungkinkan terangkatnya pangkal nyala api difusi. Selain itu dinyatakan pula bahwa stabilitas nyala dipengaruhi oleh rambatan *premix* turbulen [11].

Kalghatgi (1984) menyatakan bahwa tinggi *liftoff* merupakan fungsi linier dari kecepatan keluaran semburan (*jet exit velocity*), tidak tergantung pada diameter nozel dan berbanding terbalik terhadap kwadrat dari kecepatan pembakaran laminar maksimum [12].

R.C. Miake-Lye dan J.A. Hammer (1988) meneliti nyala api methane, ethylene, dan gas alam dengan oksidator udara, mendapatkan bahwa tinggi *liftoff* merupakan fungsi linier dari kecepatan semburan [13].

Vancquickenborne dan Van Tiggelen (1996) menyatakan bahwa udara dan bahan bakar tercampur sempurna pada dasar nyala api difusi dan kestabilan tercapai jika kecepatan aliran campuran stokiometri sama dengan kecepatan pembakaran nyala api difusi [14].

M.S. Cha dan S.H. Chung (1996), membandingkan sifat-sifat *lifted flame* nyala api difusi bahan bakar popana antara nyala api difusi *free jet* dengan *confined jet*, skematik ditunjukkan gambar dibawah ini [15].



Gambar 2.3. Skematik nyala api difusi (a) *free jet* (b) *confined jet*

Hasil observasi menunjukkan bahwa tinggi *lifted flame* difusi *free jet* linier secara proporsional terhadap laju aliran bahan bakar dan tidak tergantung pada diameter *tube*/nozel, sesuai persamaan dibawah ini.

$$\bar{x}_f = 0,002245u_i - 0,01663 \dots\dots\dots(2.8)$$

Sedangkan tinggi *lifted flame* menggunakan *confined jet* dipengaruhi diameter nozel dan laju aliran bahan bakar, sesuai dengan persamaan dibawah ini.

$$\frac{\bar{x}_f}{d_i} = u_i \left(1,02 + \frac{0,0976}{d_d - 0,35} \right) \dots\dots\dots(2.9)$$

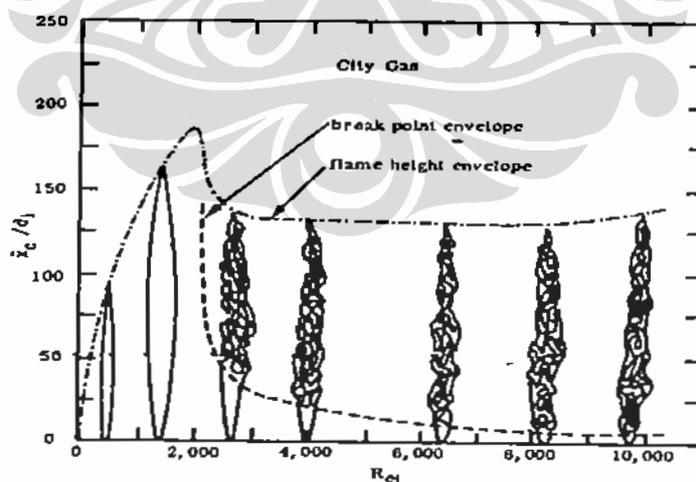
Eduardo Fernandez-Tarrazo, et al. (2005) melakukan analisis *numeric* guna menentukan kondisi *liftoff* dan *blowoff* pada pembakaran difusi dimana campuran bahan bakar dan udara disemburkan secara paralel dengan arah horizontal [16].

I Made Kartika Dhiputra, Harinaldi dan NK Caturwati (2008) melakukan observasi terhadap tinggi *lifted flame* menggunakan bahan bakar propana secara difusi/*nonpremix*, dengan menggunakan *free jet nozzle*. Tinggi *lifted flame* mulai tampak pada nilai *Reynolds number* saat keluar nozel, $Re_{f,i} = 34$ setinggi 25 mm. Tinggi *lifted flame* bertambah secara linier terhadap kecepatan aliran bahan bakar hingga mencapai *lifted* 80 mm dengan $Re_{f,i} = 113$. Penambahan laju aliran bahan bakar menyebabkan nyala api difusi *blowoff*. Pada $Re_{f,i} = 113$, udara dialirkan disekeliling propana dengan laju yang bervariasi, tinggi *lifted flame* menurun dari 80 mm menjadi 64 mm dengan *Reynolds number* udara $Re_{a,i} = 1715$ [17].

2.6.3 Tinggi Nyala api Difusi

Berdasarkan tipe aliran, nyala api difusi dibagi dua, yaitu : nyala api difusi aliran laminar dan turbulen. Tipe aliran ini mempengaruhi tinggi nyala api difusi. Tinggi nyala api difusi laminar meningkat sesuai dengan kenaikan laju aliran bahan bakar, sedangkan tinggi nyala api difusi tidak berpengaruh terhadap kenaikan laju aliran bahan bakar, tetapi diameter *tube*/nozel bahan bakar.

Hottel dalam *Fourth Symposium of Combustion* menyatakan bahwa tinggi dan struktur *cylindrical jet flame* sebagai fungsi laju bahan bakar dan diameter nozel, seperti ditunjukkan gambar 2.4 dibawah ini [18,19].



Gambar 2.4. Tinggi nyala api difusi laminar dan turbulen
(*experimental I.I.C. Hottel dan W.R. Hawthorne*).

Gambar 2.4 menunjukkan, untuk *Reynolds number* nozel ($Re_{f,i}$) yang rendah, karakteristik nyala api difusi : laminar, sharp-edged dan *steady in shape*. Tinggi nyala api difusi meningkat secara linier sesuai dengan kenaikan ($Re_{f,i}$). ($Re_{f,i}$) diperoleh dengan menggunakan persamaan dibawah ini.

$$Re = \frac{u d}{\nu} \dots\dots\dots(2.10)$$

Hasil pengukuran nyala api difusi secara eksperimen lebih besar dari hasil prediksi teori, hal ini diduga karena adanya gaya apung (*buoyancy effect*). *Hottel* mengkorelasikan data *Rembert* dan *Gaunce*, menunjukkan bahwa tinggi nyala api difusi proporsional terhadap akar kwadrat laju aliran volume bahan bakar $\left(\frac{\pi d_i^2 u_i}{4}\right)$. Data *Wohl* mengenai tinggi nyala api difusi laminar bahan bakar butana mengikut persamaan dibawah ini.

$$H_f \approx 8,55 (u_i d_i)^{1/2} \dots\dots\dots(2.11)$$

Bila *Reynolds number* nozel sekitar 2.000 ujung nyala api difusi menjadi berkerut dikarenakan nyala api mulai turbulen. Dengan menaikkan *Reynolds number* lebih lanjut, tinggi nyala api difusi menuju maksimum, sementara rambatan turbulen semakin cepat menjauh ujung nyala api (menuju nozel). Perubahan nyala api laminar ke nyala api turbulen (proses transisi) terjadi pada *Reynolds number* 2.000 s/d 10.000. Range *Reynolds number* pada proses transisi cukup besar, hal ini disebabkan pengaruh temperatur sangat besar terhadap viskositas gas. Oleh karena itu nyala api difusi yang memiliki temperatur adiabatik lebih tinggi diduga memiliki *Reynolds number* turbulen yang lebih tinggi dan sebaliknya nyala api yang memiliki temperatur adiabatik relatif rendah memiliki *Reynolds number* turbulen yang relatif rendah juga. Tabel dibawah ini menunjukkan ($Re_{f,i}$) proses transisi untuk beberapa jenis bahan bakar yang dibakar menggunakan udara (*Hottel dan Hawthorne*).

Tabel II.1. *Reynolds number* nozel kritis (transisi) untuk berbagai bahan bakar nyala api difusi (*Hottel dan Hawthorne*).

Fuel	$Re_{critical}$
Hydrogen	2,000
City gas	3,300- 3,800
Carbon monoxide	4,800- 5,000
Propane	8,800-11,000
Acetylene	8,800-11,000
Hydrogen (with primary air)	5,500- 8,500
City gas (with primary air)	6,400- 9,200

Untuk *Reynolds number* yang tinggi, nyala api difusi menjadi turbulen, lebih bercahaya dan ketinggian nyala api difusi konstan. Pada *Reynolds number* sekitar 10.000 nyala api difusi mulai terangkat menjauhi nozel, hal ini sesuai dengan yang telah diinvestigasi oleh *Wohl et al* dan *Yagi*. Tinggi nyala api turbulen yang di observasi independen terhadap laju aliran volume bahan bakar, tetapi linier terhadap diameter nozel.

2.6.3.1 Nyala Api Difusi Laminar

Howthore, Weddel dan Hottel [20] menggunakan pertimbangan efek perubahan skala dan memberikan korelasi sederhana antara tinggi nyala api difusi, dimensi *tube* dengan laju aliran bahan bakar gas sesuai persamaan dibawah ini.

$$\bar{H}_f \propto \frac{U d^2}{D} \dots\dots\dots (2.12)$$

Secara teoritis tinggi nyala api laminar proporsional terhadap laju aliran bahan bakar. Untuk aliran turbulen koefisien difusi (D) akan disubstitusi dengan difusifitas edy (ϵ) yang diperoleh dari produk skala intensitas turbulen. Karena skala turbulen proporsional terhadap diameter dan intensitas turbulen adalah proporsional terhadap kecepatan rata-rata U, maka persamaan 2.12 menjadi :

$$\bar{H}_f \propto \frac{U d^2}{Ud} \dots\dots\dots (2.13)$$

Atau,

$$\bar{H}_f \propto d \dots\dots\dots (2.14)$$

Untuk aliran turbulen, tinggi nyala api difusi tidak tergantung laju aliran bahan bakar dan hanya tergantung pada diameter tube burner.

Jost menginvestigasi panjang nyala api menggunakan persamaan kwadrat rata-rata *displacement*.

$$\bar{H}_f^2 = \xi^2 = 2 D t \dots\dots\dots(2.15)$$

Dimana ξ^2 adalah rata-rata kwadrat *displacement* dari beberapa lokasi disebabkan difusi selama waktu t . Pada titik ujung nyala api (*axis*), dicapai pembakaran sempurna rata-rata kedalaman penetrasi udara memasuki bahan bakar harus sama dengan *radius tube* dan point ini memberikan tinggi nyala api difusi. Jika ξ identik dengan rata-rata kedalaman penetrasi. Jika u diambil sebagai kecepatan konstan *gas element*, t adalah waktu yang dibutuhkan *gas element* dari ujung burner sampai ujung nyala api difusi, maka t dan ξ diperoleh sebagai berikut :

$$t = \frac{\bar{H}_f}{u} \dots\dots\dots(2.16)$$

Dan

$$\xi = \frac{d_t}{2} \dots\dots\dots(2.17)$$

Dengan mensubsitusikan persamaan 2.16 dan 2.17 ke persamaan 2.15 diperoleh persamaan nyala api laminar sebagai berikut.

$$\bar{H}_f = \frac{d_t^2 U}{8D} \dots\dots\dots(2.18)$$

Atau

$$\bar{H}_f = \frac{Q_f}{2\pi D} \dots\dots\dots(2.19)$$

Wohl, Gazley dan Kapp secara sederhana mengembangkan persamaan tinggi nyala api difusi laminar melalui persamaan dibawah ini.

$$\bar{H}_f = \frac{Q_f}{4\pi C_f D} \dots\dots\dots(2.20)$$

Dimana :

$$C_f = \frac{1}{4\theta_f} \dots\dots\dots(2.21)$$

Atau,

$$C_f = \frac{1 + a_o}{1 + a_i} \dots\dots\dots(2.22)$$

Dimana : a_o adalah *ratio* mole udara terhadap mol bahan bakar di nozel dan a_i adalah *ratio* mol udara terhadap mole oksigen pada lapisan batas nyala api atau, $a_i = (m_{udara}/m_{fuel})_{stokiometri}$, karena pada lapisan batas nyala api difusi, udara dan bahan bakar berada dalam *ratio* stokiometri. Substitusi persamaan 2.21 ke persamaan 2.20, diperoleh :

$$\bar{H}_f = \frac{Q_f \theta_f}{\pi D} \dots\dots\dots(2.23)$$

Parameter θ adalah parameter bilangan tak berdimensi yang didefinisikan berikut:

$$\theta = \frac{4Dt}{d^2} \dots\dots\dots(2.24)$$

Nilai θ pada ujung nyala api difusi adalah θ_f , dan di peroleh sebagai berikut :

$$\theta_f = 4 \ln(1 + a_o)/(1 + a_i) \dots\dots\dots(2.25)$$

2.6.3.2 Nyala api Difusi Turbulen

Nyala api turbulen tidak seperti nyala api laminar, nyala api turbulen menimbulkan noise dan fluktuasi yang sangat cepat pada ujung nyala api, dengan alasan terbatas panjang nyala api laminar *independent* terhadap peralatan pembakaran tetapi *dependent* terhadap ratio udara-bahan bakar dan propertis, vikositas, difusivitas dsb. Sifat-sifat nyala api difusi turbulen dapat dijelaskan melalui dua pendekatan yang berbeda. Pendekatan pertama, melalui teori yang sama dengan permasalahan laminar, dimana koefisien difusivitas (D) disubstitusi dengan difusivitas eddy turbulen. Pendekatan kedua menggunakan persamaan pencampuran semburan turbulen. *Wohl, Gazlev dan Kapp* [21] menggunakan difusivitas eddy turbulen untuk mensubstitusi koefisien difusi laminar (persamaan 2.13), untuk nyala api turbulen difusivitas edy didefinisikan sebagai produk panjang pencampuran l_1 , dan intensitas turbulen u' . Untuk aliran berkembang penuh nilai l_1 maksimum terjadi pada sumbu nozel. Menurut *Dyden*, nilai maksium l_1 maksimum pada axis tube sesuai persamaan berikut:

$$l_1 = 0,085 d \dots\dots\dots(2.26)$$

Dan nilai,

$$u' = 0,03 U \dots\dots\dots(2.27)$$

Oleh karena difusitas eddy (ϵ_m) :

$$\epsilon_m = l_1 u' = 0,00255 U d \dots\dots\dots(2.28)$$

Untuk aliran nyala api dalam tabung, nilai *eddy diffusivity* dapat agak berubah.

Wohl et al. menggunakan ekspresi dibawah ini,

$$\epsilon_m = 0,00255 f U_o d \dots\dots\dots (2.29)$$

Dimana f adalah faktor gesekan dan konstan pada kecepatan seragam. U_o adalah kecepatan gas rata-rata pada nozel. Dengan mensubtitusi D menjadi ϵ pada persamaan 2.23 diperoleh persamaan dibawah ini.

$$\bar{H}_f = \frac{Q_f \theta_f}{\pi \epsilon}$$

Atau,

$$\bar{H}_f = \frac{Q_f \theta_f}{\pi (0,00255) f U_o d,} \dots\dots\dots(2.30)$$

Karena :

$$Q_f = \frac{\pi U_o d_i^2}{4}$$

Maka :

$$\frac{\bar{H}_f}{d_i} = \frac{\theta_f}{4(0,00255) f} \dots\dots\dots(2.31)$$

Atau,

$$\frac{\bar{H}_f}{d_i} = \frac{\theta_f}{0,01 f} \dots\dots\dots(2.32)$$

Gunther memperoleh persamaan panjang nyala api difusi turbulen *confined jet*, sebagai berikut :

$$\frac{\bar{H}_f}{d_i} = 6(R+1) \left(\frac{\rho_c}{\rho_f} \right)^{1/2} \dots\dots\dots(2.33)$$

Nilai \bar{H}_f/d_i yang diperoleh *Guther* untuk bebarapa bahan bakar diberikan tabel dibawah ini.

Tabel II.2. Nilai \bar{H}_f/d_i , untuk berbagai bahan bakar gas

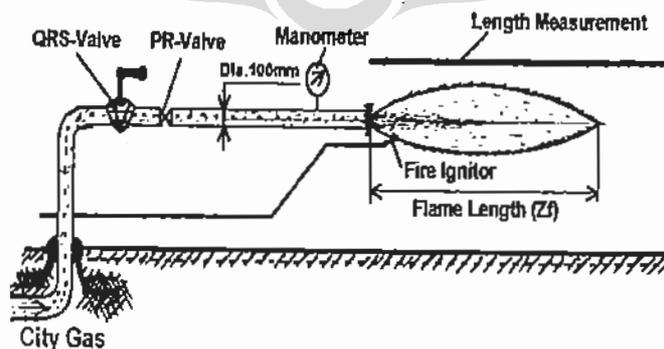
Fuel gas	\bar{H}_f/d_i
CO	76
Coke oven gas	110
City gas	136
H ₂	147
C ₂ H ₂	188
C ₃ H ₈	296
CH ₄	200

Hawthorne menghasilkan formula tinggi nyala api turbulen dengan menggunakan perbedaan density, seperti ditunjukkan persamaan berikut.

$$\frac{\bar{H}_f}{d_i} = 5,3 \left[\frac{T_f}{(1+f)T_i} \left(\frac{M_p}{M_F} + \frac{M_p}{fM_O} \right) \right]^{1/2} \dots\dots\dots(2.34)$$

Hawthorne menyatakan persamaan 2.34 diatas terbukti valid untuk berbagai jenis bahan bakar, yang direaksikan dengan oksigen termasuk propana, hydrogen, acetylen, karbon oksida dan city gas. Wohl memperoleh perbandingan \bar{H}_f/d_i , sekitar 110.

I Made Kartika Dhiputra (1996) melakukan experiment terhadap panjang maksimum nyala api difusi bahan bakar city gas dengan diameter port 5 mm, 10 mm, 20 mm dan 40 mm serta tekanan laju aliran bahan bakar bervariasi, menyatakan bahwa panjang nyala api difusi sebagai fungsi diameter port tekanan aliran gas. Skematik eksperimen seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 2.5. Skematik eksperimen pengukuran panjang nyala api

Analisis yang dilakukan adalah membandingkan data hasil eksperimen dengan hasil korelasi *S.I. Averin* dan *I. D. Semikin* serta korelasi *B. I. Kitaev* dan *P.V. Levchenko*. Hasil analisis menggunakan korelasi *B. I. Kitaev* dan *P.V. Levchenko* lebih mendekati panjang nyala api difusi hasil eksperimen. Korelasi *B. I. Kitaev* dan *P.V. Levchenko* ditunjukkan persamaan dibawah ini [22,23].

$$\bar{L}_f = 14,0 K u_{f,i}^{0,34} d_{IN}^{0,83} \dots\dots\dots(2.35)$$

Dimana,

K = Faktor ditentukan oleh panas pembakaran dari komposisi bahan bakar.

$$K = (0,24/4187) LHV \dots\dots\dots(2.36)$$

E.I. Kazantsev dan *I.D. Semikin* memberikan korelasi panjang nyala api difusi dalam aliran udara dengan kecepatan v_a sebagai berikut :

$$\bar{L}_f = \frac{u_{f,i}}{3,75 + 0,925v_{f,i}} (5,6 + 0.005 LHV) d_i \dots\dots\dots(2.37)$$

Untuk pembakaran dalam aliran udara dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\bar{L}_f = \frac{u_{f,i}}{3,75 + 0,925v_{f,i} + u_a} (5,6 + 0.005 LHV) d_i \dots\dots\dots(2.38)$$

Kemudian *E.I. Kazantsev* memberikan persamaan berikut:

$$\bar{L}_f = \frac{L_{f,max} u_f}{u_f + u_a} \dots\dots\dots(2.39)$$

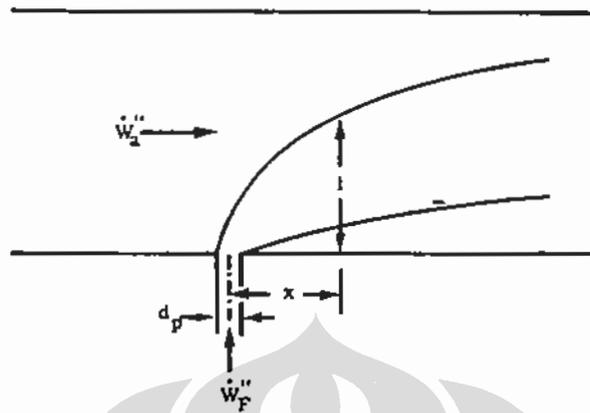
2.7 POLA ALIRAN SEMBURAN UDARA-BAHAN BAKAR NYALA API DIFUSI

Dalam prakteknya semburan udara-bahan bakar pada turbin gas, *ram jet* dan *furnace* industri dibatasi oleh dinding (*confined flame*). Pada umumnya pola aliran semburan udara-bahan bakar dalam *confined flame* terdiri dari dua klasifikasikan, yaitu :

1. Semburan aliran menyilang (*confined transverse jet*), bahan bakar diinjeksikan arah normal (tegak lurus) arah aliran udara.
2. Semburan aliran membujur (*confined longitudinal jet*), bahan bakar diinjeksikan paralel dengan arah aliran udara.

2.7.1 Semburan Aliran Menyilang (*Confined Transverse Jet*)

Hottel, Hawthorne dan Weddel [24] mempelajari pola aliran nyala api difusi semburan aliran menyilang ditunjukkan gambar dibawah ini.



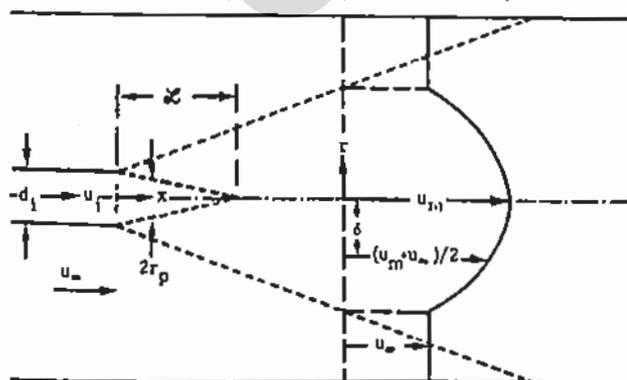
Gambar 2.6. Pola aliran semburan meyilang (*transverse flow jet*).

Jika laju aliran massa bahan bakar $Q_f = W_f'' = \rho_f u_f$ melalui diameter nozel (d_f) memasuki aliran udara $Q_a = W_a'' = \rho_a u_a$ seperti ditunjukkan gambar 2.6, bagian atas ujung semburan l sebagai fungsi x merupakan jarak dari pangkal aliran. Korelasi l/d_p ditunjukkan persamaan dibawah ini.

$$\left(\frac{l}{d_p}\right)^{1.65} = 2,91 \left(\frac{W_f''}{W_a''}\right) \left(\frac{x}{d_p}\right)^{0,5} \dots\dots\dots(2.40)$$

2.7.2 Semburan Aliran Membujur (*Confined Longitudinal Jet*)

Landies dan Shapiro [25] menginvestigasi pola aliran semburan membujur (*longitudinal flow jet*) seperti ditunjukkan gambar 2.7 dibawah ini.



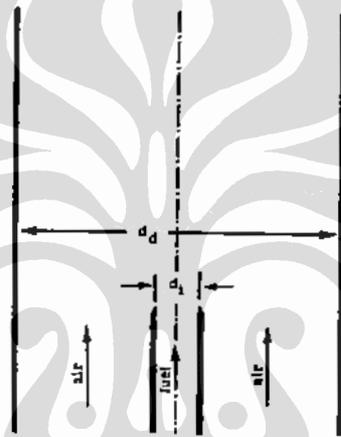
Gambar 2.7. Pola aliran semburan membujur (*longitudinal flow jet*).

Hasil observasi *Lundies* dan *Shapiro* sebagai berikut :

$$\frac{r_p}{d_i} = \frac{1}{2} \left(1 + 3 \frac{u_\infty}{u_i} - \frac{1}{4} \frac{x}{d_i} \right); \quad 0 \leq x \leq \mathcal{L} \quad \dots\dots\dots(2.41)$$

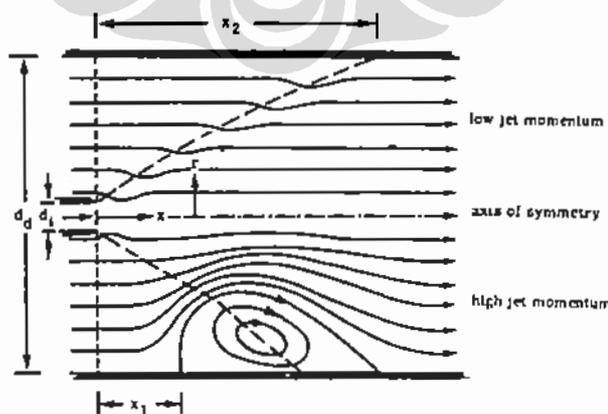
$$\frac{\delta_i}{d_i} = \frac{2}{1.4} \left(\frac{\delta}{d_i} \right); \quad x \geq \mathcal{L} \quad \dots\dots\dots(2.42)$$

Bentuk paling sederhana semburan aliran membujur (*logitudinal flow*) diperoleh melalui injeksi bahan bakar gas melalui pipa (*tube*) diameter kecil yang ditempatkan pada pipa (*tube*) diameter yang lebih besar dan dialiri oleh udara. Aliran bahan bakar dan udara dipisah sebelum memasuki daerah reaksi, seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 2.8. Peralatan untuk menghasilkan nyala api difusi semburan *logitudinal*.

Pola aliran yang dihasilkan gambar 2.8 diprediksi secara geometri, seperti ditunjukkan gambar 2.9 dibawah ini.



Gambar 2.9. Pola aliran semburan *logitudinal*.

Bila kecepatan aliran bahan bakar relatif rendah terhadap aliran udara terjadi pembelokan (*deflected*), pola arah aliran bahan bakar-udara seperti ditunjukkan bagian atas gambar 2.9 *Thirng* dan *Newby* memberikan pendekatan hubungan antara x_2 (jarak pangkal aliran dari nozel sampai aliran menyentuh dinding *tube* bagian luar dengan diameter d_d seperti ditunjukkan persamaan beriku:

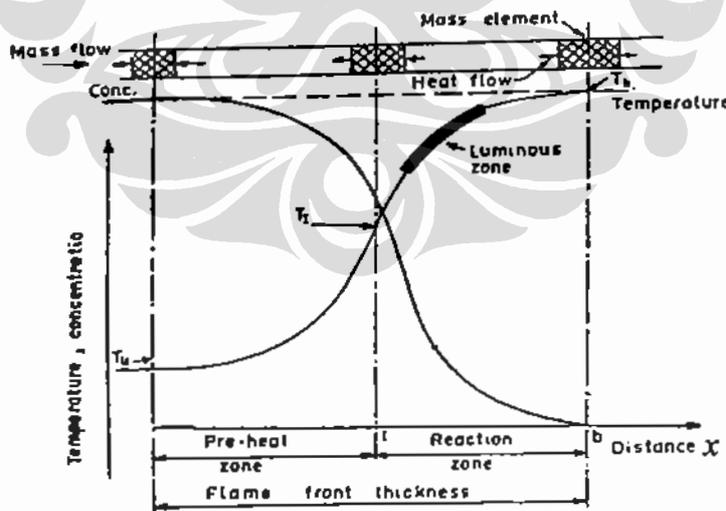
$$x_2 = 2,25 d_d \dots\dots\dots(2.43)$$

Bila kecepatan aliran bahan bakar relatif tinggi terjadi tumbukan yang relatif besar sehingga menimbulkan pusaran (*vortex*) dari mulai pangkal aliran (nozel) pada jarak x_1 seperti ditunjukkan bagian bawah gambar 2.9. *Thirng* dan *Newby* memperoleh korelasi hubungan antara x_1 , ukuran diameter nozel, laju aliran massa bahan bakar dan laju aliran massa udara, sebagai berikut :

$$x_1 = 2,5 d_1 \left(1 + \frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_f} \right) \dots\dots\dots(2.44)$$

2.8 PROFILE TEMPERATUR

B. Lewis dan *G. Van Elbe* (1951) [26] melakukan observasi *profile* temperatur dan aliran konsentrasi bahan bakar pembakaran nyala api difusi seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 2.10. *Profile* temperatur dan konsentrasi aliran bahan bakar.

Gambar 2.10 menunjukkan aliran bahan bakar melalui nozel menuju arah sumbu x positif dan menghasilkan nyala api difusi. Ditinjau suatu *mass element*

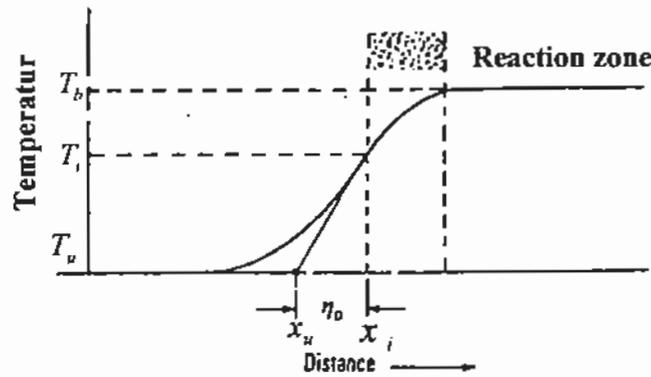
bergerak dari sisi *unburned* ke sisi *burned*. T_u adalah batasan temperatur sebelum terjadinya reaksi kimia, tidak ada perpindahan panas yang disebabkan *mass element* terdahulu pada sisi *downstream*. Secara alamiah *profile* temperatur selama perpindahan *mass element* sampai batasan I , naik dengan pergerakan cembung ke arah sumbu x dan menaikkan temperatur *mass element*, disebabkan konduksi dari panas *mass element* terdahulu pada *downstream*. Panas yang diberikan *mass element* pada *downstream* lebih besar dari kerugian energi akibat pendinginan *mass element* pada *upstream*. Pada daerah ini mulai terjadi reaksi kimia, sehingga kenaikan panas terjadi secara berlahan-lahan.

Oleh karena kenaikan temperatur, laju reaksi kimia juga naik. Pada temperatur T_i , *mass element* ini menaikkan reaksi kimia pada dirinya sendiri dan menaikkan temperatur terus berlangsung oleh karena pelepasan panas dari reaksi kimia. *Profile* temperatur setelah batasan I , secara alamiah berubah dan perubahan menjadi cekung menuju sumbu x .

Luminous zone (bayangan persegi panjang) pada *profile* temperatur menunjukkan ketebalan *reaction zone*. *Reaction zone* terjadi antara temperatur awal T_u dan temperatur akhir T_b (gambar 2.10). T_u menunjukkan batasan dimana temperatur campuran mulai naik dan T_b menunjukkan batasan dimana temperatur pembakaran dicapai. T_i adalah temperatur *ignation*. Daerah antara T_u dan T_i disebut *preheat zone*, daerah antara T_i dan T_b disebut *reaction zone*.

Kenaikkan temperatur pada *preheat zone* hanya disebabkan konduksi atau panas yang diterima oleh daerah ini lebih besar dari yang diterima disekitarnya. Pada *preheat zone* tidak ada panas yang dihasilkan oleh reaksi dan konduktivitas *thermal* dan panas spesifik adalah konstan. Oleh karena itu ketebalan *preheat zone* dapat dihitung secara teori.

Berdasarkan *profile* temperatur (gambar 2.10), ketebalan *preheat zone* (η_o) dapat diprediksi menggunakan persamaan dibawah ini [27].



Gambar 2.11. Prediksi ketebalan *preheat zone* berdasarkan *profile* temperatur.

$$\eta_o = \frac{T_i - T_u}{(dT/dx)_i} \dots\dots\dots(2.45)$$

dan

$$\eta_o = x_i - x_u \dots\dots\dots(2.46)$$

Dimana;

- η_o : Ketebalan *preheat zone*
- (dT/dx) : *Gradient* temperatur terhadap jarak sumbu axis
- x_i : Jarak T_i ke ujung nozel
- x_u : Jarak T_u maksimum ke ujung nozel.

I Made Kartika dan Tri Nugroho (2008) [28] melakukan observasi terhadap *preheat zone* bahan bakar propana, diperoleh distribusi temperatur yang terjadi sepanjang daerah *preheat zone* sesuai persamaan berikut:

$$T_{pz} = -0,2051 x^3 + 45,75 x^2 - 3334,3 x + 79767 \dots\dots\dots(2.47)$$

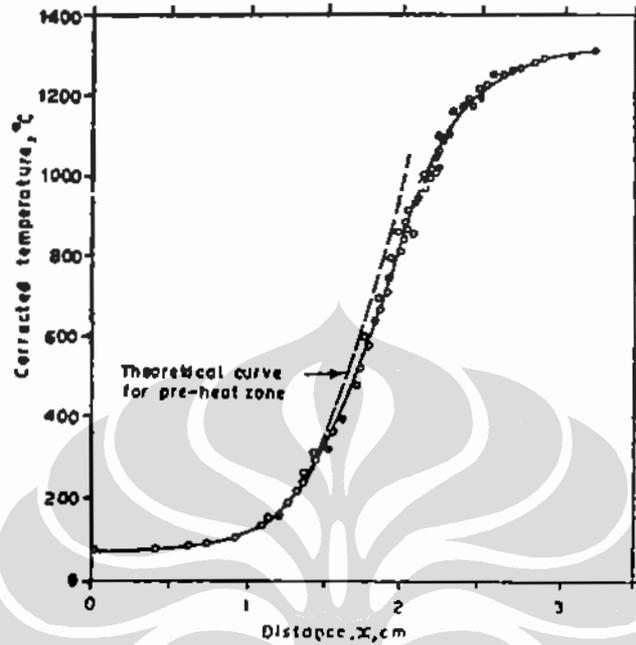
Dimana : T_{pz} = Temperatur *preheat zone*

Dan diperoleh ketebalan *preheat zone* pada temperatur nyala $T_i=466^\circ\text{C}$ sebesar 6,13 mm.

Oleh karena density dan konduktivitas bahan bakar gas dan udara tidak terlalu besar maka ketebalan *preheat zone* sangat tergantung pada *burning velocity* dan tekanan, dan secara teori temperatur *preheat zone* naik secara eksponential.

Dizon-Lewis dan Wilson [29] menyatakan bahwa campuran methana-udara dapat bereaksi pada temperatur 1450 K s/d 2100 K, dan temperatur penyalaan 1100 K s/d 1300 K. R. Friedman, E. Burke dan J. Chem (1954) memperoleh

temperatur penyalaan untuk campuran *acetylene*-udara, *ethelene*-udara dan *propane*-udara diperoleh secara eksperimen sebesar 400°C s/d 800°C. Gambar 2.12 menunjukkan *profile* temperatur nyala api difusi *propane*-udara.



Gambar 2.12. *Profile* temperatur *propane*-udara.

2.9. KECEPATAN PEMBAKARAN (*BURNING VELOCITY*)

Berdasarkan tipe aliran bahan bakar, kecepatan pembakaran terdiri dari dua klasifikasik, yaitu kecepatan pembakaran laminar dan turbulen.

2.9.1. Kecepatan Pembakaran Laminar

Kecepatan pembakaran laminar atau kecepatan pembakaran normal, yang didefenisikan sebagai konsumsi *volume unburned gas* perunit dibagi area *flame front*. Gouy [30] memberikan pertama sekali persamaan kecepatan linier, S_L , seperti ditunjukkan persamaan dibawah ini.

$$S_L = \frac{Q_m}{A_{FF}} \dots\dots\dots (2.48)$$

Dimana A_{FF} = Luas *flame front*, sesuai persamaan dibawah ini.

$$A_{FF} = r_i \sqrt{r_i^2 + L_f^2} \dots\dots\dots(2.49)$$

Dengan menggunakan *Total Area Method*, A_{FF} dapat diperoleh berdasarkan persamaan berikut:

$$A_{FF} = \frac{\pi A_c S}{L_f} \dots\dots\dots (2.50)$$

Tehnik lain untuk memperkirakan kecepatan pembakaran laminar diukur berdasarkan perhitungkan tinggi nyala api dan area nyala api dengan asumsi nyala api mempunyai bentuk kerucut dan nozel berbentuk sirkular dengan radius r , dan kecepatan pembakaran laminar diberikan persamaan sebagai berikut [31]:

$$S_L = \frac{2 Q_f}{\pi r \sqrt{L_f + r^2}} \dots\dots\dots (2.51)$$

Faktor *error* persamaan 2.51 sebesar 15-20% dan r adalah radius nozel.

Sehingga persamaan 2.51 menjadi :

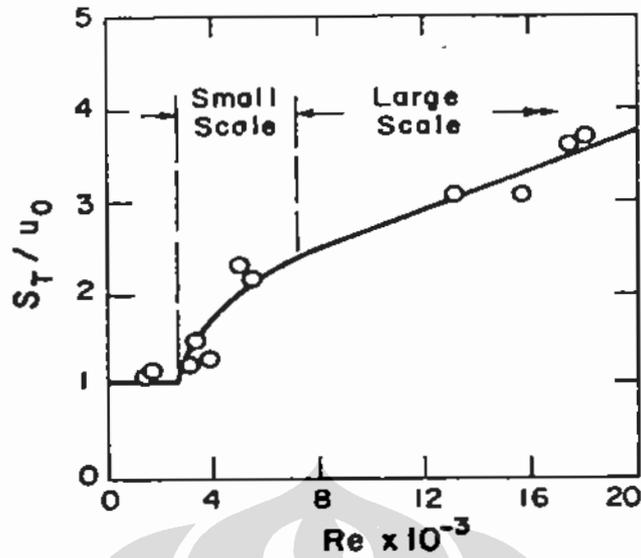
$$S_L = \frac{2 Q_f}{\pi r \sqrt{L_f + r^2}} \times 1,2 \dots\dots\dots (2.52)$$

2.9.2 Kecepatan Pembakaran Turbulen

Salah faktor yang mempengaruhi kecepatan pembakaran adalah konsentrasi bahan bakar. *Damkohler* (1940) pertama sekali secara sistematis mempelajari efek *Reynolds number* terhadap kecepatan pembakaran yang berbeda-beda [32]. *Damkohler* menyatakan bahwa kecepatan pembakaran :

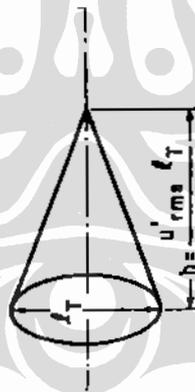
1. Independent terhadap *Reynolds number*, bila $Re \leq 2.300$.
2. Proporsional terhadap akar kwadrant *Reynolds number*, bila $2.300 \leq Re \leq 6.000$.
3. Proporsional terhadap *Reynolds number*, bila $Re \geq 6.000$.

Dari item 2 dan 3 jelaslah bahwa kecepatan pembakaran dipengaruhi oleh *Reynolds number*, seperti ditunjukkan gambar dibawah ini.



Gambar 2.13. Efek *Reynolds number* terhadap kecepatan pembakaran.

Dimana U_0 adalah kecepatan bahan bakar pada nozel, S_T kecepatan pembakaran turbulen. *Schelkin* (1943) mengusulkan bahwa ratio S_T terhadap S_L sama dengan ratio rata-rata luas *cone* terhadap rata-rata dasar *cone* [33], ditunjukkan gambar 2.14.



Gambar 2.14. *Flame front conical*.

dari bentuk geometri gambar 2.14 diperoleh :

$$A_C = A_B \left(1 + \frac{4h^2}{l_T^2} \right)^{1/2} \dots\dots\dots (2.53)$$

Dimana A_C adalah luas *cone*, A_B luas dasar *cone*, l_T diameter *cone* dan h (\bar{L}_f) adalah tinggi nyala api yang diperoleh dengan persamaan dibawah ini.

$$\bar{L}_f = u'_{rms} t = u'_{rms} \frac{L_f}{S_L} \dots\dots\dots (2.54)$$

Dengan mensubstitusi persamaan 2.54 kepersamaan 2.53 diperoleh kecepatan pembakaran turbulen sebagai berikut :

$$S_T = S_L \left[1 + \left(\frac{2u'_{rms}}{S_L} \right)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (2.55)$$

Dimana u'_{rms} adalah kecepatan rata-rata campuran udara-propana.

William, Hottel dan Scurlock mengobsevasi bahwa dengan kecepatan aliran yang rendah ($< 125 \text{ cm/s}$). Kecepatan pembakaran turbulen bervariasi terhadap *ratio* bahan bakar-udara tetapi menjadi independen jika kecepatan aliran ($> 250 \text{ cm/s}$).

Bollinger dan Williams melaporkan kecepatan pembakaran turbulen untuk tiga bahan bakar, yaitu *acetylene, ethylene dan propane* dengan udara sebagai oksidasidator, mereka memperoleh persamaan kecepatan pembakaran turbulen sebagai berikut :

$$S_T = 0,18 S_u d_u^{0,26} Re^{0,24} \dots\dots\dots (2.56)$$

Dari persamaan 2.56 dapat diketahui bahwa kecepatan pembakaran turbulen secara langsung proporsional terhadap kecepatan pembakaran linier [34].

2.10 ANALISIS KECEPATAN DAN REYNOLDS NUMBER CAMPURAN UDARA-PROPANA

Untuk mengetahui pengaruh sudut sembur udara dan sudut sembur propana terhadap panjang nyala api difusi dilakukan analisis : pengaruh diameter, tinggi, kecepatan, viskositas dan *Reynolds number* campuran udara-propana digunakan persamaan-persamaan dibawah ini.

Kecepatan campuran udara-propana, u_{mix} . [35] :

$$u_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n \rho_i u_i}{\sum_{i=1}^n \rho_i} \dots\dots\dots (2.57)$$

Viskositas campuran udara-propana, ν_{mix} oleh C.R. Wilke [36]:

$$\nu_{mix} = \frac{\sum_{i=1}^n \chi_i \nu_i}{\sum_{j=1}^n \chi_j \Phi_j} \dots\dots\dots(2.58)$$

Dimana,

$$\Phi_j = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j} \right)^{1/2} \left[1 + \left(\frac{\nu_i}{\nu_j} \right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i} \right)^{1/4} \right]^2 \dots\dots\dots(2.59)$$

Sehingga *Reynolds number* (Re_{mix}) campuran udara-propana diperoleh sebagai berikut :

$$Re_{mix} = \frac{u_{mix} \cdot d_{mix}}{\nu_{mix}} \dots\dots\dots(2.60)$$

